



GESTÃO E TECNOLOGIA DE PROJETOS

Design Management and technology

Pesquisa em Fabricação Digital no Projeto de Arquitetura
Research on Digital Fabrication in Architectural Design

Número especial SIGraDi / SIGraDi Special Issue
2016 Jul.-Set.; 11 (2)

Editor chefe

Márcio Minto Fabricio, IAU-USP

Editores edição 2016 Jul.-Set.; 11 (2)

David Moreno Sperling, IAU-USP
Underléa Miotto Bruscato, UFRGS

Editores Associados

Paulo Roberto Andery, UFMG
Sheila Walbe Ornstein, FAU- USP
Sílvio Melhado, EP-USP

Editores Convidados (números determinados)

Underléa Miotto Bruscato, UFRGS
Sérgio Scheer, UFPR
David Moreno Sperling, IAU-USP
Eugenio Andrés Días Merino, UFSC
Giselle Arteiro Azevedo, UFRJ
Guilherme Parsekian, UFSCar
Humberto Ramos Roman, UFSC
Mônica S. Salgado, UFRJ
Paulo Afonso Rheingantz, Proarq/FAU-UFRJ
Paulo Roberto Andery, UFMG
Regina Coeli Ruschel, UNICAMP
Sílvio B. Melhado, EP-USP
Sérgio Roberto Leusin Amorim, UFF
Tomás Antonio Moreira, IAU-USP

Comitê Científico e Conselho Editorial

Antônio Baptista Coelho, Universidade da Beira Interior (Covilhã), Portugal
Patrícia Tzortzopoulos Fazenda, University of Huddersfield, Reino Unido
Paulo Afonso Rheingantz [Proarq/FAU-UFRJ], Brasil
Paulo Roberto Andery, Universidade Federal de Minas Gerais [UFMG], Brasil
Professor Roberto A. Cherubini, Univeversità di Roma - Sapienza, Itália
Roberto de Oliveira, Universidade Federal de Santa Catarina [UFSC], Brasil
Sérgio Roberto Leusin Amorim, Universidade Federal Fluminense [UFF], Brasil
Sérgio Scheer, Universidade Federal do Paraná [UFPR], Brasil
Sheila Walbe Ornstein, Universidade de São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo [FAUUSP], Brasil
Mônica S. Salgado, Universidade Federal do Rio de Janeiro [UFRJ], Brasil
Maria Gabriela Caffarena Celani, Universidade Estadual de Campinas [UNICAMP], Brasil
Celso Carlos Novaes, Universidade Federal de São Carlos [UFSCar], Brasil
Doris Catharine Cornelle Knatz Kowaltows, Universidade Estadual de Campinas [UNICAMP], Brasil
Eduardo Toledo Santos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo [EPUSP], Brasil
Francisco Segnini Junior, Faculdade de Arquitetura da Universidade de São Paulo [FAUUSP], Brasil
Gleice Virginia Medeiros de Azambuja Elali [UFRN], Brasil
Márcio Minto Fabricio, Universidade de São Paulo. Instituto de Arquitetura e Urbanismo [IAU-USP], Brasil
Sílvio B. Melhado, Universidade de São Paulo [EPUSP], Brasil

Equipe Técnica de Informática

Daniel Picon [IAU-USP]
Evandro Cesar Bueno [IAU-USP]

Design do Logotipo da Revista

David Moreno Sperling, [IAU-USP]

Editoração

Rodrigo Scheeren
Tássia Vasconcelos

Publicação da Revista

Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo [IAU-USP]



GESTÃO E TECNOLOGIA
DE PROJETOS
Design Management and technology



GESTÃO E TECNOLOGIA DE PROJETOS

Design Management and technology

Pesquisa em Fabricação Digital no Projeto de Arquitetura
Research on Digital Fabrication in Architectural Design

Número especial SIGraDi / SIGraDi Special Issue
2016 Jul.-Set.; 11 (2)

© Gestão e Tecnologia de Projetos

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratização mundial do conhecimento

Periodicidade

Semestral

Tiragem

Revista eletrônica



Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo [IAU-USP]

Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 - Centro

13566-590, São Carlos - SP, Brasil

Telefone: +55 16 3373-9311

Fax: +55 16 3373-9310

www.iau.usp.br



Ficha Catalográfica

Gestão e Tecnologia de Projetos / Universidade de São Paulo.
Instituto de Arquitetura e Urbanismo. - v. 1, n. 1 (2006) - .
- São Carlos: USP, 2006 -

Semestral

ISSN 1981-1543

1. Processos e tecnologias de projetos - Periódicos.
Arquitetura. I. Universidade de São Paulo. Instituto de
Arquitetura e Urbanismo.

Apoio

Programa de Apoio às Publicações Científicas Periódicas da USP - SIBI USP

Bases de Indexação e Divulgação



Produção Editorial

Tássia Vasconcelos

Rodrigo Scheeren

4-5 EDITORIAL

David M. Sperling, Underléa Bruscato

6-7 EDITORIAL

David M. Sperling, Underléa Bruscato

9-23 CORK RE-WALL: MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE GERAÇÃO AUTOMÁTICA E FABRICAÇÃO DIGITAL DE PAREDES EM CORTIÇA PARA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

CORK RE-WALL: COMPUTATIONAL METHODS OF AUTOMATIC GENERATION AND DIGITAL FABRICATION OF CORK PARTITION WALLS FOR BUILDING RENOVATION

Filipe Jorge da Silva Brandão, Alexandra Paio, José Pedro Sousa, Vasco Rato

25-41 CASA REVISTA: ARQUITETURA DE FONTE ABERTA

HOUSE MAGAZINE: OPEN SOURCE ARCHITECTURE

Andrés Passaro, Clarice Rohde

43-57 PROTO-TECTONIC WEAVING SYSTEM: COMPUTATIONAL DESIGN WORKFLOW FOR SEMI-PERMEABLE SELF-SUPPORTING ENCLOSURES

SISTEMAS DE TECELAGEM PROTO-TECTÔNICA: FLUXO DE TRABALHO DE DESIGN COMPUTACIONAL DE FECHAMENTOS SEMIPERMEÁVEIS AUTOPORTANTES

Roberto Naboni, Luca Breseghello

59-71 COMPUTATIONAL DESIGN AND SIMULATION OF BENDING-ACTIVE AUXETIC STRUCTURES

DESENHO COMPUTACIONAL E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS AUXÉTICAS DE FLEXÃO-ACTIVA

Roberto Naboni, Lorenzo Mirante

73-87 O DESENVOLVIMENTO DE ELEMENTOS DE PROTEÇÃO DE FACHADA RESPONSIVOS – EXPLORAÇÃO E CONTROLE DE UM PROCESSO

DEVELOPMENT OF A RESPONSIVE SYSTEM FOR BUILDING FAÇADE PROTECTION – EXPLORING AND CONTROLLING A PROCESS

Carlos Eduardo Verzola Vaz, Joana Pack Melo Sousa, Hugo Rodrigues de Souza Pinto, Adriano Rodrigo Barreto Cardoso, Natalia Queiroz

Editorial Volume 11 Número 2 2016

Neste número dedicado à “Pesquisa em Fabricação Digital no Projeto de Arquitetura”, a Revista Gestão e Tecnologia de Projetos inicia uma parceria com a Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital (SIGraDi), que completa 20 anos de existência em 2016. A SIGraDi integra uma rede de organizações similares na Europa (ECAADE), América do Norte (ACADIA), Ásia e Oceania (CAADRIA) e Ásia Ocidental e África do Norte (ASCAAD) que, por meio de seus eventos científicos e publicações, congrega pesquisadores das áreas de arquitetura e urbanismo, design e arte vinculados à reflexão e aplicação dos meios digitais.

Com esta parceria, pretende-se a publicação de um número da revista por ano com artigos resultantes da revisão e significativa ampliação de trabalhos apresentados em congresso da SIGraDi no ano respectivamente anterior. A partir de um tema de relevância para a área da tecnologia de projetos, será realizada uma pré-seleção de trabalhos e seus autores serão convidados a submeter novos artigos ao processo de avaliação cega por pares da revista. Acreditamos que esta parceria permitirá a sinergia entre a revista e esta sociedade científica, ambas interessadas na divulgação de pesquisas relevantes em suas áreas de atuação, as quais possuem significativa interseção.

Nada melhor, então, que trazer à luz uma das temáticas mais recentes na articulação entre o projeto do ambiente construído e a computação, e que vem apresentando alto grau de impacto nos processos projetuais e de construção: a “Fabricação Digital”. A ampliação crescente do acesso a processos de produção controlados numericamente que permitem, por um lado, a manufatura de formas complexas e, por outro, a customização em massa e a produção de pequenas séries, vem colocando em tela um conjunto de novas possibilidades para pesquisa. Assim como, a criação de laboratórios de fabricação digital e prototipagem rápida em escolas de arquitetura e de engenharia ao redor do mundo desde os anos 1990 (na América Latina desde os anos 2000, com um pico recente entre os anos de 2010 e 2013), e conexões entre escritórios de arquitetura e engenharia e indústrias de produção automatizada, apontam transformações já em curso.

É neste contexto mais geral que este número se insere, abrigando artigos que articulam a pesquisa em fabricação digital com uma diversidade de aplicações: renovação de edifícios e personalização da construção, projeto aberto e habitação social, interação entre métodos artesanais e digitais para construção de formas complexas, aplicação de cascas nervuradas produzidas por meio de manufatura aditiva, desenvolvimento de sistemas responsivos de proteção solar de fachadas. Após pré-seleção de 19 trabalhos e convite a seus respectivos autores oriundos de 09 países distintos (Argentina, Brasil, Bolívia, Chile, Espanha, França, Itália, Portugal e Estados Unidos), como resultado do processo de avaliação às cegas por pares foram aprovados os 05 artigos que apresentamos nesta edição.

Na abertura, o artigo **Cork Re-Wall - Computational Methods of Automatic Generation and Digital Fabrication of Cork Partition Walls for Building Renovation**, de autoria de Filipe Brandão, Alexandra Paio, José Pedro Souza e Vasco Rato, expõe um método computacional integrado a processos de fabricação digital que permite gerar soluções personalizadas de alta qualidade utilizando materiais naturais e renováveis, em projetos orientados à reabilitação de edifícios construídos com técnicas tradicionais.

O artigo de Andrés Passaro e Clarice Rohde, **Casa Revista: arquitetura de fonte aberta**, descreve um processo construtivo de fonte aberta que utiliza a fabricação digital na produção de habitações de baixo custo. Baseado no sistema WikiHouse de construção, o projeto alia conhecimento global à produção local utilizando prototipagem em escala real de um primeiro modelo, usinado e montado por estudantes da graduação, a fim de testar a qualidade do sistema e sua viabilidade técnica de implementação como tecnologia social.

Em **Proto-tectonic Weaving System: Computational Design Workflow for Semi-permeable Self-Supporting Enclosures**, Roberto Naboni e Luca Breseghello apresentam um trabalho baseado em metodologia computacional e comportamento de materiais em sistemas construtivos milenares como sistemas de cestos trançados, para a construção de um sistema arquitetônico experimental, o Weaving Enclosure. São exploradas características performativas e tectônicas de sistemas trançados em madeira por meio de projeto paramétrico e simulação de geometrias em acordo com o comportamento flexível do material.

Computational Design and Simulation of Bending-Active Auxetic Structures, artigo de Roberto Naboni, em co-autoria com Lorenzo Mirante, investiga a potencial aplicação de estruturas auxéticas - que quando tracionadas expandem-se transversalmente e quando comprimidas contraem-se transversalmente - na arquitetura. O trabalho apresenta diversos arranjos que combinam métodos de desenho computacional e Manufatura Aditiva (MA) para informar um processo de form-finding de estruturas de cascas nervuradas sinclásticas de flexão-ativa e, finalmente, propor um protótipo de casca nervurada em tamanho real com manufatura aditiva in situ.

Por último, o artigo **O desenvolvimento de elementos de proteção de fachada responsivos – exploração e controle de um processo** apresenta um processo de pesquisa e projeto de elementos de proteção de fachada, por meio da integração entre processos paramétricos, geometria e computação física. Após demonstrar as diferentes etapas da pesquisa que envolveram a coleta de dados sobre o uso do Cobogó na cidade do Recife, o trabalho apresenta o desenvolvimento de um conceito geométrico e a elaboração dos diferentes protótipos físicos e digitais para uma proteção responsiva de fachada.

Desejamos uma ótima leitura e vida longa a esta parceria.

David M. Sperling

Underléa Bruscato

Editores e Membros do Comitê Executivo Internacional da SIGraDi

Editorial Volume 11 Number 2 2016

The Design Management and Technology Journal, in this issue dedicated to “Research on Digital Fabrication in Architectural Design”, initiates a partnership with Iberoamerican Society of Digital Graphics (SIGraDi), which completes 20 years of existence in 2016. The SIGraDi integrates a network of similar organizations in Europe (eCAADe), North America (ACADIA), Asia and Oceania (CAADRIA) and West Asia and North Africa (ASCAAD) which, through its scientific meetings and publications, brings together researchers from architecture and urban planning, design and art related to reflection and application of digital media.

With this partnership, we intend to publish a number of the journal per year with articles resulting from the review and significant expansion of papers presented at the congress of SIGraDi in the respectively previous year. Under a relevant topic for the field of design technologies, pre-selected works and their authors will be invited to submit new articles to the blind evaluation process by peer review. We believe this partnership will enable synergy between the Journal and this scientific society, both interested in the dissemination of relevant research in their areas, which have significant intersection.

So, nothing better than to bring to light one of the latest issues in the relationship between built environment design and computing, which has been showing a high degree of impact on design processes and construction: the “Digital Fabrication”. The increasing expansion of access to numerically controlled production processes is allowing, on the one hand, the manufacture of complex shapes and, on the other, mass customization and production of small series. These issues have put on display a range of new possibilities for research. In the same way the creation of digital fabrication and rapid prototyping laboratories in schools of architecture and engineering around the world since the 1990s (in Latin America since the 2000s, with a recent peak between the years 2010 and 2013), and connections of architecture and engineering offices with automated production industries, point transformations already underway.

It is in this broader context that this number is inserted, bringing articles that articulate research on digital fabrication with a variety of applications: building renovation and customization of construction, open design and social housing, interaction between craft and digital methods for building complex shapes, application of gridshells produced by additive manufacture, development of responsive systems for solar protection of façades. After the pre-selection of 19 works, invitation to their respective authors from 09 different countries (Argentina, Brazil, Bolivia, Chile, Spain, France, Italy, Portugal and the United States), and the blind peer review process, were approved the 05 articles presented in this issue.

At the opening, the article Cork Re-Wall - Computational Methods of Automatic Generation and Digital Fabrication of Cork Partition Walls for Building Renovation, written by Filipe Brandão, Alexandra Palo, José Pedro Souza and Vasco Rato, exposes an computational method integrated to a digital fabrication process to generate high quality custom solutions using natural and renewable materials for projects aimed at rehabilitation of buildings constructed with traditional techniques.

The article by Andrés Passaro and Clarice Rohde, House Magazine: open source architecture, describes an open source construction process that uses digital fabrication in the production of low-cost housing. Based on WikiHouse building system, the project combines global knowledge to local production using full-scale prototyping of a first model, machined and assembled by the graduate students in order to test the quality of the system and its technical feasibility of implementing as social technology.

In Proto-tectonic Weaving System: Computational Design Workflow for Semi-permeable Self-Supporting Enclosures Roberto Naboni and Luca Breseghello present a work based on computational methods and behavior of materials in ancient construction systems such as woven baskets, for the construction of an experimental architectural system, the Weaving Enclosure. Performative and tectonic characteristics of twisted wood systems are explored through parametric design and geometry simulation in accordance with the flexible behavior of the material.

Computational Design and Simulation of Bending-Active Auxetic Structures, article by Roberto Naboni, coauthored with Lorenzo Mirante, investigates the potential application of auxetic structures - that when tensioned expand transversely and when compressed constrict transversely - in architecture. The work presents several arrangements that combine computational design methods and Additive Manufacturing (AM) to inform a form-finding process of bending-active synclastic gridshells, and finally propose a prototype of full size gridshell with additive manufacturing in situ.

Finally, the article Development of a responsive system for building façade protection – exploring and controlling a process presents a research and design process of façade protective elements, through the integration of parametric processes, geometry and physical computing. After demonstrating the different stages of this research involving the collection of data on the use of “Cobogó” in Recife, the paper presents the development of a geometric concept and the elaboration of different physical and digital prototypes for a responsive protection façade.

We wish you a good reading and long life to this partnership.

David M. Sperling

Underléa Bruscato

Editors and Members of the International Executive Committee of SIGraDi

CORK RE-WALL: MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE GERAÇÃO AUTOMÁTICA E FABRICAÇÃO DIGITAL DE PAREDES EM CORTIÇA PARA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

CORK RE-WALL: Computational Methods of Automatic Generation and Digital Fabrication of Cork Partition Walls for Building Renovation

Filipe Jorge da Silva Brandão, Alexandra Paio¹, José Pedro Sousa², Vasco Rato³

RESUMO: Recentes desenvolvimentos nos métodos computacionais e a sua integração com processos de fabricação digital permitem perspectivar um paradigma de fabricação personalizada. O referido paradigma é particularmente adequado à realidade da reabilitação de edifícios construídos com técnicas tradicionais, um corpo diversificado em que as intervenções são por natureza cirúrgicas e singulares, e em que os tabiques desempenham um papel importante na intervenção. O aglomerado negro de cortiça e o OSB (Oriented Strand Board), materiais naturais e renováveis, podem ter um papel central num sistema material que responda a este contexto. Cork re-Wall é um sistema construtivo parametricamente modelado, constituído por estrutura de madeira e placas compostas, de aglomerado negro de cortiça e contraplacado, e um processo digital file-to-factory que permite gerar soluções personalizadas de alta qualidade para contextos de projecto diversos.

PALAVRAS-CHAVE: Cortiça; Estrutura de Madeira; Fabricação Digital; Reabilitação; Desenho Paramétrico.

ABSTRACT: Developments in computational design methods and their integration with digital fabrication processes enable us to envisage a customized fabrication paradigm. This paradigm is particularly suited to renovation of old buildings built with traditional construction techniques, a diversified corpus in which interventions are surgical and unique, and where partition walls play an important role. Insulation Cork Board and OSB, natural and renewable materials, can have an important role in a material system that responds to this context. Cork re-Wall is a parametrically modelled construction system and a file-to-factory digital process to generate high quality custom solutions to respond to diverse renovation design challenges.

KEYWORDS: Cork; Wood Frame; Digital Fabrication; Renovation, Parametric Design.

¹ Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL) and Vitruvius FABLAB/ISTAR-IUL

² University of Porto, Faculty of Architecture + DFL/CEAU

³ Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL) and Vitruvius FABLAB/ISTAR-IUL

Fonte de financiamento:

-

Conflito de interesse:

Declara não haver

Submetido em: 22/04/2016

Aceito em: 25/10/2016

How to cite this article:

BRANDÃO, F. J. S.; PAIO, A.; SOUSA, J. P.; RATO, V. . Cork Re-Wall: Computational Methods of Automatic Generation and Digital Fabrication of Cork Partition Walls for Building Renovation. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 9-23 jul-set. 2016.



INTRODUCTION

The construction of new buildings in Portugal has dramatically shrunk in the last few years, while the renovation of old buildings within historic city centers gained traction, after decades of neglect. This renewed interest was fostered mainly by changes in legislation, municipal investment in public spaces, a general drop in property prices and increased private investment driven by tourism. In 2001, INE (National Statistics Institute) estimated that over 50% of the buildings in Lisbon and Porto were in need of renovation in varying degrees. A significant part of these old buildings are concentrated on historic quarters and range from the 18th to the beginning of the 20th century (Freitas 2012). They are built of stone masonry façades and party walls, wood beam floors, wood trusses and wood frame partition walls. Both the stone and wood partition walls were gypsum plastered, while often the main façade would be covered with ceramic tiles. A set of circumstances concurred to make these buildings live throughout the last century with little or no alteration. This typology, the Porto bourgeois house, proved to be resilient to change and able to accommodate different functions from what it was originally built for. In renovation interventions, the main focus is the reorganization of the interior. Façades, wood floors and roofs are either repaired or kept in the original condition.

The increased demand for renovated buildings in the city center is frequently met with interventions using modern construction techniques and materials, which are often strange to the original construction logic of the building. This happens both because wood frame partition wall is not competitive and traditional techniques have either become too expensive or craftsmen are no longer available. A definite need exists for approaches that better integrate the specific requirements of renovation projects with mass production. Nonetheless, building renovation design and construction are piecemeal by nature and as such not prone to standardized construction methods.

Developments in computational design methods and their integration with digital fabrication processes allow us to think of a customized construction paradigm (Naboni & Paoletti 2015). This new process strategy is especially suited to the renovation of buildings built with traditional construction techniques, a diversified corpus in which the interventions are surgical and non-standard. Insulation Cork Board (ICB) is a natural and renewable material which maintains most of the characteristics of raw cork: lightness, buoyancy, viscoelasticity, and improves some like low heat and sound conductivity and acts as a fire retardant (Gil 1998; Fortes et al. 2003; Pereira 2007). Moreover, as a result of its production process, which originates big size blocks, it's better suited to architectural applications and, as Sousa (2010) demonstrates, appropriate for customization processes with CNC technologies (Figure 1). Wood derivatives like OSB (Oriented Strand Board) and plywood are also natural and renewable materials, which in turn have complementary mechanical properties to ICB, namely, higher mechanical strength. In this context, we foresee that a file-to-factory digital process (Varela et al. 2014) will have several advantages: higher quality and speed, without sacrificing scope or increasing cost (Kieran & Timberlake 2003).

The goal of this work is to develop a partition wall system based on cork material and wood derivatives, which can be customizable through an integrated digital design and fabrication process. Named as Cork re-Wall, the system aims at targeting the building renovation industry. The parametric partition wall must address the need of a process to integrate infrastructural and constructive systems with design, fabrication and assembly. It must also be a more symbiotic¹ and sustainable solution to renovation than current methods, improving also on the ease and quickness of the assembly process.

¹Symbiotic is, in the context of this work, understood as a solution that is more compatible with pre-existing construction methods and materials, i.e., its mechanical properties, in particular the deformation in the presence of humidity or change of temperature.



Figure 1 : CNC milled insulation cork boards. © 2014 Filipe Brandão

This paper is divided into three sections. First, the context of this investigation is outlined. Then the objectives and the methodology are defined. Lastly, the two first development cycles are briefly described and the last one is explained in more detail.

Renovation

In this work, renovation is understood as a set of interventions on built heritage pursued with the aim of improving its safety, comfort and usefulness which nonetheless respect its architecture, typology and constructive system.

The partition wall that was devised aims to reinstate the use of traditional materials in the renovation of old buildings, implementing generative design and digital fabrication to overcome the loss of traditional building techniques and craftsmen. This solution doesn't preclude the adoption of an adequate design practice to the context at hand, which correctly evaluates the structural and spatial viability of the building and weights the need to intervene according to the same principles of sustainability that underpin the development of this solution.

Traditional partition wall construction systems were briefly studied in order to understand their benefits and shortcomings, both in terms of building process and performance. Several wood frame partition wall types coexist, yet the most common in the North of Portugal is tabique simples – a wood frame partition wall reinforced with wood boards that form a surface for laths and plaster (Figure 2). It's clear that they are not viable as contemporary construction process mostly because of the amount of manual labor spent on on-site assembly, lack of wall cavities for infrastructure and bad acoustic insulation. On the other hand, these traditional construction systems have some advantages: they use natural and renewable materials; the walls have some structural resistance which helps to reduce the deflections on the existing wooden floors.



Figure 2 : Tabique simples -traditional wood frame partition walls (1 to 3) © 2014 Filipe Brandão

Cork

Cork is the oak tree bark, extracted every 9-12 years from a tree that is at least 30 years old and a life expectancy of 200 years. The first two extractions don't produce first quality cork used for cork stoppers, they are instead used for granulates and aggregates like ICB. Yet the main raw material of ICB are granulates of the bark, extracted from pruned branches of the oak tree -falca. The extraction of cork from the oak tree doesn't kill it; it is precisely this exploration that is responsible for the maintenance of high conservation value cork oak "Montado" forest (Bugalho et al. 2011). The oak tree is native of the Iberian Peninsula and the western part of the Mediterranean basin, and it is extremely well adapted to these semi-arid regions that favor biodiversity and act against desertification. These forests depend on human management in order for this habitat to be maintained and cork production is the main economic incentive.

ICB is the outcome of a natural agglomeration process of cork granulates when subject to steam heated to temperature of 300-370°C, and a pressure of 30-60kPa, inside an autoclave. There are no additives to the process and the binding agent is suberin, the natural resin of cork, which is contained inside the cork cells and is released during the heating process. Furthermore, this industrial process is powered by the incineration of the byproducts of cork granulation, and it produces blocks of 1000x500x320mm that are then cut into 1000x500 boards with varying widths. It's mainly used as thermal and acoustic insulation in building roofs, walls or floors but also as vibration isolation for machinery and as thermal expansion joints in buildings. The latter uses take advantage of one of the most unique properties of cork, its very low Poisson Ratio which prevents this material from expanding laterally when compressed. Heat processing of cork improves its thermal and acoustic behavior but on the other hand worsens some mechanical properties like Young's Modulus, i.e., its tensile or compressive strength. It maintains its insulating properties in a wider temperature range than other insulation materials, it doesn't release toxic substances under fire and acts as a fire retardant (Silva et al. 2008), and it has a higher thermal lag than other insulation materials (Simões et al. n.d.). Research has been conducted with the aim of improving ICB mechanical properties through a densification process (Gil 1996) or by combining ICB with plywood to create a composite panel (Lakreb et al. 2015). Other paths of investigation and application have risen from other properties of cork, such as its durability and resilience to

sun exposure, its texture and odor. These properties set it aside from other types of insulation materials and made way for architectural solutions such as Portugal's Pavilion in Hannover, designed by Alvaro Siza, and Sousa's (2010) investigation on the use of CNC technologies for customization of form, texture and size of cork boards.

Digital Processes

Digital tools are increasingly becoming a common part of the design process (Clayton 1995). The evolution and proliferation of parametric or algorithmic design software and the increasing use of generative design processes in architecture are concurring to ease of access to digital production (Naboni & Paoletti 2015). On the other hand, programming as a tool and skill is increasingly democratized, as a result of more accessible programming languages (Blikstein 2013). Furthermore, digital fabrication tools like CNC routers are nowadays very common in industrial context, e.g. wood carpentry workshops. Even though these machines frequently lack closed loop control, the industry is currently better prepared to implement and evaluate these systems. There are a number of attempts to create a full digital pipeline from the client to the finished building, such as Duarte's (2005) discursive grammar for Malagueira or the Wood Frame Grammar and Instant House (Sass 2005; Sass 2006; Botha & Sass 2006; Cardoso & Sass 2008). These examples are incomplete systems as they approach only a part of the whole problem. Duarte's discursive grammar doesn't address the construction of the generated solutions and Sass's wood frame grammar doesn't consider finishing and thermal or acoustic performance related issues.

HYPOTHESIS

Cork Re-Wall parametric partition wall was developed to be deployed in building renovation. The offer of ICB products that meet the specific requirements of building renovation is already significant. Yet ICB use for partition walls is very scarce mainly because of its cost compared to other insulation materials. This work aims to explore the use of ICB in partition walls rethinking the traditional partition wall found in historic buildings.

Renovation has a specific set of needs that differ from new building construction. Foremost, renovation acts upon built heritage, which is sought to preserve in varying degrees. The construction process usually begins with an intervention on the roof and progresses inward. Moreover, these buildings are located in slender plots, in neighborhoods with scanty streets. Lastly, existing wooden beam floors aren't capable of withstanding heavy partition ceramic brick masonry walls and dry building processes are more adequate. These conditions limit the dimensions of materials arriving on site, the way the building process is carried out and the type of materials used.

Two sets of problems were identified on the analysis of selected case studies of building renovation in Porto: Issues arising from the need to adapt existing typologies to contemporary living standards, stemming from client wishes or imposed by current building codes; common building pathologies of old buildings or pathologies caused by lack of maintenance or inappropriate interventions. The first set of problems is associated with changes in use, subdivision of buildings into smaller independent units or the need to move the existing bathrooms from the backyard façade to the interior of the building. These needs bring about several problems, most notably problems of ventilation and acoustic insulation. The second set of problems can arise from lack of maintenance but can also stem from interventions with incompatible building techniques, heavier and mostly adapted to new buildings. These interventions can cause deformations on floors or overloading of stone masonry party walls or façades.

Requirements

The best practices of renovation of these old buildings have adopted light steel frame (LSF) partition walls. These are light and cost effective solutions that address most of the identified problems, but have high EE (Embedded Energy) and EC (Embedded Carbon) associated to steel foundry and forming. Embedded Carbon is merely indicative and highly related with the embedded energy due to the industrial energy mix, still largely dependent on fossil fuels. In this way, it can be considered a proxy for production efficiency and harmful emissions.

From the analysis of renovation case studies and traditional partition wall systems, but also taking into account LSF partition wall advantages, a group of requirements was derived:

- Variable wall thickness adjustable
- Adequate airborne sound insulation
- Dampening impact sound transmission
- Flexibility in finishing
- Quick and easy assembly
- Lightness
- Dry construction
- In-wall cavities for utilities
- Reusable and renewable materials
- Cost effective

ICB easily meets most of these requirements. It's a renewable and reusable material, obtained without damaging the tree. It is carbon neutral and its extraction increases the production of cork by 250-400% (Gil 2014) thus increasing CO2 sequestration. It also has a high level of Carbon content (Gil et al. 2011) and a long life span (Gil & Silva 2011). Wood shares some of these advantages if it's obtained from responsibly managed forests and, more importantly, is a material that it's already present in these buildings. Wood derivatives, like plywood or OSB, are less environmentally friendly mainly due to the industrial processes and the binders used. They are nonetheless less impactful than galvanized steel (Table 3). Lastly, access to CNC processing for wood is far more widespread and cheaper than for steel.

METHODOLOGY

Three projects of building renovation by Parqur² office were selected as case studies. They differ in building typology yet represent the most common types, in design process and in the extent of preservation of the original construction but are all located in the city of Porto.

Table 3: Material properties and Cradle to Gate EC / EE values obtained from the Inventory of Carbon and Energy (Hammond & Jones 2006)

² www.parqur.com

Materials	Density (Kg/m ³)	EEu (MJ/Kg)	ECu (KgCO ₂ e/Kg)	Thickness (m)	EEs (MJ/m ²)	ECs (KgCO ₂ /m ²)	EE (MJ/m)	EC (KgCO ₂ /m)
Plasterboard	800	6,8	0,39	0,015	81,00	4,680		
M90 Galvanized Steel profile	7800	27,1	2,03	0,0006			22,131	1,658
M70 Galvanized Steel profile	7800	27,1	2,03	0,0006			19,785	1,482
M46 Galvanized Steel profile	7800	27,1	2,03	0,0006			16,741	1,254
Mineral wool	70	16,6	1,28	0,060	69,72	5,376		
ICB	140	4,0	0,19	0,060	33,60	1,596		
OSB	640	15,0	0,99	0,015	144,00	9,504	17,280	1,140
Plywood	640	15,0	1,10	0,012	115,20	8,448		

The investigation was divided into three areas: Design, Materials and Production. In Design, the subdivision grammars and rules were defined and tested for its adequacy to the context of the design problem. The ultimate goal was to develop a parametric model of the construction system that allows its customization and digital production. In Materials, the investigation focused on material properties, detailing of the wall and adequacy of the chosen materials to the context. Moreover, the assembly process was also conceived. Finally, in Production, proposed solutions were prototyped to verify how the selected fabrication process – a 3 axis CNC router - interacts with the materials, as well as to test the envisioned assembly process. These three areas are intricately connected yet it isn't possible to map the complexity of relations between them. Hence a top-down design process was adopted to develop the Cork re-Wall parametric partition wall. To overcome the risk of prioritizing preliminary design decisions, conditioning material and fabrication solutions, three cycles of design to production were performed.

On the first cycle, three different solutions were designed and prototyped. After a round of evaluation by industry partners and the investigation group, a type of wall structural solution was chosen and redesigned. A similar process of design to production and evaluation was followed on the second and third cycles. The 3-D point cloud scanning was initially considered for acquiring accurate digital models of the buildings, thus creating a full digital pipeline. Eventually it was dropped because it would condition the application of the wall to what is still a relatively new and expensive technology. Instead we decided to address the joints of the wall with the existing building elements at a material level, using a compressible cork layer to absorb levelling differences on floors and walls.

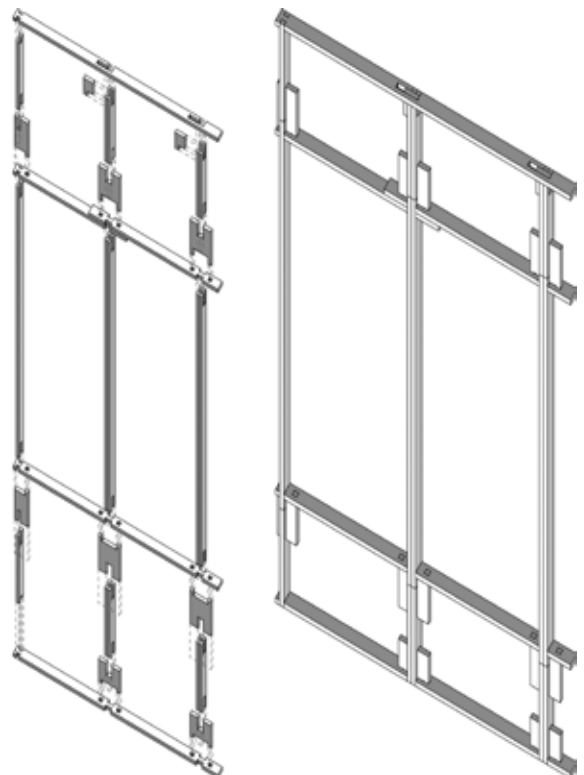
RESULTS

On the first cycle, a subdivision grammar, that follows up on Sass's Wood Frame Grammar (Sass 2005)(WFG), was used as a starting point to troubleshoot the nature of corner conditions³, wall ends and walls panels. Three different solutions for wall panels were designed, detailed and prototyped: wood frame – cork infill panels; sandwich panels with cork infill and plasterboard/OSB sheet layers; sandwich honeycomb cork infill panels with plasterboard/OSB sheet layers. It was determined that ICB could not be used effectively for structural purposes and that it doesn't withstand small details, both due to the production process and the cohesion of the aggregate. The wood frame solution proved to be the best of the three, both in terms of cost and fulfillment of the previously stated objectives. Assembly of the two sandwich cork solutions relied on a dovetail detail on the cork layer that proved difficult to assemble. Furthermore a wood frame is far more structurally efficient than a cork core, even though cork has a better behavior to fire. Despite of that, covering the structure with a cork layer will improve the structural stability of the wall when exposed to fire.

On the second cycle, the wood frame solution was revised, both in terms of the detailing of the joints and the assembly process (Figure 4).

³ Corner conditions is an expression used by Sass (2006) to refer to the geometry of the corner joints and type of structural stresses that are concentrated on this point.

Figure 4: Structure parts and assembly sequence

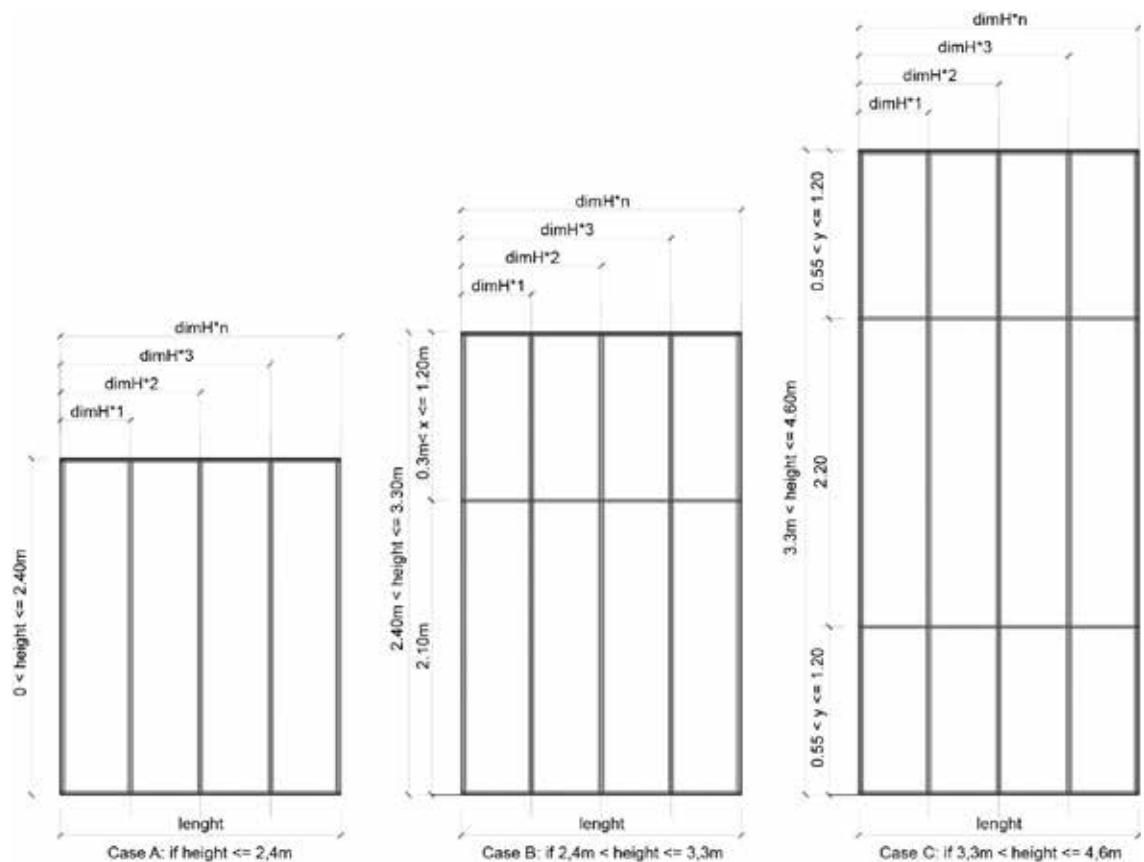


Solutions for wall ends and corner were designed. A three layer infill composite panel of OSB, ICB and plywood was introduced to improve the in-plane behavior of the wall and reduce its thickness. The studs were also reduced to meet the previous objective. The first parametric models were tried out in a dynamic parametric modeling environment. Several algorithms were devolved in C# to subdivide walls into structure and panels according to the design rules of the partition wall (Figure 5). The wood frame structure and the infill composite panels were prototyped and assembled. It was concluded that several modifications were needed: increasing the thickness of the structure, reducing the number of layers of the panel to only two to reduce cost and improve the assembly process.

Design

Cork Re-Wall parametric wall is composed of a wood frame structure cut out of OSB panels and composite panels of ICB and plywood. The composite panels perform both the finishing and bracing functions of the wall structure. The finish can be either ICB, plywood or a customizable pattern of cork and plywood (Figure 7). The design and dimensioning of the wall components was conditioned by the standard dimensions of ICB boards (1000x500mm). The on-center distances of the studs are half the length of the panels and the paneling of the structure is done in a stretcher like pattern. Standard dimensions of OSB panels have also conditioned the length of the studs and blocking. The wall can be configured to any dimension, yet the maximum height of the wall was set to 4,60m. The vertical subdivision of the studs is necessary, both for structural reinforcement and to accommodate the maximum length of standard OSB panels. Three cases of vertical subdivision were defined to strike a balance between cost and structural efficiency (Figure 5).

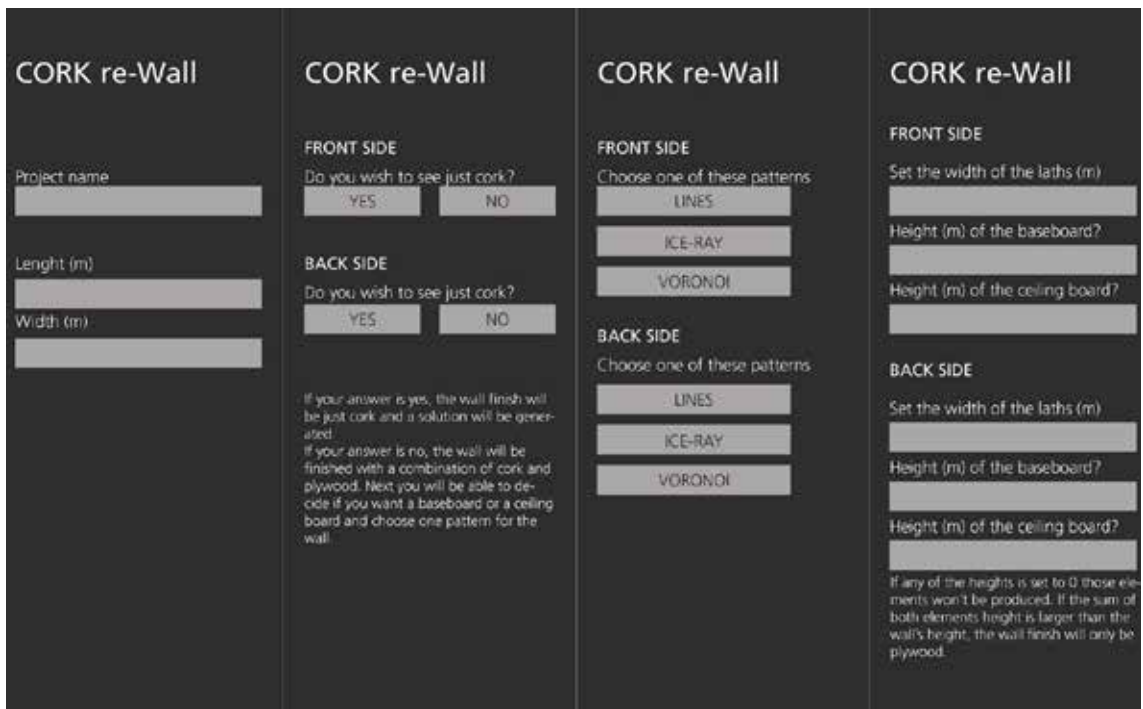
Figure 5: Design rules for wall subdivision into structural members



Double vertical studs, simple wall studs, ceiling and sole plates are common to all cases, with blockings being added as the height increases. The parametric model was developed with two purposes in mind: to simulate the system behavior and optimize it, as well as to provide an interface for design customization and digital fabrication by an end user, the client or an architect. It is both a design and an evaluation system. For this reason the parametric model produces accurate 3D geometry that can be used for visual inspection, for simulation purposes and to extract 2D paths for production.

The model was conceived as an interactive program that poses a sequence of questions to the user (Figure 6): what is the length and height of the wall, what is the desired finishing, whether there are baseboards or coving and lastly, the selection and customization of the pattern. The provision of customizable height baseboards and coving is an important aspect of the adaptation to the context of old buildings, where the size of these existing elements can vary widely. Besides this aesthetic function, coving can also be used to absorb the height of suspended ceilings that would otherwise conceal part of the customizable pattern. Different finishes can be selected for both sides of the wall but if the user chooses to have cork or plywood as finishing, a composite panel solution that is optimized for cost and structural efficiency is generated. A choice of three patterns that can be customized is provided. Those are a line pattern, an Ice-Ray lattice pattern and a Voronoi pattern. The line pattern emerged from the traditional use of laths to reinforce plaster finishes (Figure 2) and from the recent reinterpretation of the laths as a finishing in some renovation projects. The laths also provided a solution to reinforce the otherwise weak bending strength of ICB boards. The decision to provide a choice of patterns was grounded in two reasons: the traditional use of tiling as a finishing with a huge variety of patterns; a search for patterns with better structural performance than the line pattern. The line pattern consists of a sequence of horizontal laths whose width and number can be controlled within a set range. Ice-ray pattern is a latticework generated by an algorithm that allows the control of thickness and maximum angle of the laths. The possibility to enter a number is also provided. The Voronoi pattern shares the same options of the later pattern but without the angle control.

Figure 6: Program interface sequence



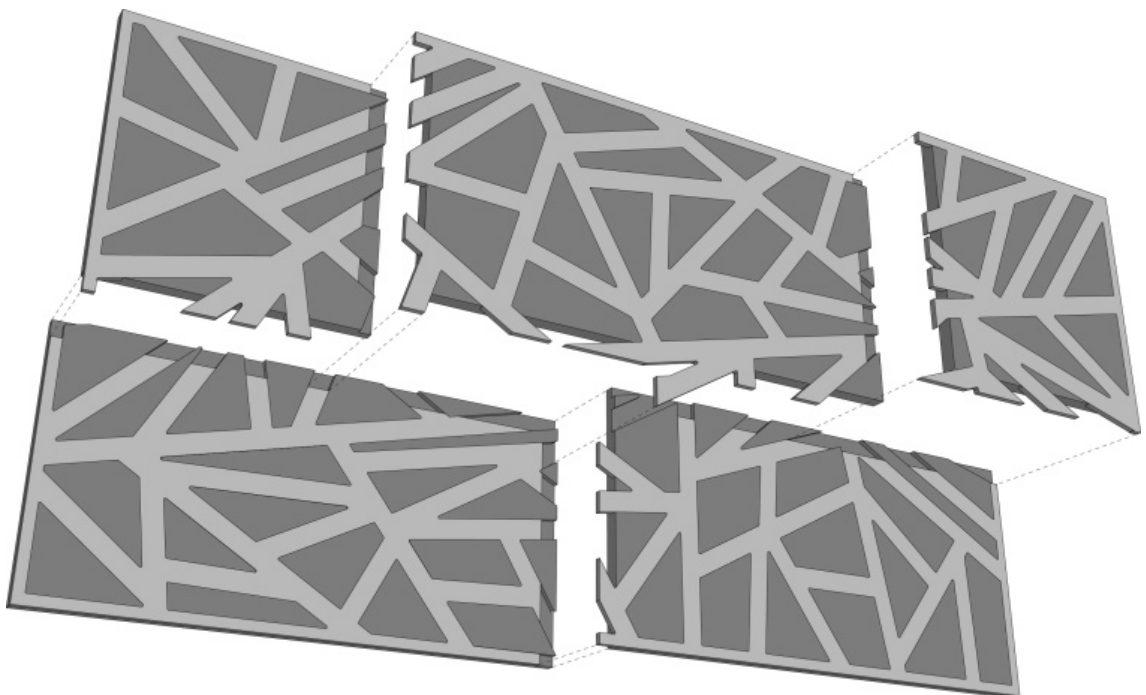
When the wall is configured the program generates 2D line drawings of the structural elements organized in standard OSB panels, and 2D paths for ICB milling and plywood cutting. These drawings can be sent to production for cutting and assembly. It also generates spreadsheets with material quantities and a cost estimate. The program was outlined in a dynamic parametric environment as a proof of concept but it can be transformed into a website or an application that is directly linked with a manufacturer that produces and delivers the parts to the customer. These can be either assembled by the client or by a team.

Materials

The structure members are cut out of a standard OSB 15mm panel with a CNC router. The connections are friction fit and the assembly is performed manually with a rubber mallet. This process bears several similarities with Sass's Wood Frame Grammar (2005), however its novelty lies in the design of the joints, the dimensioning of the members and the use of several materials to address different performance needs of the wall. The nature of existing floors, ceilings and walls of refurbished buildings lies outside the control of this process, so friction fit joints between the wall and the supports aren't possible. Instead, ceiling and sole plates with a 20 mm ICB layer are fastened with screws to the ceiling and floor slabs. The same detail is used to connect end studs to supporting walls. The use of cork layers between the wall structure and support serves three purposes: to dampen percussion sound, to absorb vertical loads that might be transmitted by the deflection of the ceiling slabs, to absorb construction planarity deficiencies in the supports. The structure parts are numbered and the assembly process proceeds from the floor up and from one side to the other.

The composite panels are made of 30mm ICB boards from which the 12mm plywood patterns are milled (Figure 7). The plywood patterns are cut from 12mm standard panels into 1000x500mm sized shapes, are glued to ICB boards with PVA glues in the workshop and transported on-site to be fastened to the structure. To provide a joint between panels and improve the wall's structural performance, plywood patterns are displaced by 35mm both vertically and horizontally in relation to the ICB boards.

Figure 7: Composite panels and assembly sequence





This provides an overlap of the next composite panel plywood with the previous composite panel's cork. This overlapping area is coincident with the double studs, allowing for both panels to fasten to the structure. The assembly sequence of the panels is the same as the structure.

A wall was generated for each of the three case studies, replacing new walls that each of the architecture projects foresees (Figure 8). The process of solution generation was evaluated for its fitness to the goals set by the project architects and for its adequacy in replacing the solutions defined in working drawings. 3D renderings were also produced to allow for visual evaluation.

A comparison between a typical Cork Re-Wall partition and several LSF partition walls was performed (Table 9) in order to understand if the partition wall design maintained the relative EC and EE advantages its materials display (Table 3). A wall with 3,3m high and 6m in length was selected as a case study. Four different solutions for LSF partitions were considered: the first with 46mm studs and double sheets of plasterboard, two with 70mm studs, single or double sheets and the last with 90mm studs with one sheet of plasterboard. The EE and EC material typical values are Cradle to Gate and thus do not include cold lamination of galvanized steel coil into profiles and all the materials and energy spent in the assembly of LSF partitions,

Figure 8: Rendering of a room, divided with a generated wall containing a line pattern and baseboard. © 2015 Filipe Brandão

Table 9: Global weighted values per sqm of wall

	U [W/m ² .°C]	m_{TSU} [J/m ² .°C)x 10 ³	EEs [MJ/m ²]	ECs [KgCo ₂ e/m ²]
Cork re-Wall	0,59	13	153	10
LSF 96/600 (46)	0,74	18	354	22
LSF 100/400 (70)	0,77	12	306	20
LSF120/400 (70)	0,67	19	414	26
LSF 120/600 (90)	0,64	12	286	19

with the exception of mineral wool and plasterboards. The same is true for Cork Re-Wall parametric partition which EE and EC values don't include the processing of plywood, OSB and ICB standard boards.

Cork Re-Wall global weighted Embodied Energy per square meter was 87% to 131% smaller than LSF walls, and EC values were 90% to 160% smaller.

Production

Several cycles of digital fabrication were performed to test the assembly process of the structure and the composite panels. This section presents the design, fabrication and assembly of two walls for the CEAAD course final exhibition (Figure 10).

The designated area for the stand was 2,16 m in length, 1m wide and 2,05 m high. An L-shaped wall was built with the long side against an existing wall, as there was no ceiling to connect the walls to, and it wasn't possible to fasten anything to the only existing wall. A wooden plinth was constructed to provide a base to fasten the walls to.

The parametric model only generates single walls so far, so two independent walls were generated with the required length and thickness, the shortest wall with a structure thickness of 100mm and the other with 70mm. A bigger height than needed was used to generate the walls in order to show and test the complete set of connections of the wall. Generating a wall with the exact height required would have produced a structure with studs, sole and ceiling plates only. The geometry was then exported to a CAD modeling environment for scaling.

Table 10: CEAAD final exhibition stand © 2015 Filipe Brandão



A new corner connection was designed to join the two walls, which is not yet implemented in the parametric model. Composite panels were produced for both sides of the shortest wall, with different patterns on each side, and a 1m high and 2m long panel for the longest wall, in order to reveal part of the structure. The exact final dimensions were used to generate the composite panels which were then exported as 2D files ready for production. The production took place at Vitruvius FABLAB-IUL, on a CNC 3-axis milling machine.

CONCLUSIONS

This paper showed that usage of Cork Re-Wall partition wall is an effective and environmental efficient solution to building renovation. It can be reused and it is built with renewable and reusable materials that contain lower levels of embedded energy and carbon. The parametric model facilitates the modelling process required by specific renovation contexts, in terms of design and dimensioning, reducing waste, assembly complexity and time. The composite panels provide structural performance improvement while its detail reduces sound transmission by introducing a layer of ICB between the plywood pattern and the structural members. The proposed digital process can circumvent the loss of workmanship and provide customized solutions without increasing design or production cost. Moreover, the parametric system provides the client the opportunity to have a direct role in designing the solution, with both visual and quantitative feedback.

Nonetheless, not all patterns are equally economical in terms of the use of plywood. A line pattern is far more economical than an Ice-Ray or Voronoi pattern. Further work is needed to improve on the use of plywood and also to implement solutions for a wider range of wall shapes. It is also necessary to expand the life cycle analysis of the system to include the CNC fabrication stage.

The current implementation of Cork Re-Wall only addresses a simple wall with no intersections or doors. Future work needs to implement more complex configurations, like horizontal L-shaped, T-shaped and cross intersections of walls. Another aspect that must be object of further development is the user design interface. Even though the proposed interface is adequate for the current solution, it is not obvious how it would be implemented for the previously mentioned more complex configurations.

Even though the proposed construction system is easily assembled without prior construction experience, knowledge of the steps involved to assemble it is still required. Generating automatic assembly instructions for Cork Re-Wall is another path of future work.

The Cork Re-Wall design-based research demonstrates the advantages of a close relationship between the construction industry and the academia. Working in close collaboration with the industry provided a profound knowledge about the material properties and stimulated a regular discussion on the commercial, industrial and practical application features of the system.

ACKNOWLEDGMENTS

We thank the material support provided by AMORIM ISOLAMENTOS SA., and the scientific and technological support of the VITRUVIUS FABLAB-IUL, at the Lisbon University Institute (ISCTE-IUL), and the Digital Fabrication Lab (DFL) at the Faculty of Architecture, University of Porto. This research was developed during the Advanced Studies Course in Digital Architecture (CEAAD) a joint initiative between ISCTE-IUL and FAUP.

REFERENCES

- Blikstein, P., 2013. **Digital fabrication and “making” in education: The democratization of invention.** FabLabs: Of Machines, Makers and Inventors. Available at: http://www.academia.edu/download/30555959/Blikstein-2013-Making_The_Democratization_of_Invention.pdf [Accessed December 30, 2014].
- Botha, M. & Sass, L., 2006. **The Instant House: Design and digital fabrication of housing for developing environments.** In Proceedings of the 11th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, 209-216. CAADRIA. Kumamoto, Japan: School of Architecture and Civil Engineering; Kumamoto University, Available at: http://www.caadria.org/man/caadria2006_209.content.pdf [Accessed December 15, 2014].
- Bugalho, M.N. et al., 2011. **Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services.** *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(5), pp.278-286.
- Cardoso, D. & Sass, L., 2008. **Generative Fabrication.** *Design Computing and Cognition'08*, pp.713-732. Available at: http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4020-8728-8_37.pdf [Accessed December 30, 2014].
- Clayton, M., 1995. **Connecting Digital Tools.** In *cumincad.architecturez.net*. p. 1988. Available at: http://cumincad.architecturez.net/system/files/pdf/acadia03_039.content.pdf [Accessed January 14, 2015].
- Duarte, J.P., 2005. **A discursive grammar for customizing mass housing: The case of Siza's houses at Malagueira.** *Automation in Construction*, 14(2 SPEC. ISS.), pp.265-275. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580504000810> [Accessed January 2, 2015].
- Fortes, M.A., Rosa, M.E. & Pereira, H. eds., 2003. *A Cortiça*, Lisbon: IST Press.
- Freitas, V.P. de, 2012. **Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos** V. P. de Freitas, ed. , p.300, [2] p.-300, [2] p. SO - Edição com apoio da.
- Gil, L., 2014. **Cork: a strategic material.** *Frontiers in chemistry*, 2(April), p.16. Available at: <http://www.pubmed-central.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3990040&tool=pmcentrez&render-type=abstract>.
- Gil, L., 1998. *Cortiça. Produção, Tecnologia e Aplicação.*
- Gil, L., Marreiros, N. & Silva, P., 2011. *Insulation corkboard carbon content and CO₂ equivalent.* , 23, pp.42-43.
- Gil, L. & Silva, P., 2011. *Thermal Behaviour of ICB obtained from Demolitions.* In *WASTES : Solutions, Treatments and Opportunities.* Guimarães.
- Gil, L.M.C.C., 1996. *Densification of black agglomerate cork boards and study of densified agglomerates.* *Wood Science and Technology*, 30(3).
- Hammond, P.G. & Jones, C., 2006. *Inventory of Carbon & Energy (ICE).* *Mechanical Engineering*, pp.1-49. Available at: <http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/>.
- Kieran, S. & Timberlake, J., 2003. *Refabricating architecture.* New York: McGraw-Hill. Available at: http://www.magisterarq.cl/fileadmin/docs/trayectoria_trabajos/Arquitectura_e_industria/61_Refabricating_Processes_MACARENABURDILES.pdf [Accessed December 15, 2014].
- Lakreb, N., Bezzazi, B. & Pereira, H., 2015. *Mechanical strength properties of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerates.* *European Journal of Wood and Wood Products*, (Pereira 1992). Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00107-015-0908-y>.
- Naboni, R. & Paoletti, I., 2015. *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, London: Springer. Available at: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-04423-1.pdf> [Accessed December 25, 2014].
- Pereira, H., 2007. *Cork: Biology, Production and Uses*, Amsterdam: Elsevier.
- Sass, L., 2006. *A wood frame grammar: A generative system for digital fabrication.* *International Journal of Architectural Computing*, 04(01), pp.51-68. Available at: <http://multi-science.metapress.com/index/R3610VG507633KOG.pdf> [Accessed December 30, 2014].
- Sass, L., 2005. *Wood Frame Grammar: CAD Scripting a Wood Frame House.* , pp.1-10.
- Silva, S.P. et al., 2008. *Cork: properties, capabilities and applications.*

International Materials Reviews, 53(4), pp.256-256.

Simões, I., Simões, N. & Tadeu, A., Estudo Comparativo do Atrazo Térmico de “ Isolamento Térmico .” , pp.48-53.

Sousa, J.P., 2010. From Digital to Material: Rethinking Cork in Architecture through the use of CAD/CAM Technologies. IST, Technical University of Lisbon.

Varela, P.A., Paio, A. & Sousa, J.P., 2014. The cork vault pavilion: A Design Research through Practice. In F. Madeo and F. Novi, ed. Architectural Research through to Practice: 48th International Conference of the Architectural Science Association. Genova: The Architectural Science Association, pp. 395-404.

Correspondência

Filipe Jorge da Silva Brandão, filipejsbrandao@hotmail.com

Alexandra Paio, alexandra.paio@iscte.pt

José Pedro Sousa, jsousa@arq.up.pt

Vasco Rato, vasco.rato@iscte.pt

CASA REVISTA: ARQUITETURA DE FONTE ABERTA

ARTIGO

HOUSE MAGAZINE: OPEN SOURCE ARCHITECTURE

Andrés Passaro¹ ; Clarice Rohde¹

RESUMO: A popularização das novas tecnologias de fabricação digital vêm alterando os modos de produção da sociedade contemporânea. O compartilhamento aberto de informações, dentro de uma nova lógica produtiva, tem o potencial de mudar o sistema econômico vigente, e de até transformar os rumos da globalização em curso. O presente trabalho aborda um novo sistema construtivo de fonte aberta que utiliza a fabricação digital na produção de habitações de baixo custo. O projeto Casa Revista, desenvolvido no laboratório LAMO3D da FAU-UFRJ, tem como objetivo alimentar a renovação da produção independente de habitações, inserindo uma nova tecnologia construtiva no vocabulário popular e explorando seus potenciais. Baseado no sistema WikiHouse de construção, o projeto alia conhecimento global à produção local, tropicalizando o seu conteúdo. A experiência contou com a prototipagem em escala real de um primeiro modelo, usinado e montado por estudantes da graduação, a fim de testar a qualidade do sistema e sua viabilidade técnica de implementação como tecnologia social. O projeto mostrou-se intuitivo, de complexidade simples e rico em possibilidades de manipulação e aperfeiçoamento. São os projetos e tecnologias de fonte aberta que vêm promovendo o alargamento de usos do conhecimento por novos atores, gerando uma dispersão da produção. Cabe a nós arquitetos reconhecermos esse potencial e moldar suas infinitas possibilidades de aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: Fonte Aberta; WikiHouse; Fabricação Digital; CNC; Habitação Social.

ABSTRACT: The popularization of new digital fabrication technologies is changing the production practices in contemporary society. The open sharing of information within a new logic of production, has the potential to change the current economic system, and even change the course of the ongoing globalization process. This paper discusses a new open source building system that uses digital manufacturing in the production of low-cost housing. The project House Magazine, developed in LAMO3D laboratory at FAU-UFRJ, aims to feed the renewal of the production of independent houses, inserting a new construction technology in the popular vocabulary and exploring their potential. Based on WikiHouse system, the project combines global knowledge to local production, tropicalizing its content. The project has reached its first prototype in real scale, milled and assembled by graduate students in order to test the quality of the system and its technical feasibility of implementation as social technology. The project proved to be intuitive, of simple complexity and rich in possibilities of manipulation and improvement. Open projects and open source technologies are promoting the extension of uses of the knowledge by new players, generating a dispersion of production. It is up to us architects to recognize this potential and shape its endless application possibilities.

KEYWORDS: Open Source; WikiHouse; Digital Fabrication; CNC; Social Housing.

¹ LAMO3D, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

How to cite this article:

PASSARO, A.; Rohde, C. Casa Revista: arquitetura de fonte . *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 25-41 jul-set. 2016.

Fonte de financiamento:

-FAPERJ e CNPQ

Conflito de interesse:

Declara não haver

Submetido em: 15/04/2016



INTRODUÇÃO

A fabricação digital está cada vez mais presente na vida contemporânea e vem se popularizando, tendo em vista a crescente abertura de FabLabs¹, os laboratórios de fabricação digital. Muitos inclusive, com foco no público infantil, oferecendo cursos de programação e robótica, como o OLABI Makerspace² no Rio de Janeiro e a rede FabLab Livre SP em São Paulo³. Estes espaços tem papel fundamental na formação de uma nova geração de makers, pessoas capazes de se apropriar das tecnologias através do conhecimento compartilhado. O maquinário e os processos construtivos já não são de uso exclusivo da indústria, estando presente nesses laboratórios, e até mesmo à venda em livrarias de uma grande rede brasileira, como a impressora 3D Cube⁴, tornando-se objetos de consumo do público em geral.

A sociedade independente vem ganhando expressão, beneficiando-se da crescente disponibilidade de softwares e hardwares livres, a tecnologia de fonte aberta⁵. Desde o advento da internet em 1991, com intuito de facilitar o compartilhamento de dados e o trabalho colaborativo, a quantidade de informações disponíveis na rede só aumenta. É possível encontrar tutoriais dos mais diversos, compartilhando conhecimentos e até projetos para construção, desde móveis, casas, até máquinas industriais necessárias para a construção da vida contemporânea, como as desenvolvidas pelo grupo Open Source Ecology⁶. O conhecimento está cada vez mais acessível através desses projetos abertos, disponíveis gratuitamente na rede. Se a tirania da informação e do dinheiro é atribuída por Milton Santos (2000) como o pilar da desigualdade social da globalização atual, é a tecnologia de fonte aberta que vem democratizar o acesso à informação e às ferramentas para a construção de uma nova globalização.

Enquanto a sociedade se encontra em meio a um ensaio de um futuro próximo, os laboratórios mais avançados do mundo prototipam possibilidades de aplicação das novas tecnologias de fabricação, experimentando esse futuro na prática. O pioneiro no uso de robôs na arquitetura ETH Zurich⁷ apresentou, em 2006, The Programmed Wall, a primeira parede de tijolo criada através de algoritmos processados por computador e construída por um robô na história das civilizações (Gramazio e Kohler, 2014). Em 2012, o projeto In Situ Robotic Fabrication ensaiou o uso de braços robóticos no canteiro de obras, com capacidades adaptativas para se localizar no espaço e aos demais objetos, processando variações de material e interagindo com o homem (Gramazio e Kohler, 2014). Outro projeto intitulado Minibuilders, desenvolvido no IAAC⁸, aplica robótica e processos aditivos de impressão 3D à construção arquitetônica, buscando atualizar a prática construtiva em relação às novas tecnologias já muito desenvolvida em outras áreas da indústria (Nan, 2015). É no meio acadêmico, através do ensino e da pesquisa de novas práticas projetuais, que se encontra o estímulo para uma futura atualização da indústria e das práticas da construção civil, ainda muito precárias no Brasil.

¹ Os Fab Labs fazem parte de uma rede mundial de laboratórios de fabricação digital com o objetivo de estimular a criatividade, inovação e a prototipagem de ideias, através do acesso a equipamentos e conhecimento. A rede Fab Lab surgiu em 2001 no MIT, e para fazer parte é preciso atender a demandas mínimas estabelecidas no Fab Charter. O surgimento desses laboratórios no mundo tem tido crescimento exponencial, e no Brasil eles estão conectados através da rede FabLab Brasil. <http://www.fablabbrasil.org>

² Olabi é uma empresa social focada em estimular a aprendizagem de novas tecnologias e estimular a inovação social. Seu makerspace é voltado para a experimentação, onde pessoas compartilham ferramentas, máquinas e conhecimentos. <http://olabi.co>

³ A cidade de São Paulo é a primeira do mundo a ter uma rede pública de laboratórios de fabricação, em sua maioria localizados em áreas periféricas. <http://fablablivresp.art.br/>

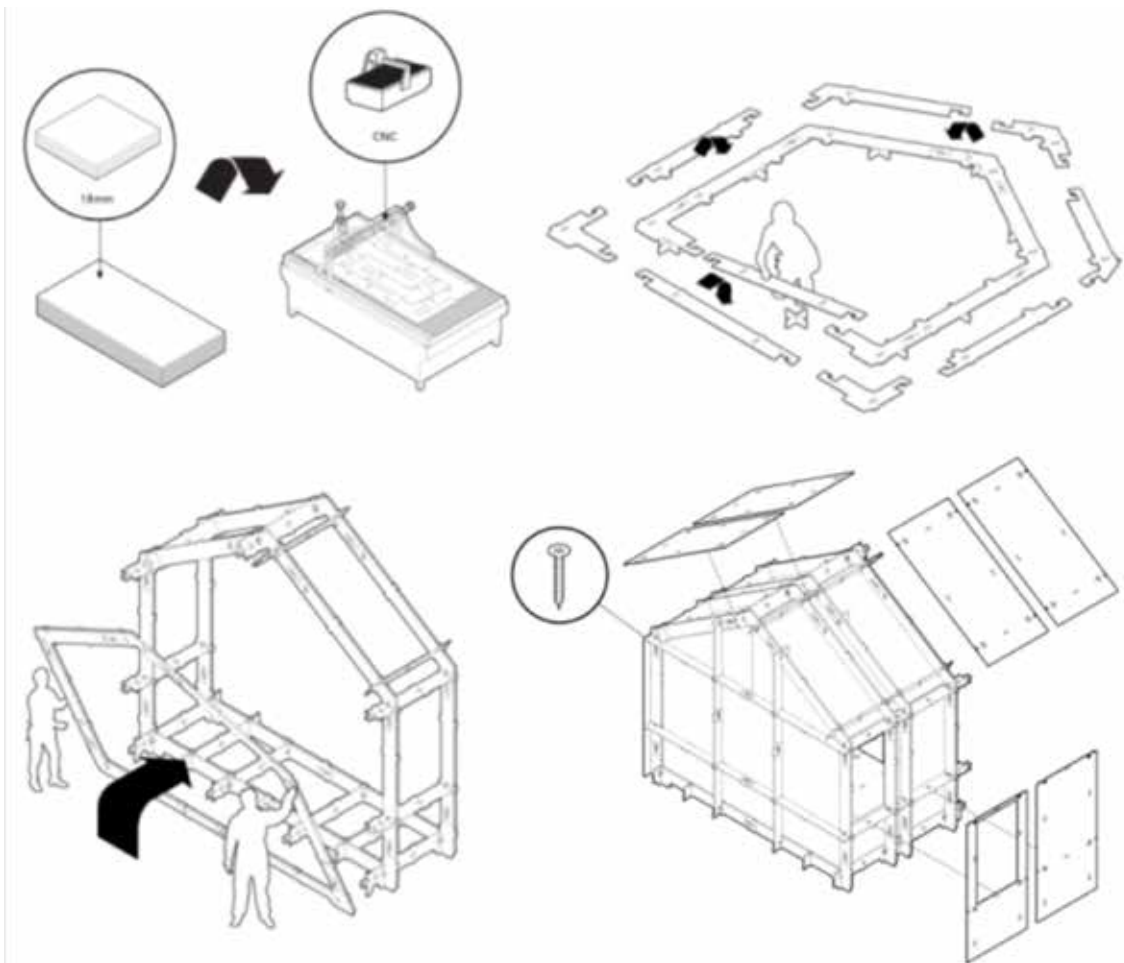
⁴ <http://www.saraiva.com.br/impressora-3d-cube-3-cinza-9184062.html>

⁵ A iniciativa de fonte aberta (open source initiative) teve início na área de desenvolvimento e compartilhamento de softwares de forma aberta, consolidando-se através de licenças de uso aplicáveis a qualquer tipo de informação. <http://opensource.org>

⁶ A meta do grupo Open Source Ecology é estimular uma “economia de fonte aberta” na qual a colaboração livre estimula a inovação por novos atores. <http://opensourceecology.org>

⁷ O Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETH Zurich) emprega tecnologias de ponta em suas pesquisas como as desenvolvidas pelo grupo Gramazio Kohler Research <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/>

⁸ Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC) <https://iaac.net/>



O LAMO3D⁹ tem seus estudos direcionados a esse debate. Estabelecido como grupo de pesquisa em 2013, o Laboratório coordenado pelo Prof. Dr. Andrés Passaro vem promovendo uma série de workshops, oficinas e palestras, provocando uma mudança de perspectiva dentro da escola.

O projeto Casa Revista, desenvolvido no laboratório, tem como objetivo propor uma atualização da produção independente de habitações, inserindo uma nova tecnologia construtiva e explorando seus potenciais. Baseado no sistema WikiHouse¹⁰ desenvolvido em Londres e de fonte aberta (Fig 1), o estudo busca seu abasileiramento, sua aclimatação e a solução de questões básicas que envolvem o morar. Para tal, foi construído um primeiro protótipo em escala real, a primeira WikiHouse da América Latina (Fig 2). Conseguimos assim atestar a sua aplicação prática como solução de moradia rápida e barata, aperfeiçoando a técnica e sua adaptação às condições locais. Com o intuito de renovar o debate sobre a produção habitacional no Brasil, o projeto Casa Revista propõe a aplicação de novas tecnologias de fabricação à produção de habitação de forma autônoma e colaborativa. Baseado no empoderamento do morador-construtor, este se torna apto a construir sua própria casa através do uso intuitivo de novas tecnologias que aos poucos vão se consolidando através da cultura colaborativa de fonte aberta.

Figura 1: Processo de fabricação e montagem da WikiHouse. <http://www.wikihouse.cc/>

⁹ LAMO3D – Laboratório de Modelos 3D e Fabricação Digital da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ.

¹⁰ O grupo WikiHouse é um dos pioneiros na aplicação de tecnologias de fabricação digital na concepção e produção de casas, estudando os impactos que a Quarta Revolução Industrial (a da informação ou data) traz à economia e à organização social. <http://www.wikihouse.cc/>



Figura 2: Casa Revista construída pelo LAMO3D. Acervo dos autores.

O projeto da casa, de livre acesso, pode ser produzido em qualquer oficina de fabricação digital, ou FabLab, equipado com uma router CNC¹¹, e então montado tendo como guia um manual de montagem, tão simples quanto um jogo de montar.

O presente trabalho trata, através da própria experiência construtiva, da possível aplicação das novas tecnologias de fabricação de forma independente e autônoma, como ferramenta acessível à maior parte da população em um futuro próximo. Assumindo as ideias de Milton Santos (1994: p.20), “Ciência, tecnologia e informação são a base técnica da vida social atual — e desse modo devem participar das construções epistemológicas renovadoras das disciplinas históricas. Mas não podemos esquecer de que vivemos em um mundo extremamente hierarquizado”, percebe-se o potencial do conhecimento de fonte aberta e livre na geração de transformações mais profundas na ordem social, introduzindo à cena global novos atores.

METODOLOGIA

O projeto nasceu de experimentações realizadas com o sistema WikiHouse de construção. O grupo possui uma plataforma open source colaborativa, disponibilizando na rede todos os projetos desenvolvidos, construídos ou não. Por ser de fonte aberta, o sistema apresenta um rápido crescimento e evolução, com colaboradores no mundo todo, aliando produção local e conhecimento global.

“O sistema funciona com pórticos formados por peças de madeira compensada em chapas cortadas em uma fresadora CNC. As peças do pórtico são unidas por uma junção em ‘S’, e o pórtico duplicado com o sentido do ‘S’ invertido para garantir rigidez à junção. Os travamentos entre pórticos são feitos com peças transversais que se cruzam por orifícios nos pórticos e são fixadas com cunhas.

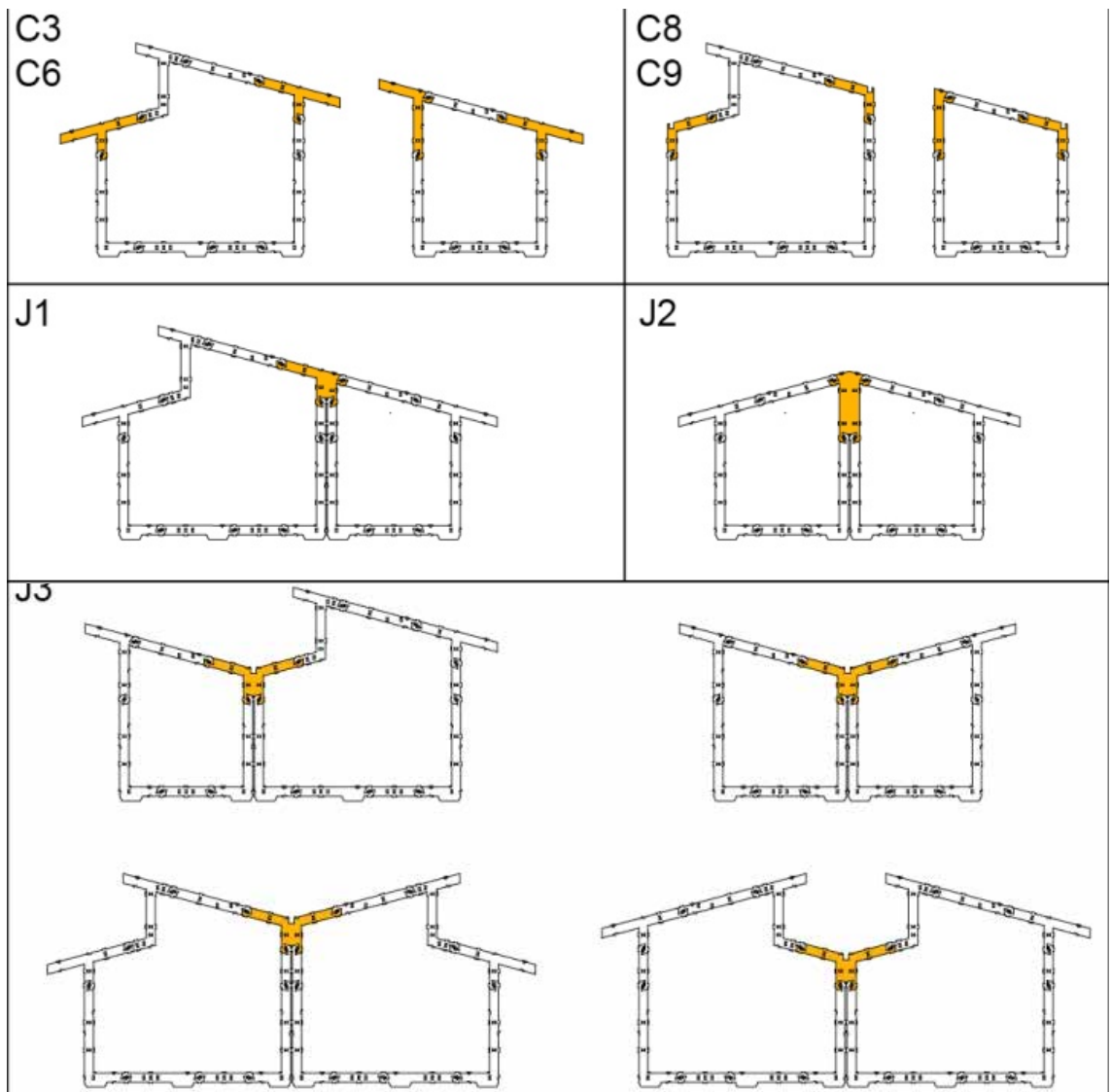
¹¹ As máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) são capazes de produzir objetos físicos a partir de um projeto digital convertido em código numérico para manufatura, baseado em coordenadas espaciais.

Esse sistema trava a estrutura nas três direções sem fazer uso de parafusos, apenas com encaixes de peças de madeira compensada. Tem-se o esqueleto da estrutura que é contraventado com a fixação de chapas de fechamento que se encaixam em abas da estrutura.” (Passaro e Rohde, 2014)

A Casa Revista foi desenvolvida como projeto de conclusão de curso de graduação pela arquiteta Clarice Rohde, orientado pelos professores Andrés Passaro e Marcos Silvano. A execução do projeto foi realizada pelo LAMO3D em duas oficinas abertas, o LAMO Summer Camp, oficina de fabricação digital, e a Construção da Casa Revista, ambas realizadas no verão de 2015, em parceria com o Laboratório de Ensino de Materiais de Construção e Estudo do Solo - LEMC, coordenado pelo Prof. Dr. Marcos Martinez Silvano.

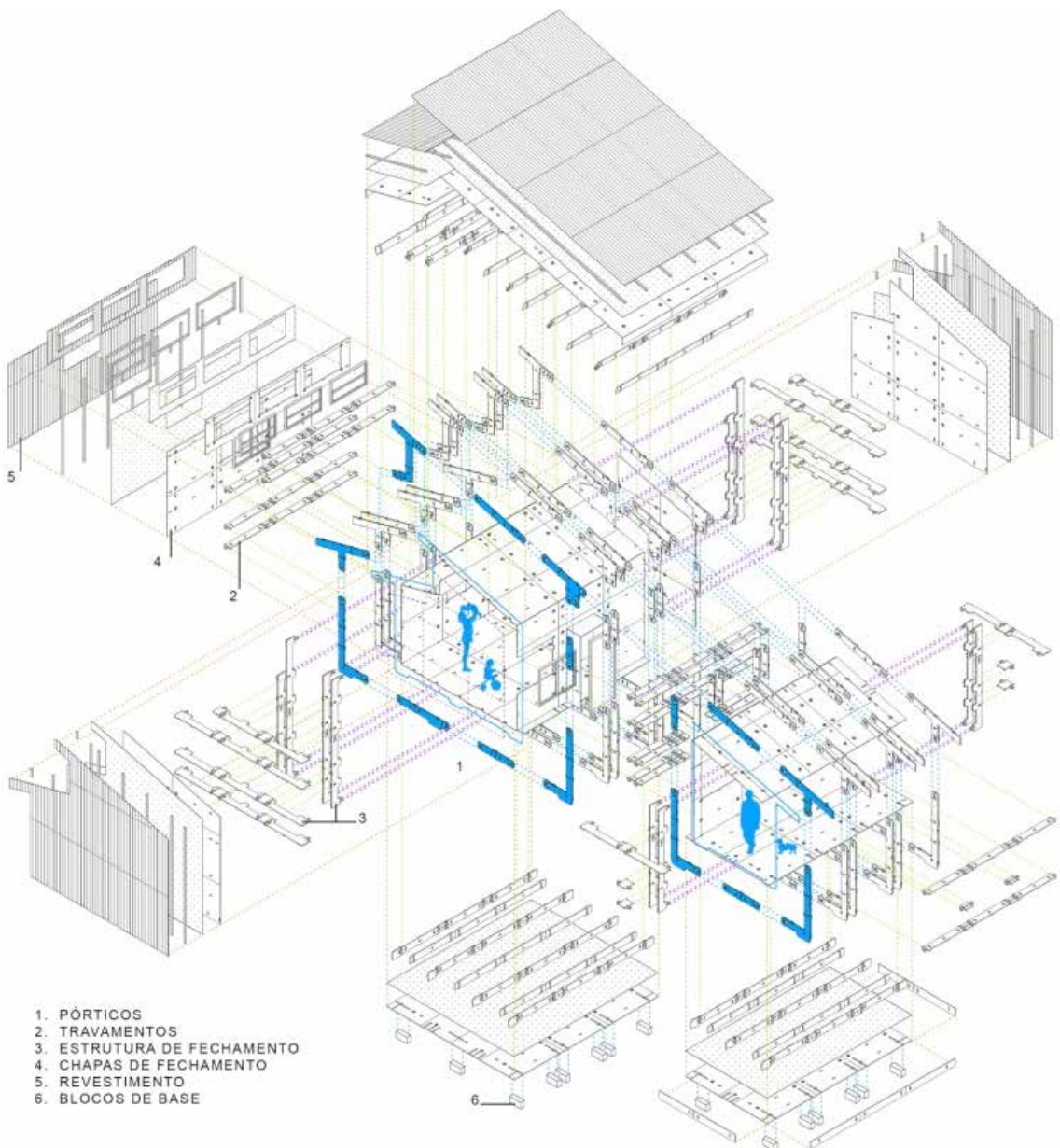
A metodologia de projeto foi apresentada de forma aprofundada em artigo anterior, publicado nos anais do Seminário Habitar 2014 (Passaro e Rohde, 2014). Nele são descritos os procedimentos adotados na definição dos perfis da estrutura, o espaçamento entre os pórticos, sua adaptação ao clima tropical úmido e as possibilidades de personalização do projeto a partir de uma mesma base de peças (Fig 3).

Figure 3: Possibilidade de diferentes tipologias de pórtico estrutural a partir do intercâmbio de peças estratégicas. Acervo dos autores.



Trata-se de uma proposta de arquitetura de banca de jornal, uma revista com periodicidade e diversidade que traz projetos variados que partem de um mesmo catálogo de peças para atingir diversas configurações espaciais. O intuito é atender a distintas demandas e estimular a personalização do projeto por parte do leitor-construtor. Na revista, encontram-se não só o projeto e o manual de montagem, mas também instruções para implantação de sistemas complementares de reuso de águas e captação de energia solar, assim como instruções para melhor implantar a habitação de acordo com o terreno, ventos e insolação. O formato de revista visa atingir a população mais necessitada de conhecimento para a autoconstrução de sua moradia, buscando a popularização das tecnologias de fabricação digital.

Após a fase inicial de compreensão do funcionamento do sistema construtivo, deu-se início à fase de adaptações às demandas projetuais. Utilizando simulações em software e modelos físicos em escala, foram definidos os perfis dos pórticos a serem utilizados e os espaçamentos entre eles (Fig 4).



A adoção de duas alturas permite a recombinação entre pórticos para atingir diversas tipologias, assim o projeto é expansível tanto através da repetição de pórticos longitudinalmente como através da associação lateral entre eles.

Para atingir essa liberdade compositiva, o mesmo ritmo estrutural foi adotado em ambos os sentidos, através do casamento entre demandas como vão de esquadrias, dimensão da estrutura e espaçamento para passagem de tubulações. Essas definições, bem como a otimização de peças só foram possíveis através de um contínuo exercício de prototipagem rápida utilizando corte a laser, por meio do qual diversas possibilidades foram testadas.

Além do estudo, domínio e manipulação da técnica, o projeto apreendeu os aspectos da cultura popular brasileira do morar, identificados como de caráter múltiplo por se tratar de uma nação mestiça, lavada com sangue de índio, negro e tropical (Ribeiro, 1990). O reconhecimento de elementos de sua cultura material, identificados como tipicamente brasileiros, demonstrou ser o caminho para uma primeira aproximação entre o povo brasileiro e as tecnologias de fabricação digital, alcançando uma ótima receptividade, além da qualidade ambiental.

O telhado em duas águas, iconográfico, ganhou um desencontro entre as águas para abrigar janelas que ventilam e retiram a massa de ar quente do ambiente, adaptando a estrutura ao clima e cor local. O beiral, consagrado na arquitetura popular, é incorporado no vocabulário da arquitetura digital, representando sua produção tropicalizada. A varanda, presente na maioria das casas brasileiras, não poderia faltar como elemento regulador térmico e de bem-estar, onde se pendura rede e coloca vaso de planta.

Buscou-se evitar uma visão romântica que delimita a cultura popular entre o primitivismo, o purismo e o comunitarismo, tendo como perspectiva:

“... a cultura popular como expressão dos dominados, buscando a forma pelas quais a cultura dominante é aceita, interiorizada, reproduzida e transformada, tanto quanto as formas pelas quais é recusada, negada e afastada, implícita ou explicitamente, pelos dominados. (...) Por esses motivos, não trataremos a cultura popular, no Brasil, pelo prisma de uma totalidade que se põe como antagônica à totalidade dominante, mas como um conjunto disperso de práticas, representações e formas de consciência que possuem lógica própria distinguindo-se da cultura dominante exatamente por essa lógica de práticas, representações e formas de consciência.” (Chauí, 2014, p.28)

Sob essa ótica, percebe-se a importância do conhecimento de fonte aberta acessível à população, que a partir do seu domínio é capaz de transformá-lo e ressignificá-lo através de lógicas próprias e não hierarquizadas. A arquitetura de fonte aberta aqui apresentada incorpora elementos da cultura popular justamente para tornar possível sua ressignificação pelo usuário.

Esse estudo trata de uma especulação acerca do futuro, quando, não muito distante daqui, teremos as tecnologias de fabricação digital popularizadas e acessíveis em formato aberto. A população que por tanto tempo foi mantida como massa passiva manipulável aos interesses do grande capital, vai enfim se tornar ativa de forma independente e múltipla, quando ocorrer uma dispersão do poder de produção. São os projetos e tecnologias de fonte aberta que promovem o alargamento de usos do conhecimento e dos avanços tecnológicos, e cabe a nós arquitetos reconhecer esse potencial e alimentá-lo com infinitas possibilidades de aplicação.

Figure 4: Perspectiva do projeto mostrando as peças do sistema. Acervo dos autores.

LAMO Summer Camp



Figura 5: Primeira seção produzida para verificação dos encaixes. Acervo dos autores.

Para colocar à prova o sistema construtivo e suas lógicas de aplicação chegamos à fase de prototipagem em escala real. O LAMO Summer Camp foi o primeiro acampamento de verão promovido pelo LAMO3D, oferecendo a oportunidade de expandir a experiência de fabricação digital aos estudantes de arquitetura da UFRJ. Com o laboratório equipado desde 2013 com impressoras 3D e máquina de corte a laser, foi necessário recorrer a uma parceria com empresa do ramo que nos cedeu o espaço e a máquina router CNC para a realização dos cortes. Durante os meses de janeiro e fevereiro de 2015 foram usinadas 200 chapas de madeira compensada por cerca de 15 alunos.

No primeiro contato com o maquinário foi produzida uma seção em que todos os tipos de encaixe utilizados no projeto estavam presentes. Com a verificação de que os encaixes estavam funcionando milimetricamente, deu-se início à produção do primeiro pórtico da estrutura enquanto fazia-se a capacitação dos estudantes na geração de desenhos, códigos e operação da máquina (5, 6 e 7).



Figura 6: Capacitação dos alunos na operação do maquinário. Acervo dos autores.

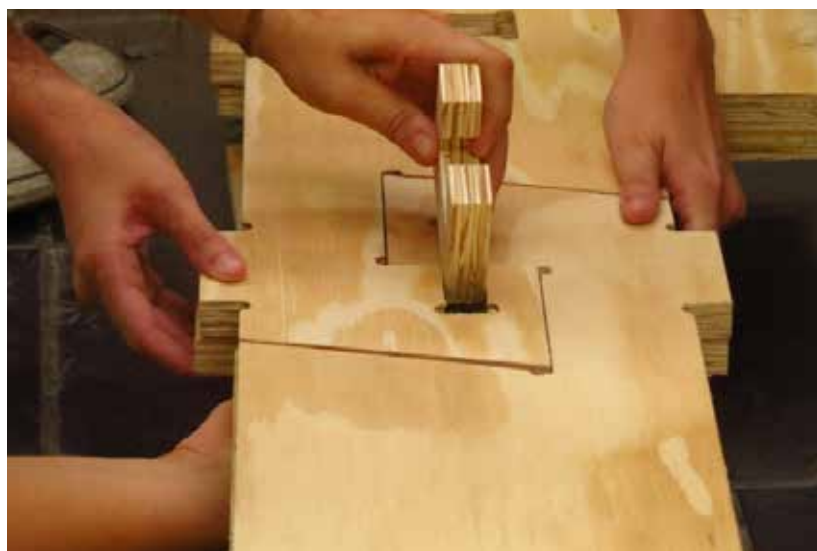


Figura 7: Detalhe da junção em S. Acervo dos autores.



O primeiro pórtico da estrutura foi montado no laboratório, como teste e ensaio para a montagem final (Fig 8). Apenas uma peça na estrutura de fechamento apresentou problemas na montagem e precisou ser redesenhada, por não comportar dois eixos de encaixe simultâneo. Com o ensaio, definiu-se a ordem de montagem do sistema, e que apenas o pórtico maior seria pré-montado e erguido, acoplando o perfil menor, da varanda, na medida em que a estrutura já estivesse de pé e estável.

A produção das peças seu deu na ordem: pórticos (série A, série B), travamentos, estrutura de fechamento final e chapas de fechamento, a mesma ordem aplicada à montagem (9). Posteriormente, realizou-se o corte do mobiliário desenhado pela equipe do LAMO3D, alguns inspirados em desenhos abertos disponíveis na internet.

Figura 8: Detalhe da junção em S. Acervo dos autores.



Figura 9: Detalhe do encaixe das peças do pórtico contendo série A e série B. Acervo dos autores.

Construção da Casa Revista

Com as peças lixadas e envernizadas, deu-se início à oficina de construção da Casa Revista, com a participação de 50 voluntários, entre estudantes, professores e funcionários do laboratório. Foi o primeiro contato com o sistema para a maioria, que após uma rápida apresentação de seu funcionamento, passou para a compreensão dos desenhos do manual de montagem e produção das primeiras estruturas no solo, o que permitiu constatar a facilidade de montagem do sistema (Fig 10, 11 e 12).

Ao longo da primeira semana foi feita a locação dos blocos de base, a montagem da estrutura composta por pórticos, travamentos e estrutura de fechamento final, e iniciou-se a colocação das chapas de fechamento. Na segunda semana foram feitas as instalações elétricas com a finalização dos fechamentos, e a colocação do revestimento final em telha plástica e as esquadrias.

Este primeiro protótipo de habitação foi montado nos jardins em frente à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ, com sua varanda voltada para o norte, de modo que o alpendre protegesse a habitação da maior insolação. Os blocos de base utilizados (40x40x10cm) são de concreto permeável, assentados sobre saibro para uma correção ligeira de nível. Dentre os quatro pórticos que constituem o modelo, optamos por começar pelos dois centrais, espaçados por travamentos de apenas 30cm, e que por isso apresentavam maior estabilidade. Postos de pé e escorados com madeira, passamos para o encaixe dos travamentos maiores, de 120cm que comportam as aberturas de esquadria do sistema.

O passo seguinte precisou ser repensado, pois a tentativa de acoplamento do pórtico subsequente crescido da estrutura de fechamento final se mostrou falha. Além de pesada, a estrutura precisava encaixar simultaneamente em 18 pontos, e os travamentos longos, de 120cm, se encontravam desalinhados pela força do peso próprio. Optamos por simplificar a montagem, construindo o pórtico seguinte peça por peça. Começando pelos pés, cada peça nova

Figura 10: Organização das peças da estrutura. Acervo dos autores.





Figura 11: Detalhe da montagem da estrutura de fechamento. Acervo dos autores.

encaixava na anterior, série A e série B, para obter a junção 'S' invertida, e encaixava também na aba do travamento já em espera. As cunhas finais que iriam travar o sistema só poderiam ser batidas depois da estrutura de fechamento final colocada, pois esta compartilha o mesmo furo no pórtico que o travamento anterior.

A estrutura de fechamento final se encontra perpendicular aos pórticos, nas paredes leste e oeste da habitação. Por apresentar encaixes no sentido y, foi preciso montá-la previamente para então ser acoplada à estrutura de pé apenas com encaixes no sentido x.

Figura 12: Montagem da estrutura realizada por alunos da FAU-UFRJ. Acervo dos autores. .



Essa lógica de montagem pôde ser percebida desde a fase de protótipos, em que se conseguia certa flexibilidade com MDF de 3mm impossível de ser atingida com o compensado de 18mm. Para realizar tal operação, parte da equipe se distribuiu ao longo do pórtico, onde se encontravam os orifícios, enquanto a outra sustentava a estrutura e alinhava os encaixes. Todos os 16 pontos entraram simultaneamente, concluindo o esqueleto do protótipo.

Os pórticos da varanda também foram montados peça por peça, a partir da junção entre os dois pórticos (Fig 13 e 14). Em pontos estratégicos da estrutura, existem algumas variações de peças que podem ser empregadas. Se optássemos por construir apenas o pórtico maior, a terminação se daria com peça de beiral C3. A forma como optamos unir os dois pórticos utilizou uma peça J1, mas outras formas de junção entre os tipos de pórticos poderiam utilizar peças como a J2 ou J3, gerando outras tipologias.

A colocação das chapas de fechamento consistiu na etapa de maior dificuldade de montagem do protótipo (Fig 15). A estrutura montada apresentava certa deformação e maleabilidade que as chapas iriam corrigir, mas a ausência de folga entre as abas da estrutura e os orifícios das chapas dificultou muito a tarefa. Se a estrutura toda “dançava” ao ser balançada, após a colocação das chapas de fechamento percebeu-se seu enrijecimento e o papel desempenhado pelas chapas no contraventamento da estrutura. As instalações elétricas foram todas passadas anteriormente, por orifícios específicos a essa função presentes na estrutura.

Por sua localização em clima tropical úmido, com chuvas intensas, optou-se pelo recobrimento do telhado e das paredes em telha plástica. Para isso realizou-se um ripado sobre as placas de compensado para a fixação dos parafusos da telha. As aberturas receberam peças de arremate para a colocação de esquadrias padronizadas da indústria. O protótipo foi finalizado com a aplicação de outra camada de verniz e a colocação do mobiliário, produzido em mesmo material e com a mesma técnica, madeira compensada.¹²

RESULTADOS

O projeto usinado por estudantes de arquitetura ao longo de 2 meses e montado em mutirão em 2 semanas permitiu testar a proposta de diversas formas. Primeiro, sua funcionalidade como sistema estrutural e versatilidade ao permitir o uso de diferentes perfis, adaptando-se a diferentes climas.

¹²Todo o processo de montagem pode ser visto em <https://vimeo.com/130312585>



Figura 13: Estrutura de fechamento final pré-montada para encaixe no pórtico. Acervo dos autores.



O sistema apresenta extrema firmeza quando a estrutura porticada e travada nas três direções é contraventada com o encaixe das chapas de fechamento, afinal, trata-se de um sistema que vem sendo aprimorado desde 2011 por equipes de profissionais do 00 Architecture, e parceria com Arup, renomado escritório de engenharia inglês. A cultura colaborativa permite rápido crescimento e evolução, com testes sendo realizados em todas as partes do mundo, contribuindo para um rápido avanço do conhecimento gerado pela comunidade global.

A segunda questão, a mais significativa para a proposta do projeto, foi atestar sua facilidade de aplicação para a autoconstrução. Toda a equipe envolvida no processo de fabricação e montagem não possuía conhecimento prévio do sistema ou de sua fabricação, foi um conhecimento adquirido com a prática. Em pouco tempo, a equipe de fabricação já era capaz de gerar códigos e operar a máquina router autonomamente.

Figura 14: Estrutura de fechamento final pré-montada para encaixe no pórtico. Acervo dos autores.



Figura 15: Pórticos estruturais montados e início da colocação dos fechamentos. Acervo dos autores.

No mutirão de montagem, a grande maioria dos participantes entrou em contato com o sistema pela primeira vez, e em poucas horas já produziam os primeiros pórticos da habitação. O projeto se mostra intuitivo, de complexidade simples, podendo ser montado por qualquer pessoa munida de manual de instruções.

A experiência obtida revela questões a serem melhoradas assim como possibilidades de desdobramentos futuros. Apesar da racionalização do número de peças e do uso do material ter sido um princípio, as novas versões do sistema representam um avanço nesse sentido. As próximas experiências construtivas necessitam ser atualizadas para atingir uma eficiência maior da estrutura com o menor uso de material. Outra questão que envolve a qualidade do sistema construtivo é a sua vedação, pois a versão desenvolvida apresentou falhas que permitem o livre acesso de insetos ao interior do modelo.

A durabilidade da construção é outro ponto fraco, pois se tratando de madeira, são necessários tratamentos especiais que foram inviáveis ao orçamento do projeto. Para um prolongamento da durabilidade da habitação recomendamos o uso de manta de impermeabilização no telhado e paredes, sob a telha de revestimento. Na varanda, a impermeabilização através de seladora e verniz se mostrou insuficiente para um material que não apresenta resistência à água (o compensado utilizado não é naval), sendo mais bem indicada uma impermeabilização com fibra de vidro e resina, como a utilizada na impermeabilização de barcos.

Em relação à sua produção, é possível promover uma otimização no tempo de corte e de montagem, que pelas limitações existentes nos foi estendido. As oficinas promovidas tiveram o intuito didático de instrumentalizar e promover a experiência de canteiro que tanto falta aos estudantes dentro da universidade. Por isso, contaram com o tempo disponível das férias de verão e do maior número de participantes interessados, mesmo que isso implicasse em maiores dificuldades logísticas, tendo em vista a falta de experiência com o ferramental básico por parte dos alunos.

Quanto às questões de conforto ambiental, uma arquitetura bem implantada e pensada intuitivamente para o clima demonstrou ser suficiente, proporcionando um ambiente bem ventilado e fresco, mesmo nos dias mais quentes de verão. É preciso atentar para essa questão quando se trata de projetos globalizados, que não podem ser reproduzidos indiscriminadamente sem uma adaptação às condições locais. Esse conhecimento foi atribuído ao arquiteto na divisão do trabalho, mas sempre esteve presente na história das construções, podendo ser apreendido apenas pela ampliação da percepção do espaço. A arquitetura popular brasileira que reflete essa percepção às



Figura 16: Interior da casa e mobiliário produzido em router CNC. Acervo dos autores.

condições locais foi a fonte inspiradora para a definição dos perfis dos pórticos utilizados. A adoção de beiral e abertura zenital para a saída de ar quente e iluminação natural foram as principais adaptações do sistema ao clima tropical úmido.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

A produção de arquitetura digitalmente fabricada ainda está em fase de desenvolvimento. Experiências como a de Larry Sass, no MIT¹³, Rodrigo Alvarado, com a Casa Generativa¹⁴, WikiHouse e EConnect¹⁵ abriram espaço para o surgimento de um mercado que já comercializa habitações produzidas in loco por máquinas CNC, como o grupo Facit Homes¹⁶. Mas há muito ainda a se caminhar em busca da sua otimização, simplificação e desempenho, assim como a sua viabilidade técnica em países tidos como em 'desenvolvimento'.

A autoconstrução empírica da moradia apresenta graves problemas e esta proposta pretende dar suporte à cultura da autoconstrução dotando-a de capacidade operativa através da utilização da tecnologia de projeto e fabricação digital. Como etapa seguinte do projeto, pretendemos construir uma amostragem de habitações junto a uma população carente de moradia, envolvendo os futuros moradores no processo de fabricação e construção, e promovendo sua capacitação no uso das novas tecnologias. Para tal empreitada, nos falta justamente o ferramental de produção a ser levado in loco, a chamada Unidade Móvel de Fabricação, do Centro Avançado de Fabricação e Experimentação Digital – CAFE, uma extensão do LAMO3D. O CAFE está em processo de aquisição de duas unidades robóticas de 6 eixos, mas ainda sem perspectiva para a aquisição da router de 3 eixos.

O objetivo do projeto em sua continuação é avaliar a funcionalidade da casa de fonte aberta abasileirada através de seu uso e apropriação pelos moradores, assim como experimentar sua produção dentro de um sistema autogestionário e democrático, implementada como tecnologia social.

“Assumir o projeto open source como uma tecnologia social é um passo fundamental para a sua inserção em uma economia solidária, uma economia que considera o ser humano como sujeito e finalidade das atividades econômicas, que prioriza o conhecimento e a autonomia da classe trabalhadora, onde outros modos de produção podem florescer. (...) É nesse meio que a arquitetura open source encontra força para exercer sua função social, entre associação de moradores e produtores de habitação, cooperativas empreendedoras da fabricação digital que contem com a ajuda de instituições de incentivo à pesquisa para compra do maquinário, e coletivos independentes que promovam a emancipação humana.” (Passaro e Rohde, 2014).

A popularização de um novo sistema de fabricação para produção autônoma da habitação é de futuro incerto, mas é importante ressaltar o potencial do conhecimento de fonte aberta na produção de uma sociedade mais justa. É através da rede de conhecimento global compartilhado que as tecnologias que vêm revolucionando os modos de produção podem também alterar os meios de produção. O acesso massivo à tecnologia, que se limita atualmente às ferramentas de consumo alienadoras, chegará às ferramentas de produção que têm potencial para alterar toda a ordem socioeconômica vigente.

¹³ <http://ddf.mit.edu/milestone/03>

¹⁴ <http://casagenerativa.blogspot.com.br>

¹⁵ <http://www.eco-nnect.eu>

¹⁶ <http://facit-homes.com>

A arquitetura de fonte aberta tem potencial para alcançar toda uma população excluída do sistema, que no Brasil, fica inteiramente responsável pela autoconstrução de sua moradia. O país foi e continua sendo autoconstruído, e o papel dos arquitetos por aqui é conectar essa população com projetos colaborativos de rápida produção, provendo qualidade técnica e ambiental à autoconstrução. Na Inglaterra, o grupo WikiHouse identifica o potencial das novas tecnologias de fabricação como alternativa à crise do mercado imobiliário que o país enfrenta, com a queda da produção de habitações estandardizadas pelo Estado e pelo mercado. No vídeo *Homes by People*, Alastair Parvin aponta um terceiro setor como o responsável por uma mudança no panorama, a sociedade. Defende a produção independente e personalizada de habitações, promovida por uma associação de moradores através da contratação direta dos desenvolvedores do projeto, tirando partido da customização em massa da produção permitida pelas novas tecnologias de fabricação.

CONCLUSÕES

As técnicas, e sua evolução, estão diretamente relacionadas com os modos de produção, as relações de produção e os espaços produzidos. As tecnologias de fabricação digital estão alterando os modos de produção, e na era da informação, o compartilhamento do conhecimento livre abre caminho para uma alteração das relações de produção mais profunda. A cultura livre e o conhecimento aberto são instrumentos de empoderamento da população, permitem a atuação de indivíduos de forma colaborativa em benefício público, assumindo os avanços do conhecimento humano como um bem construído pela humanidade ao longo de sua evolução, e por isso de domínio público.

“Na hora atual, e para a maior parte da humanidade, a globalização é sobretudo fábula e perversidade: fábula, porque os gigantescos recursos de uma informação globalizada são utilizados mais para confundir do que para esclarecer: a transferência não passa de uma promessa. (...) Perversidade, porque as formas concretas dominantes de realização da globalidade são o vício, a violência, o empobrecimento material, cultural e moral, possibilitados pelo discurso e pela prática da competitividade em todos os níveis. O que se tem buscado não é a união, mas antes a unificação.” (Santos, 1994, p. 27).

Milton Santos não viveu para ver surgir o movimento pelo conhecimento aberto, que tem o potencial de transformar a economia capitalista vigente em uma economia de fonte aberta, menos monopolizada e hegemônica, que substitui a lógica da competitividade pela colaboratividade.

As discussões dentro dessa esfera ainda são escassas, com poucos estudos sobre seu impacto e aplicações. Estão limitadas aos grupos que primeiro desenvolveram a ideia e a seguem defendendo, como a Organização Creative Commons, criadora de licenças de uso com alguns direitos reservados, personalizáveis pelo criador que compartilha sua criação. O livre acesso à informação e ao conhecimento tem o potencial de moldar uma nova globalização, uma globalização de inclusão, que valorize o homem acima do dinheiro. Uma mudança de regime ou reorganização de um sistema começa com mudanças na percepção, análise e respostas ao mundo que nos cerca (Karakiewick, 2015), e a academia tem papel fundamental nesse processo. É dentro das instituições de ensino e pesquisa, principalmente as públicas, que a liberação da informação deve ser assumida como ferramenta de transformação, evolução e superação da condição atual, fundamentando as bases de atuação do futuro, no qual, a questão do livre acesso à informação será assunto de bar, discutido em toda esquina, fundamental ao exercício da democracia.

O projeto de arquitetura de fonte aberta apresentado defende a transparência de processos e produtos, dando acesso à informação e ao seu entendimento, apropriação e transfiguração. Sua aplicação como tecnologia social, transferindo o conhecimento acadêmico à sociedade, e a popularização das tecnologias de fabricação, levantam algumas questões que permanecem abertas. Como a tecnologia aberta será absorvida pela cultura popular? Como a população irá lidar com as tecnologias disponíveis? Como irá se apropriar e as transformar? Quais demandas irão primeiro se utilizar das tecnologias de fabricação? Que lógicas de produção serão aplicadas? Que tomada de consciência as novas práticas irão despertar?

Mercados estão dando lugar a redes, a posse está perdendo força através do acesso e a colaboração vem reformulando as formas de produção. Essas mudanças são um ensaio para uma transição a um novo sistema econômico, aberto e colaborativo. É o início de uma nova cognoscibilidade no planeta, onde ideias, mecanismos, programas, projetos e produtos farão parte do nosso grande banco de dados para produção, explorando o potencial do acesso universal ao conhecimento humano.

AGRADECIMENTOS

A Casa Revista foi construída com o apoio da FAPERJ e CNPQ, em parceria com a Foco Design, que disponibilizou a máquina e o espaço para a realização dos cortes, e com a Sudati Sudply que nos forneceu o material. Agradecemos a toda equipe LAMO3D e a todos os estudantes que participaram da fabricação e construção da casa, assim como todos os professores e funcionários da UFRJ que contribuíram com o projeto.

REFERÊNCIAS

- CHAUI, Marilena. Conformismo e resistência. Belo Horizonte: Autêntica Editora, 2014.
- GRAMAZIO, Fabio; KOHLER Matthias. The Robotic Touch: How robots change architecture. Zurich: Park Books, 2014.
- KARAKIEWICZ, Justyna; BURRY, Mark; KVAN, Thomas. The next city and complex adaptive Systems. 16th International Caad Futures Conference. São Paulo: Springer Book, 2015.
- NAN, Cristina. A New Machinecraft: A critical evolution of Architectural Robots, 16th International Caad Futures Conference. São Paulo: Springer Book, 2015.
- RIBEIRO, Darcy. O Brasil como problema. São Paulo: Editora Siciliano, 1990.
- PASSARO, Andrés; ROHDE, Clarice. Casa Revista. Anais do Seminário Habitar, Belo Horizonte, 2014.
- SANTOS, Milton. Técnica, Espaço, Tempo: Globalização e meio técnico-científico informacional. São Paulo: Hucitec, 1994.
- SANTOS, Milton. Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal. Rio de Janeiro: Record, 2000.

Correspondência

Andrés Passaro,

andrespasaro@gmail.com

Clarice Rohde

claricediasrohde@gmail.com

PROTO-TECTONIC WEAVING SYSTEM: COMPUTATIONAL DESIGN WORKFLOW FOR SEMI-PERMEABLE SELF-SUPPORTING ENCLOSURES

Sistemas de Tecelagem Proto-tectônica: Fluxo de Trabalho de Design Computacional de Fechamentos Semipermeáveis Autoportantes

Roberto Naboni¹, Luca Breseghello²

RESUMO: Este artigo tem como intuito apresentar um trabalho baseado em uma metodologia computacional e os resultados decorrentes da aplicação de técnicas de tecelagem para a construção de um sistema arquitetônico experimental, o Weaving Enclosure. A pesquisa explora a correspondência entre as propriedades do material e a montagem de sistemas encontrados em cestos trançados tradicionais, estudados através de ensaios analíticos, de laboratório e, realizando análise de elementos finitos com processo de trabalho algorítmico. O objetivo é explorar como ampliar o conhecimento obtido através de uma relação milenar entre o homem e a tecelagem sob a perspectiva do design contemporâneo sob as técnicas de fabricação. Com essa finalidade, foi introduzida uma série de experimentos computacionais e simulações para destacar a integração da materialidade, morfogênese digital e fabricação. O artigo apresenta um processo de design para a geração de geometrias específicas relacionadas com a natureza flexível do material e a simulação do seu comportamento com base nas condições ambientais variáveis. Os resultados deste método mostram o projeto e a fabricação de uma divisória, que destaca as propriedades de padrões digitalmente concebidos, definidos parametricamente para oferecer resistência estrutural e anteparo visual. A interação entre técnicas digitais e artesanais para materiais naturais representa um campo promissor para diminuir o impacto ambiental da indústria da construção. No entanto, novos sistemas de montagem, tais como a tecelagem com madeira parecem ainda não ter sido explorados em termos de características performativas e tectônicas que destacam importantes descobertas quando abordadas como um processo de design e fabricação orientada ao material.

PALAVRAS-CHAVE: Design Computacional; Artesanato digital; Fabricação Digital; Computação de materiais; Tecelagem.

ABSTRACT: This paper aims to present a computationally based methodology and subsequent results arising from the application of weaving techniques for the construction of Weaving Enclosure, an experimental architectural system. The research explores the close correspondence between material properties and assembly systems found in traditional basketry, studied through analytical and laboratory tests, and then implemented through finite element analysis and algorithmic workflow. The goal is to explore how to extend the knowledge gained through a millennial relationship between man and weaving under the perspective of contemporary design and fabrication techniques. In order to do so, a series of computational experiments and simulations have been introduced to highlight the integration of materiality, digital morphogenesis and fabrication. The paper presents a design workflow for the generation of specific geometries related to the elastic nature of the material and the simulation of its behavior based on variable environmental conditions. The results of this method showcase the design and fabrication of an interior partition, which highlights the properties of digitally conceived patterns, tuned parametrically to offer structural resistance and visual screening. The interaction between digital and craft techniques for natural materials represents a promising field to decrease the environmental impact of the construction industry. Nevertheless, novel assembly systems such as wood weaving seem to still have unexplored potential in terms of performative and tectonic characteristics which highlight important findings when approached as a material-driven design and fabrication process.

KEYWORDS: Computational design; Digital crafting; Digital fabrication; Material computation, Weaving.

¹ACTLAB - Department ABC, Politecnico di Milano

²ACTLAB, Politecnico di Milano

Fonte de financiamento:

-

Conflito de interesse:

Declara não haver

Submetido em: 27/07/2016

Aceito em: 25/10/2016

How to cite this article:

NABONI, R.; BRESEGHELLO, L. Proto-tectonic Weaving System: Computational Design Workflow for Semi-permeable Self-Supporting Enclosures. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 43-57, jul-set. 2016.



INTRODUCTION

Contemporary research in architecture, favored by the use of advanced computational tool-sets, has focused on the integration of material properties within the digital design environment in order to inform physically consistent architectural design. This approach enables the designer to embed complex material characteristics and behaviors as an active agent in the making of architecture (Menges 2012) and allows the exploration of non-standard building materials and techniques. The industrial needs for standardized production processes have selected just a limited number of techniques considered appropriate to satisfy the criteria for mass production. With the implementation of custom-based digital workflows, antique craft-based techniques can be revisited and reinterpreted under the perspective of “digital crafting”, attempting at defining a novel relationship between material behaviors and human activities, mediated through the use of computational tools, working on innovative interpretations of old processes, performance and language towards their implementation in architecture (Oxman 2007; Thomsen and Tamke 2014).

Weaving in architecture: origins and contemporary applications

The technique of weaving has been widely acknowledged as one of the most antique surviving crafts - the oldest known woven baskets, indeed, have been carbon dated to between 10,000 and 12,000 years old (Wikipedia, Basket Weaving). It is a cross-cultural phenomenon found in almost everywhere throughout the globe. The patterns and specific techniques normally vary from one place to another but they share a common knowledge based on the inherent properties of the materials used. A woven artifact can be considered the result of mediation between material and humans, between raw products of a territory and the cultural knowledge of craftsmanship. A sort of manual material computation is indeed implemented while working with the raw material. Through a direct engagement with matter, weavers perform an immediate problem-solving procedure, as every knot they make constrains the next weaving step (Muslimin 2010).

Figure 1: Traditional basketry weaving system



The antique use of weaving in architecture was first described by Gottfried Semper in 1851 in the book - *The Four Elements of Architecture*, where the construction of the primitive hut was categorized into four fundamental elements - *Hearth, Roof, Mound and Fence* (Semper 1989). The *Fence* refers to the walls of the ancient houses, which Semper described as woven “mats” or hanging cloths rather than solid stone structures. These walls were made out of wooden pieces, branches and plants of varying sizes intertwined in order to form a supportive structure, in some cases covered with mud or leaves for better thermal insulation. This strategy has been used for hundreds of years up to the last century as the latest example of woven

walls might be considered the lath and plaster system nowadays replaced by the gypsum board construction (Griffen 2001). According to Frei Otto the facilitated harvesting and the possibility to be manipulated by hand, made living plants like bamboo or branches of broad-leaved trees a proper weaving material used for the construction of the first human dwellings (Otto 1969). Several attempts to repropose weaving in architecture have been developed within the last few years. We can essentially distinguish three approaches. The first one uses traditional weaving patterns to characterize the aesthetic appearance of architectural systems, such as the structural system (Centre Pompidou in Metz by Shigeru Ban) or the building envelope (Aragon Pavilion in Zaragoza by Olano y Mendo Arquitectos). The second approach applies traditional woven materials over the building skin, as in the Spanish Pavilion in EXPO 2010 by EMBT, or in the facade of London Guy's Hospital by Thomas Heatherwick. Most of these works focus on implementing the aesthetic image of the weaving technique while its intrinsic structural and constructive potential is often neglected. A third approach emerging in the last decade exploits the potential of weaving in the design and fabrication of complex shapes, as in the “God’s Eye” Pavilion developed by Georgiou M., Georgiou O. and Kwok T. (2014).

Potential o weaving and possible contributions in contemporary design

Similarly to the last mentioned approach, the research outlined in this paper exploits the considerable potential of weaving for the design and construction of complex doubly curved surfaces being a performative, but also sustainable and low-cost solution. In fact, weaving structures accommodate natural variations in curvature thanks to the specific bending characteristics of the material and even gain morphological rigidity when implemented on curved geometries. Fundamental feature of this technique is its capacity to establish incredibly resistant and complex construction systems through the use of cheap raw material, from roots to grass, from cane to willow. Furthermore, weaving technique is not utilized for the construction of walls nowadays is the high level of permeability that it exhibits (Muslimin 2010). In the research this feature has been re-considered and implemented in the design of a semi-permeable and partitioning proto-tectonic system. This is to be intended as an avant-garde integrated system of construction, material and structure with its own characteristic architectural language and aesthetic, mediating between the external environment and the user experience (Fig.2).

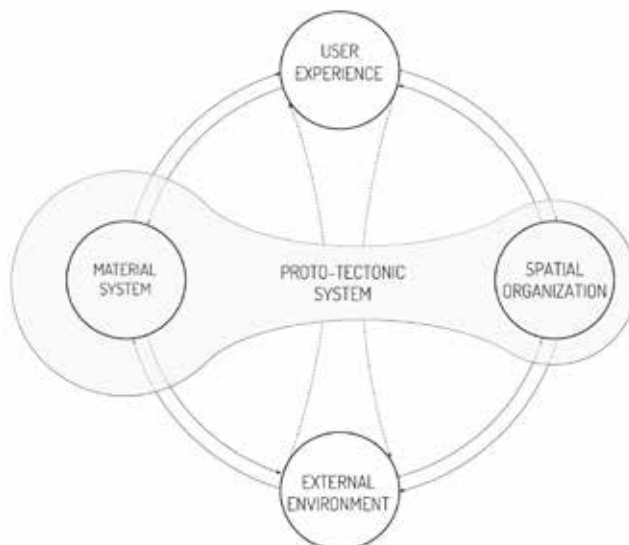


Figure 2: The diagram illustrates how the different features of a material system definition are central in the development of proto-tectonic systems, which are finally developed in consideration of the wider spatial organization, and conceived as mediation between an external cultural and natural environment and the experience of users (adapted from Hensel 2013).

Starting from these premises, the present research focused on the creation of an architectural weaving system in which form, structure and material are coherently developed and integrated as in biological formations (Hensel et al 2010; Oxman 2010), taking advantage of the intrinsic mechanical properties of the technique. This research attempts at answering three main questions. First, how can computational tools inform traditional crafting techniques towards the formation of novel architectural systems? Second, how can we accurately compute the complex behavior of weaving patterns and inform it with performative criteria? Third, how can we mediate between the high precision of digital fabrication tools and processes, and the imperfections inherent to natural materials?

METHODOLOGICAL PROCEDURES

Overview on the design process and computational workflow

This research project implements an experimental workflow centered on the multi-centric mediation between material system and digital fabrication tools, together with design and environmental inputs. In doing so, two main phases have emerged: firstly, *the material system of weaving* have been explored and investigated along with intrinsic logics of weaving patterns by means of mechanical tests, parametric modelling and simulation; in a second phase, *a comprehensive design workflow* have been defined embedding physical properties and exploiting the emergent performances of the *Warp & Weft* weaving system. The workflow has been tested through the *hybrid fabrication* of a lightweight interior partition made of CNC-milled plywood sheets and rattan sticks, which highlights the properties of digitally conceived patterns, parametrically tuned to offer structural resistance and visual screening.

Material system of weaving: composition and properties

Technically, weaving is defined as a process of construction by interlacing or interweaving strips or strands of pliable material. In order to provide clear specifications within its use in fundamental architectural elements in defining this material system include several micro and macro aspects, such as the primary constituent material and the study of its properties, the typology of weaving patterns and the overall characteristics of the woven ensemble to be used performatively (Fig.3).

Figure 3: The diagram illustrates the different features defining a material system



Initial analysis has been made to define the most appropriate materials for weaving at the scale of architecture. Focusing on natural materials, different species of Willow (*Salix*) and Rattan, (colloquial name given to a large group of climbing palms) have been analyzed in order to determine the most appropriate material towards the realization of a full scale architectural system. Several families of willow have been studied according to their geometrical characteristics and elastic behavior, together with various mechanical tests and FEM analysis (Fig.4). Generally, willow sticks exhibited several limitations as insufficient length and non-constant cross-section, which tends to diminish proportionally towards the top end, making them inappropriate for larger scale applications. Moreover, the section typically has an inner core and irregularities that do not allow an accurate computer simulation of its bending behavior.

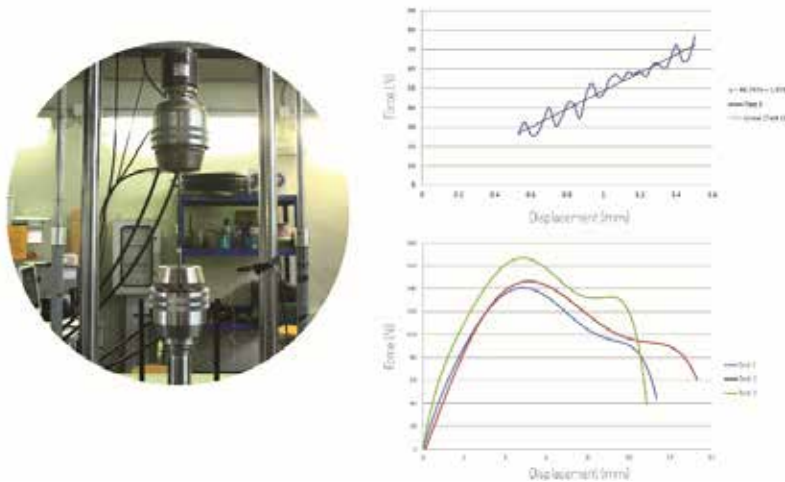


Figure 4: Tensile test on willow. The results evidence strong irregularities between the different tests

Commercial rattan is generally stronger than traditional European wicker materials (Saunders 1990). It presents an even distribution of vascular bundles over the stem, diversified cross-section consisting of fibers with equal length and equal cap size, conducting cells and ground parenchyma of small cells with polylamellate structure (Dransfield et al. 2000) (Fig.5). These anatomical features and the constant sectional composition and diameter allow for a computational prediction of its behavior. Moreover, its mechanical properties have proved to be relevant for concrete reinforcements (Obilade et al. 2014) as well as for bone replacement, due to its porous structure permitting blood vessels and other accessory tissues to penetrate it, allowing seamless integration into the host bone (Eichenseer et al. 2009). Rattan's considerable length (up to 100 meters) and vascular morphology contribute to define a lightweight material with high tensile properties and elastic bending capabilities. These characteristics of rattan made it a suitable material for the research development.

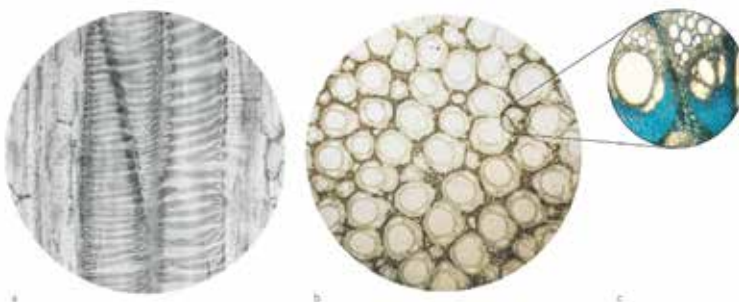


Figure 5: Rattan cellular structure. A. Longitudinal section of protoxylem elements (part of the vascular bundles), (Tomlinson, 2001); B. Transverse section of vascular architecture; C. Vascular bundles with prominent metaxylem vessel (photo J.B. Fisher)

Weaving patterns: typologies and logics

Weaving patterns owe their mechanical performance to the frictional and bending resistance generated by the interlacing sticks. Thus, the interlacing configuration of simple elements produces a highly redundant ensemble with emergent structural properties, which are a direct consequence of the pattern characteristics. A strict correlation between stick typology and weaving pattern does exist, as the choice of the material section naturally reduces the range of pattern variation. For the purpose of the experiment a circular “rod” stick section has been favored over a plated one. The mechanical properties of each material allow specific operations of twisting or bending. Five typical pattern typologies have been analyzed: Coiling, Twining, Plaiting, Linking & Looping, Striking & Stranding (Fig.6). Their physical and digital testing, in terms of algorithmic description, have determined the choice of the Striking & Stranding typology which exhibited good mechanical resistance (Fig.7). Furthermore, it is relatively easier to be manufactured and it provides a less constrained bending curvature, offering the opportunity to be tuned according to extrinsic parameters.

Figure 6: Digital modelling of traditional weaving patterns. Single tensor pattern (5a); two crossing tensor pattern (5b); three crossing tensor pattern (5c); triple active weft pattern (5d); double crossing weft pattern (5e).

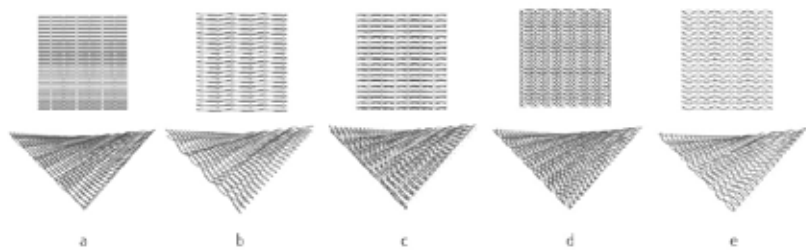


Figure 7: FEM analysis of a typical Striking & Stranding pattern and its minimum and maximum principal stresses



Bending behavior: simulation and computation

After the selection of the pattern typology, the experiment focused on testing the actual bending behavior of a typical rattan stick and modelling its variable geometrical configurations within the digital environment. This required an understanding of the intrinsic material behavior and finding a convenient way to employ it into the digital model. An accurate simulation of the bending behavior was obtained through the use of Kangaroo for Grasshopper/Rhinoceros, a well-known add-on which embeds physical behavior directly in the 3D modelling environment. Kangaroo is essentially a Particle-Spring System used for form-finding. Rattan sticks bend elastically within specific limits, which vary in proportion with the level of hydration. This behavior was instrumentally measured determining the minimum elastic bending radius. Wet rattan sticks showed considerably higher bending elasticity, which allowed describing material characteristics in two phases, in dry and wet configurations (Fig. 8).

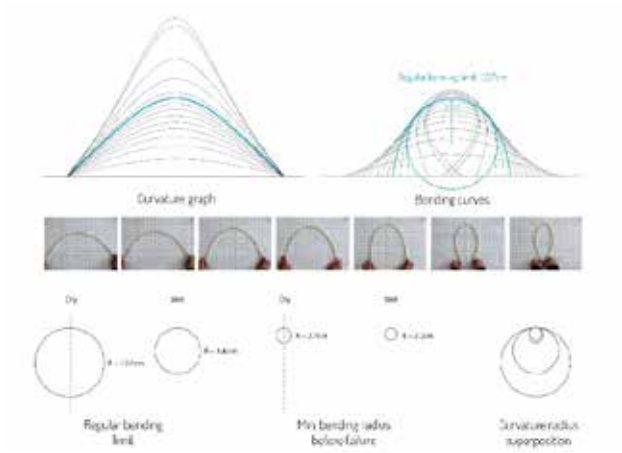


Figure 8: Bending properties of rattan. A. Geometry of bending; B. Radii of rattan bending in dry and wet condition

Computing large sets of sticks would require multiple running simulations in Kangaroo, and consequently reduce the ability to test and tune different weaving patterns. For this reason, a faster modelling method has been developed to evaluate more pattern configurations, making use of B-Spline curves. Splines are originally conceived as curves that closely approximate the shape taken by bending material objects, which minimizes the elastic energy. They are defined by a set of control points, tangents to the curve at these points, and local weighting factors (Fig. 9). These parameters have been precisely set according with the results of the Particle Spring simulation to be finally validated (Fig. 10).



Figure 9: Curvature correspondence between a B-Spline curve and a bent rattan stick through the tuning of its control points

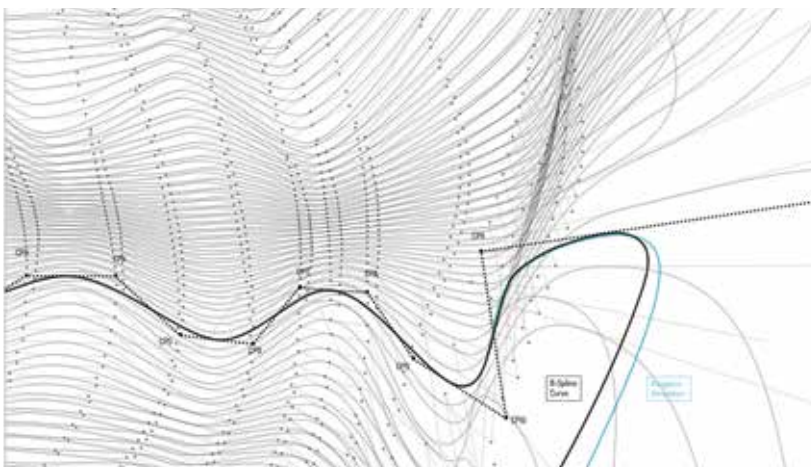
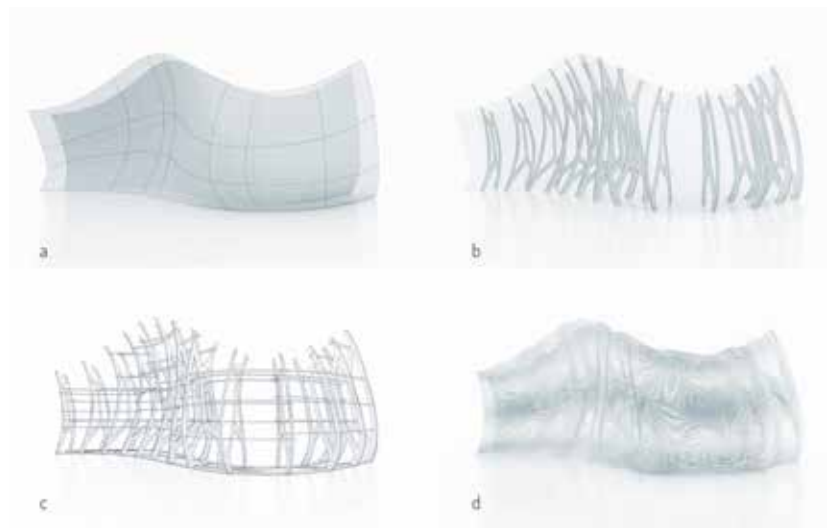


Figure 10: Comparison of bending behavior description between a B-Spline curve, defined by a series of control points, and a curve generated by the Particle-Spring System of Kangaroo

Overview of the design process

The design experiment is based on a two-directional weaving structure, which is composed by two sets of elements interlaced in a variety of configurations (Ranjan 1985). In this specific case, the vertical warp elements are considered “passive” foundations which define the overall morphological characteristics, while the weft intersecting elements are considered active as they are using bending and frictional strength to confer resistance to the structure. The design process is developed parametrically within Grasshopper. It interprets this structural scheme and embeds the material features following several steps. Starting from an overall sinuous surface (Fig.11a), which is statically stable, a set of poplar plywood warp elements are defined by the discretization of the initial surface and serve as vertical support for the structure (Fig.11b). After temporary horizontal scaffolding are designed (Fig.11c), a rattan weft system, tuned according to differential screening ratios, is generated with the specific rattan curvature characteristics and limits (Fig.11d).

Figure 11: The complete Weaving Enclosure constructive process. Morpho-active surface (a); Plywood Warp Elements-Controlling overall geometry and pattern (b); Construction Skeleton (c); Rattan Strand-based Weft System with differential screen ratio (d)



Parametric warp system

A fundamental role in the design of the weaving system is played by the definition of a parametric family of vertical warp elements. Traditional warp elements in weaving are constituted by a single stake element. In this case, shifting to the architectural scale, the single elements have been transformed into a more complex rib formed by a couple of coplanar external stake elements, linked together with an inner support. A shared topological configuration is described by ten control points, which represent a set of parametrically defined links generated in order to optimize the structural rigidity of the single rib, as well as to minimize the material used and to consider the fabrication constraints. Moreover, to further reduce weight, each segment of the rib was parametrically dimensioned according to its length, span and height. Similar to traditional basketry, the disposition of the vertical warps drives the overall shape of the prototype. Hence controlling the position of the ribs is fundamental to determine overall spatial configurations of the system, adaptable to its final location. The associative definition of the warp system allowed the possibility to vary the form of each single warp element, controlling differential height, width and curvature (Fig.12). The number of ribs, shape and orientation in space are then set within the domain of possibilities previously determined by fabrication and material constraints.

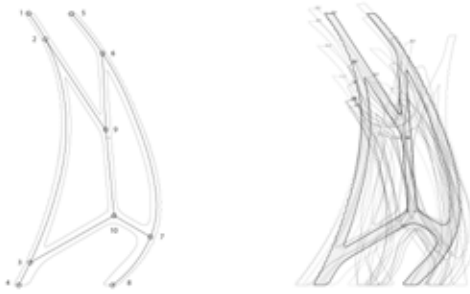


Figure 12: The vertical stakes are conceived as a family of elements which share a common topology defined by ten control points. The associative model allows for variations in order to reflect the needed integration of structural and material behaviors over the shape

Programmed weaving pattern

Shifting from baskets to architecture involves a change of scale, and requires the reconsideration of the weaving technique in its dimensional and structural parameters, which cannot be linearly scaled. In two-directional weaving patterns, the overall resistance is achieved by the multiple bending and frictional resistance between the various warp and weft elements. A system of parametrically-controlled holes on the two external edges of each vertical warp element defines a stable and accurate structural system based on frictional resistance. This configuration allows to program precisely the position of the weft elements and generates even stronger friction than traditional weaving. In fact, a script allows to parametrically adjust the dimension and position of the holes on both sides of each rib, mediating between different factors, such as maximum length and bending stiffness of the sticks. By controlling the pattern parameters, different curvatures are imposed to the rattan sticks, and the local stiffness control is enhanced. Consequently, the more the rattan is bent, the higher is the magnitude of force applied on the wooden warps, increasing the friction between the two elements, and in turn the rigidity of the model (Fig.13).

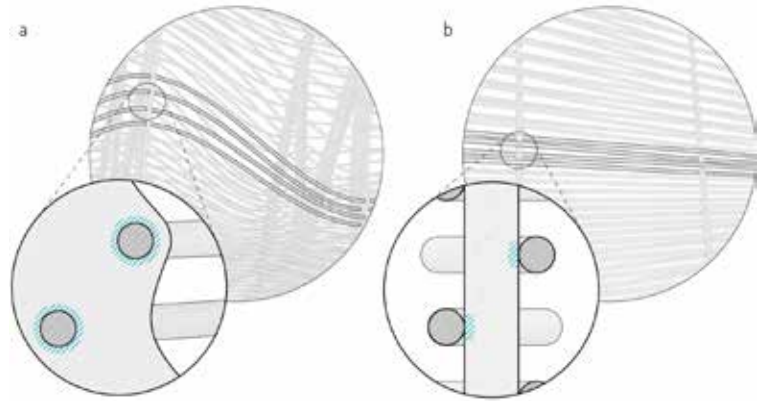


Figure 13: Curvature analysis of wefts in the digital model. The more the rattan is bent the more force is locally applied on the wooden warps, increasing the friction between the warps and wefts

In traditional weaving systems the plane of action of the warps is mainly horizontal, and consequently the friction generated by the interaction with vertical wefts is constant in position and angle. On the contrary, in the system outlined in this paper, a more complex frictional scheme is generated by the combination of two main aspects: the shape of the vertical elements and their disposition, which creates variable curvatures to warp elements in the horizontal direction, and the pattern, which generates variable forces in the vertical direction. Friction forces derive from the contact of the entire section of the strand with the surface of the hole, in contrast to traditional weaving, where only small areas are usually in direct contact (Fig.14). Embedded in the computational model, the control over such a complex system allows the creation and definition of a wide range of different local frictional resistances, both in their amplitude and location. Moreover, the control over the holes' disposition is tuned according to extrinsic performative criteria to generate a field with differential screening ratios given by the visual overlap of two external weft sets. By varying the local density of holes along the ribs sides

it is possible to vary the density of sticks throughout the whole structure, both controlling local maximum and minimum visual permeability values and generating the overall visual effect. To further increase the possibility of variation in density, a second direction of movement on the plane of the rib has been added perpendicular to the tangent of the rib at each point, which allows a visual superimposition of the strands, amplifying the differential screening field.

Figure 14: Warp-Weft friction scheme. A. Structural Weaving System allows friction in different areas according to rattan curvature direction; B. Traditional weaving creates a punctual friction between warp and weft elements



Machinic programming

The prototype has been realized in a hybrid fabrication set, where the plywood warp elements are produced via digital fabrication and the rattan strands are manually assembled. The fabrication was processed through an industrial 3-axis CNC milling machine, which was preventively tested (Fig.15). Several fabrication constraints have been discovered, such as dimensions of the working areas and rubber suction cups to hold the plywood sheets to be placed to ensure milling precision and operational stability of the processed component. These fabrication constraints have been embedded in the original design of the warp elements. To process the cutting paths, typical vectorial files proved insufficient to provide all the needed machining operations. In this case an optimized CNC format G-CODE was generated from Grasshopper to directly provide the machines with pre-processed working trajectories. This proved to be, during the process, a necessary medium to produce unconventional wooden elements in the case where too many production variables would overcome the ability of an expert operator to handle the wooden production correctly.

Figure 15: CNC milling of a poplar plywood vertical warp and an horizontal support



Digital crafting

After the process of fabrication of the warp elements, a manual process of assembly and weaving has been carried out (Fig.15). To fix the programmed shape and keep vertical ribs in position, avoiding movement and deformations, a series of temporary horizontal scaffoldings were designed and CNC cut to create a statically stable skeleton. After a series of tests, the best technique to weave the 760 rattan sticks proved to be by working on each module separately, weaving the sticks from bottom to top parallel on the two surfaces of each module. Customized holes on the first and on the last rib of each module have been milled to host post-tensioned stick elements fixed by external screws. Hot water has been used to wet the sticks during the weaving process in order to make the fibrous structure of rattan softer, in order to handle the high curvature of sticks needed to be obtained and to allow it to form smoother curves more easily.



Figure 16: Manual work is still a fundamental step in the weaving process. Right. Screwing process for rattan post-tensioning

RESULTS

Material definition

Different results emerge from the proposed methodology. Investigating the material system highlights that weaving patterns base their mechanical properties on the frictional and bending resistance generated by the interlacing sticks. The physical and digital testing, in terms of algorithmic description, determines the choice of the Warp & Weft pattern typology which exhibits good and constant mechanical resistance.

Design process

In the design phase, a methodology for the generation of lightweight weaving structures has been developed, allowing the control of the system of holes, precise programming where the wefts are passing, but also generating even stronger friction than traditional weaving, mediating with material constraints such as maximum length and bending resistance.

Proto-tectonic weaving system

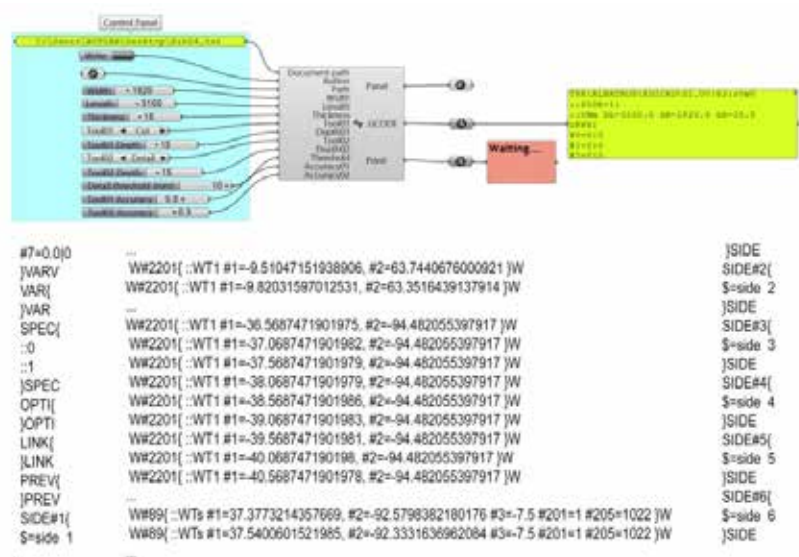
The previously described weaving material system as well as the computational embedding of its bending behavior provided a matrix of information which was incorporated within the associative design

environment of Grasshopper in order to describe a manifold of possible weaving configurations. Working with this design methodology, the research focused on the design of a proto-tectonic weaving system, as expression of a coherent development between material, structure and form, and the realization of a full scale prototype. The research seeks to extend the limits of traditional weaving crafting by pre-computing its configuration and anticipating its morphological and assembly characteristics. In this sense, part of the implicit material computation of weaving is designed within the digital environment. A fundamental part of the experiment was the creation of a lightweight self-standing system, capable to partition interior spaces and provides a differential screening experience, to mediate environmental light conditions and user experience. The antique tradition of crafting is enhanced by digital manufacturing tools, resulting into a low-tech construction system where cheap raw materials are adaptively organized to establish a highly resistant structure able to respond to contextual situations.

Hybrid fabrication

A fabrication protocol has been developed and processed through an industrial 3-axis CNC milling machine. An optimized CNC format G-CODE (Fig.17) has been generated from Grasshopper to directly provide the machines with pre-processed working trajectories.

Figure 17: A G-CODE generated from Grasshopper in order to directly provide a CNC machine with pre-processed working trajectories



Proof of concept: Weaving Enclosure

A final prototype, called Weaving Enclosure, has been designed and realized as proof of concept for the design workflow and to test the physical implementation of the construction system (Fig.17). The prototype has been built as the final output of an international research workshop where a joint group of researchers and students have designed, fabricated and built the installation within a building hall that belongs to the Faculty of Architecture and Society. The final design implements the described system with a sinusoidal installation of 7.4 by 3.3 meters, with a variable height ranging from 1.8 to 2.9 meters. The lightweight prototype is composed of 79.2 Kilograms of 15mm thick poplar plywood warps and 75.7 kilograms of 1.85 kilometers of rattan, divided in 760 different pieces, which range from 1.85 to 3.15 meters in length. The whole structure has been assembled in four autonomous modules composed by four vertical ribs each.



DISCUSSION

Reiser and Umemoto in *Atlas of Novel Tectonics* stated that the currently changing notion of architectural design is a consequence of the shift from geometry as an abstract regulator of the materials of construction, to a notion where matter and material behaviors are implicated in geometry itself (Reiser and Umemoto 2006). Following this paradigm, speculative research has promoted a novel material awareness empowered by the advancements in computing and digital manufacturing (Naboni and Paoletti 2015). This paper presents a specific design approach to the material performance and expressivity of weaving, and reinterprets this antique crafting technique as a novel construction system. Integrated computational tools are fundamental to this approach, supporting analysis of non-standard materials and the design of their dynamic behavior. Through this approach, a proto-tectonic partitioning system has been developed proving the high integration between performance and aesthetics, between the absolute precision of the digital process of design and fabrication, and the implicit imperfection of handcrafts and natural materials. The adopted approach opens interesting perspective for the development of computationally assisted low-tech systems in architecture.

Figure 18: Final design configuration of the Weaving Enclosure. The self-standing structure is 7.4 meters long, 3.3 meters in width and reaches a height of 2.9 meters.

Figure 19: Weaving Enclosure shapes the space and orient the view, creating a variable experience for the user





Figure 20: The variable density of rattan wefts generates a differential screening ratio along Weaving Enclosure surfaces

ACKNOWLEDGEMENTS

The contents of this paper are reflecting and extending a research work previously published in “Weaving Enclosure: Material computation and novel forms of crafting” (Naboni and Breseghello, 2015), which has been presented at the XIX Congress of Iberoamerican Society of Digital Graphics. We wish to thank Prof. Ingrid Paoletti and our colleagues from ACTLAB for their support of this project, in particular Bernardo de Cossio who conducted initial tests and research on materials; Paolo Alborghetti and the students participating in *Unexpected MateReality Workshop 2014*. We express our gratitude to *GD Guidetti e Dassi* for supporting the CNC fabrication and *Laboratorio Prove Materiali* and *Laboratorio Modelli e Prototipi of Politecnico di Milano*.

REFERÊNCIAS

DRANSFIELD, J., TESORO, F. AND MANOKARAN, N. Rattan: current research issues and prospects for conservation and sustainable development. Food and Agriculture Organization of the United States, 2010.

EICHENSEER, C., WILL, C., RAMPF, M., WEND, S. AND GREIL P. Biomorphous porous hydroxyapatite-ceramics from rattan (Calamus Rotang). *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. New York: Springer US, 21(1), 131-137, 2010.

GRIFFEN, C. S. Weaving as an Analogy for Architectural Design. *Paradoxes of Progress: Architecture and Education in a Post-Utopian Era*. Proceedings, New York: 89th ACSA Annual Meeting. 478-483, 2001.

HENSEL, M., MENGES, A. AND WEINSTOCK, W. Emergent Technologies and

Design: Towards a Biological Paradigm for Architecture. New York: Routledge, 2010.

HENSEL, M. Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment. London: John Wiley & Sons, 2013.

MENGES, A. Material Resourcefulness. Activating Material Information in Computational Design. In: *Material computation: Higher integration in morphogenetic design*, ed. Menges, A., AD, Architectural Design, London: John Wiley & Sons, 216, 36, 2012.

MUSLIMIN, R. Learning from Weaving for Digital Fabrication in Architecture. *Leonardo*, Baltimore, 43 (4), 340-349, 2010.

NABONI, R. AND BRESEGHELLO, L. Weaving Enclosure: Material computation and novel forms of crafting. SIGRAFI 2015. XIX Congress of Iberoamerican

- Society of Digital Graphics. Conference proceedings. Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, Brazil. p. 384 – 391, 2015.
- NABONI, R. AND PAOLETTI, I. Advanced Customization in Architectural Design and Construction. New York: Springer US, 2015.
- OBILADE, I.O., OLUTOGE, F.A. Flexural Characteristics of Rattan Cane Reinforced Concrete Beams. The International Journal Of Engineering And Science (IJES), 3 (6), 38-42, 2014.
- OTTO, F. Minimal Nets. Institute for Lightweight Structures, University of Stuttgart, Stuttgart: K. Krämer, 1969.
- OXMAN, N. Digital Craft: Fabrication Based Design in the Age of Digital Production. Workshop Proceedings, Ubicomp 2007: International Conference on Ubiquitous Computing. September; Innsbruck, Austria, 534-538, 2007.
- OXMAN, N. Material-based design computation. Thesis (Ph. D.). Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2010.
- RANJAN, M. P. Structure of Bamboo Baskets. A classification of forming processes, weave structures and significant details. In: GAB, S., DRUSEDU, H. & HENNIKE, J. (Ed.), IL-35 Bambus – Bamboo. Stuttgart: Institute für Leichte Fachentragwerke, 356 – 367, 1985.
- REISER J, UMEMOTO N. Atlas of novel tectonics. New York: Princeton Architectural Press, 2006.
- SAUNDERS, R. Wicker Furniture: A Guide to Restoring and Collecting. New York: Three Rivers Press, 1990.
- SEMPER, G. AND MALLGRAVE, F.H. The Four Elements of Architecture and Other Writings. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- THOMSEN, M. R. AND TAMKE, M. Digital Crafting: Performative Thinking for Material Design. In: Peters, B. and Peters, T. (Ed.). Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design. London: John Wiley & Sons. 243-253, 2010.
- TOMLINSON, P.B., FISHER, J.B., SPANGLER R.E. AND RICHER R.A. Stem Vascular Architecture in the Rattan Palm Calamus (Arecaceae-Calamoideae-Calaminae). American Journal of Botany, St. Louis, 88(5): 797-809, 2001.
- WIKIPEDIA. Basket Weaving: https://en.wikipedia.org/wiki/Basket_weaving. Access: 09 Jan. 2016.

Correspondências:

Roberto Naboni

roberto.naboni@gmail.com

Luca Breseghello

breseluca@gmail.com

COMPUTATIONAL DESIGN AND SIMULATION OF BENDING-ACTIVE AUXETIC STRUCTURES

ARTIGO

Desenho Computacional e Simulação de Estruturas Auxéticas de Flexão-Ativa

Roberto Naboni¹, Lorenzo Mirante²

RESUMO: O artigo investiga a potencial aplicação de estruturas auxéticas na arquitetura através da combinação de métodos de desenho computacional e Manufatura Aditiva (MA). Essa classe de materiais apresenta comportamento interessante relacionado à característica pouco comum de possuir coeficiente de Poisson negativo, ou seja, ao contrário de outros materiais, quando tracionados expandem-se transversalmente e quando comprimidos contraem-se transversalmente. Explora-se um novo campo de pesquisa e design onde diferentes arranjos de auxéticos são estudados com intuito de informar um processo de form-finding de estruturas de cascas nervuradas sinclásticas de flexão-ativa (bending-active). Metodologias computacionais foram empregadas para visualizar o comportamento dinâmico destas estruturas utilizando Sistemas Massa-Mola. Princípios para o projeto e fabricação de cascas nervuradas auxéticas são investigados através de fabricação aditiva em diferentes escalas. Este processo é empregado para produzir modelos em escala úteis para a compreensão do comportamento auxético, assim como visionar a fabricação de mega-estruturas auxéticas com organização micro estrutural ótima. A resistência à flexão destes sistemas é cautelosamente controlada pelo uso de arranjos de enchimento variável informados por análise estrutural. Finalmente, é proposto um protótipo de casca nervurada em tamanho real como estudo de caso, em conjunto com um novo conceito para sua construção em fabricação aditiva in situ.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais Auxéticos; Desenho Computacional; Form-Finding; Cascas Sinclásticas; Impressão 3D.

ABSTRACT: The paper investigates the potential application of auxetic structures in architecture through the combined use of computational design and Additive Manufacturing (AM) methods. This class of materials expresses an interesting behavior related to the unusual characteristics of a negative Poisson's ratio where, as opposed to other materials, the act of stretching causes shrinking and the act of compressing results in bulging. The work explores a new research and design field where different auxetic patterns are studied to support a form-finding process of bending-active synclastic gridshells. Computational methodologies have been implemented to preview the dynamic behavior of such structures through form-finding simulations based on Particle Spring Systems. Principles for the design and fabrication of auxetic gridshells are studied through multiscale AM. This is employed to produce scaled models useful for a direct understanding of the auxetic behaviour, as well as to envision the production of mega-structural auxetics with optimized microstructural organization. The understanding of their bending capacity has been explored with the use of variable infill patterns informed by structural analysis. Finally, a design for a full scale gridshell prototype is proposed along with a novel concept for its on-site additive manufacturing.

KEYWORDS: Auxetics; Computational Design; Form-Finding; Synclastic Shell; 3D-printing.

¹ACTLAB - Department ABC, Politecnico di Milano

²ACTLAB, Politecnico di Milano

Fonte de financiamento:

-

Conflito de interesse:

Declara não haver

Submetido em: 26/07/2016

Aceito em: 25/10/2016

How to cite this article:

NABONI, R.; MIRANTE, L. Computational Design and Simulation of Bending-Active Auxetic Structures. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 59-71, jul-set. 2016.



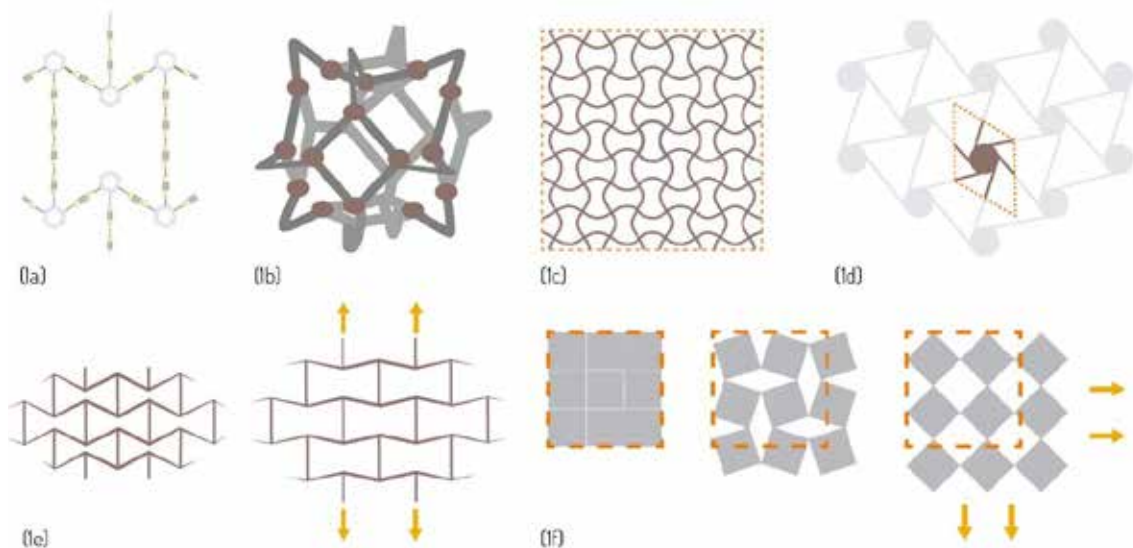
INTRODUCTION

Typically, the materials to which we are accustomed have positive Poisson's ratio, that is, the act of stretching is expected to cause shrinking and the act of compressing results in bulging. However, this common knowledge has been challenged by auxetics, a class of materials which exhibit the unusual property of becoming wider when stretched and narrower when compressed (Evans, 1991). This results from having a negative Poisson's ratio (ν) - the ratio of the lateral contractile strain to the longitudinal tensile strain for a material undergoing tension in the longitudinal direction (Evans, 2000). This class of materials has a relatively recent history, even if they have been known among scientists for about a century. One of the earliest known publications on this topic is titled *Foam Structure with a Negative Poisson's Ratio* (Lakes, 1987), but the term auxetic first appeared in the scientific article *Molecular Network Design* (Evans et al, 1991). It comes from the Greek αὐξητικός (auxetikos), literally translated in "which tends to increase" and has its root in the word αὐξίσις, or *auxesis*, signifying "an increase". Auxetics can be essentially considered as metamaterials which are artificially engineered to gain emerging properties and functionalities otherwise unattainable in natural materials (Chaturvedi, 2009). They rely on specific spatial arrangements rather than material composition, and for this reason they are organized in patterns with precise shape, geometry, size, orientation and arrangements. Performance and behaviour are direct consequence of the design of their inherent architecture. Expanding this concept, the research investigates the architecture of auxetic materials towards their implementation in architectural structures, taking advantage of their unique properties.

Mechanic features and current applications

The deformation mechanisms of auxetics depend on their hinge-like structure, which flex outwards when stretched. Their spatial organization in particularly-shaped low-density patterns allows the hinge-like areas of the auxetic microstructures to flex. The study and the computational development of these patterns offer an interesting perspective for their future applications (Fig. 1). Auxetic structures exist in many different scales: from the microstructural and molecular to the mesoscopic and macroscopic scales (Evans, 2000).

Figure 1: Examples of auxetic structures. 1a) molecular auxetic, 1b) 3d re-entrant, 1c) sinusoidal lattice, 1d) chiral, 1e) 2d re-entrant, 1f) square rotating rigid units.



A large number of auxetic structures have been developed, such as foams, fibers, or composite materials, and many other examples can be found in nature as well (Liu, 2010). In this research the design and fabrication of macro-scale auxetics is explored for architectural applications.

Nowadays auxetic structures have found several applications in the biomedical industry (Scarpa, 2008) for the design of stents and prostheses (Abdelaal, 2008); in the creation of filters for chemical processes - auxetic foams mostly (Scarpa, 2015); in the generation of auxetic fibers for crash helmets/body armours (Sanami, 2014); as well as in the production of panels with high energy/vibration absorption coefficients (Yang, 2013). Interestingly, transforming a well-known material into its auxetic configuration often offers improved mechanical features. Nevertheless, due to their low density and complex structure, auxetics are inefficiently manufactured with traditional processes, which involve complex multistep procedures with heat-compression molding. For this reason, current applications are generally restrained to high-tech fields. In medical and chemical sectors auxetics are mainly used for their capacity to variegate their porosity, whereas in medical, chemical engineering and in sport applications they are mainly exploited for their specific mechanical properties.

Properties of auxetic structures

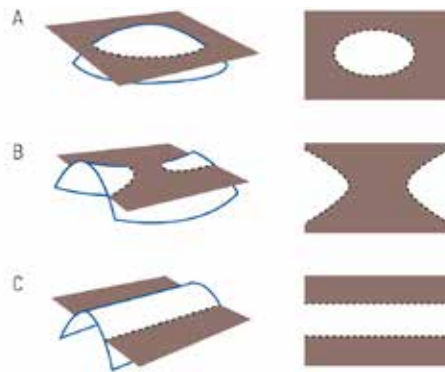
The interest in auxetic structures experienced a remarkable spike during the last decades (Liu, 2006). A set of five fundamental characteristics of auxetic structures, actively explored and applied in various fields of research, can be outlined (Liu, 2010):

- Synclastic curvature: the capacity of auxetics to form dome-like, synclastic surfaces when bent (characterized by a positive Gaussian curvature (K) at every point of the surface);
- Compressive strength and shear stiffness: the capacity of auxetic structures to resist forces both in compression and shear;
- Indentation resistance: the capacity of auxetic structures, mostly of foams, to shift more mass under the point of compression;
- Variable permeability: the capacity of auxetic structures to compress and expand, causing a variation in their porosity;
- Energy absorption and dissipation: the capacity of auxetic structures to absorb and dissipate the energy received from another body.

Synclastic behavior

Shear stiffness and synclastic curvature are the two fundamental features investigated within this research. Shear stiffness can be explained by the relationship between the Poisson's ratio ν and the shear modulus G defined by Hooke's law, which states that when ν decreases to -1 , G increases notably. In other words, the material becomes difficult to shear but easy to deform volumetrically (Liu, 2010). The second fundamental characteristic, regarding synclastic curvature, describes how planar auxetic structures tend to form a synclastic curvature when subjected to an out-of-plane bending moment - a behavior which is contrary to that of conventional elastic materials which display anticlastic curvatures when bent (Fig.2). The variation of a surface curvature is an effective parameter in defining different architectural results, and this research explores the computational form-finding of synclastic auxetic structures (Fig.3).

Figure 2: Typology of curvature 2a) Synclastic, 2b) Anticlastic and 2c) Developable.



The capacity of auxetics to generate synclastic curvatures suggests a perspective of development as a bending-active structure which defines complex curved geometries from the erection processes of planar elements that are elastically deformed. This creates advantages in the transportation and assembly processes. Curved structures are influenced by residual stresses in their load bearing behaviour and structural capacities (Lienhard 2014). Moreover, working with sufficiently elastic structures, it is therefore possible to envision a dynamic process of shape adaptation through the implementation of kinetic structures.

Objective

The objective of this research is to understand how auxetics can perform in architecture as bending-active structures towards the generation of lightweight synclastic gridshells. The generation of the form in this case might be directly driven and informed by the application of an out-of-plane bending moment and the physical behaviour of the auxetic layout to which it responds. Synclastic shapes in architecture are difficult to be achieved using traditional construction methods. Moreover, lightweight synclastic surfaces are currently limited to the use of inflated structures.

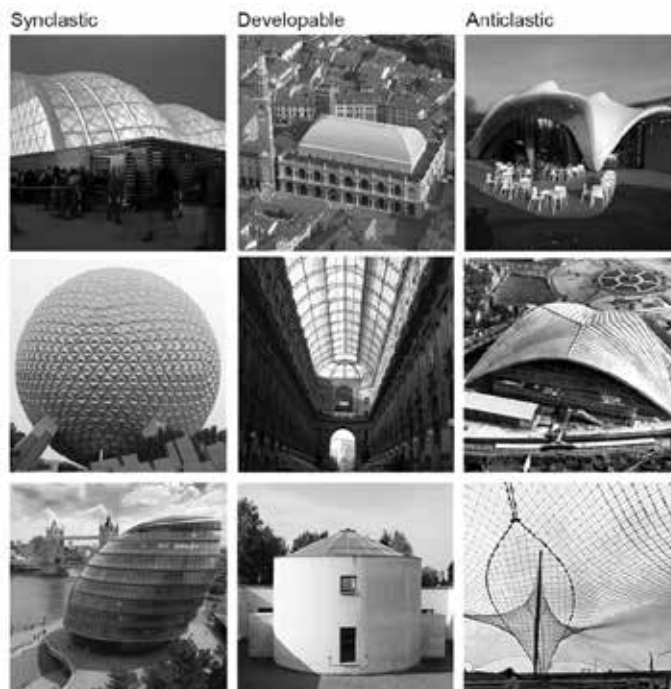


Figure 3: Architectural examples of different curvature typologies. In columns, from above: Synclastic: Shigeru Ban, Expo in Hannover, 2000 - Epcot Dome, Disney World, 1982 - Foster and Partners, London City Hall, 2002. Developable: Andrea Palladio, Basilica, Vicenza, 1614 - Giuseppe Mengoni, Galleria Vittorio Emanuele II, Milano, 1877 - Aldo Rossi, Scuola, Fagnano Olona 1976. Anticlastic: Zaha Hadid, Pavilion for Serpentine Gallery, London, 2013 - Emmanuel Pouvreau, CNIT, Paris, 1958 - Frei Otto, Expo Montreal, 1967.

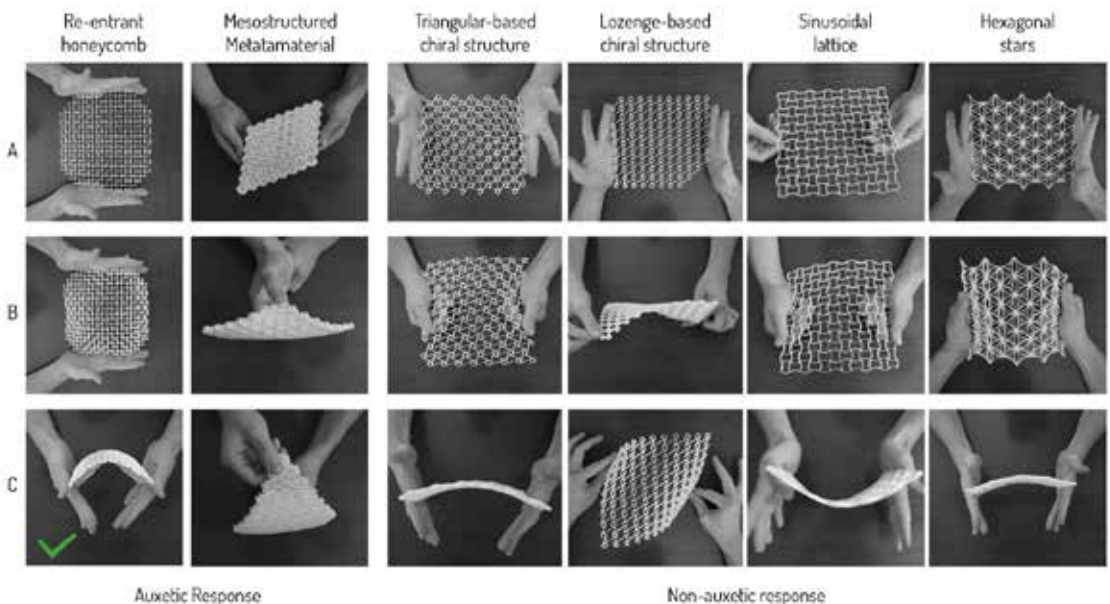
Considering the necessity to preview the dynamic behaviour of bending-active structures, the research implements a computational design methodology to simulate the form-finding of synclastic auxetic gridshells. Additive Manufacturing (AM) is used in different phases to prototype test models as well as to empirically investigate different material configurations, to tune and enhance the response of an auxetic pattern. Sub-goals of the research are: (i) implementing a convenient computational methodology to design and simulate auxetic bending behaviour in a controlled way; (ii) determining optimal auxetic patterns for their structural implementation in architecture; (iii) understanding the main parameters which affect the configuration of auxetic structures and their spatial articulation; (iiii) proposing custom infill patterns to modulate bending performance in auxetic components.

METHODOLOGICAL PROCEDURES

Parametric design of auxetic patterns

A variety of auxetic patterns exist and each of them is characterized by a set of parameters which influence their behaviour. In literature, auxetic structures are classified into several macro groups: re-entrant structures, chiral structures, rotating rigid units, angle-ply laminates, molecular auxetic structures, polymer models, origami-like structures and others (Mir, 2014). Scientific literature already tackled the topic of 3D origami-like auxetics and their potential applications in lightweight architectural structures (Schenk, 2010). Our research, on the other hand, focuses on two-dimensional auxetics whose architectural potentialities have not been yet fully explored. In contrast to origami-like auxetics, these types of auxetic patterns achieve synclastic curvature through the active-bending of structural elements rather than through the rotation of faces along edges. In the initial phase of research, different basic patterns have been explored and developed parametrically with the use of Grasshopper for Rhinoceros as lattice samples divided into a defined grid of 20 by 20 cells. After the digital models were designed, prototypes were materialized with a double extruder FDM printer using standard filament allowing for an intuitive understanding of the bending properties of the different patterns (Fig. 4).

Figure 4: Comparative analysis on 3d printer auxetic patterns. Horizontal rows show: A) relaxed state - top view, B) compressed state - top view, C) compressed state - lateral view. All the samples perform auxetic behaviour in the in-plane stretching, while only the Re-entrant honeycombs and mesostructured patterns show auxetic response also in the out-of-plane bending.



The comparative bending tests highlighted the 2D re-entrant honeycombs as a compelling design option for further research and development, given the enhanced synclastic curvature they are able to generate, their simple geometric configuration (Malgorzata, 2009) and ease of customization. The chosen pattern, called re-entrant honeycomb, is composed of indented elastic rods which are called Chevron Rods and inelastic rods which are called Parallel Rods (Fig. 5).

Figure 5: Schematization of rod typologies. The re-entrant honeycombs pattern is defined by two types of rods: the indented elastic rods called the Chevron rods and the inelastic rods which are known as the parallel rods

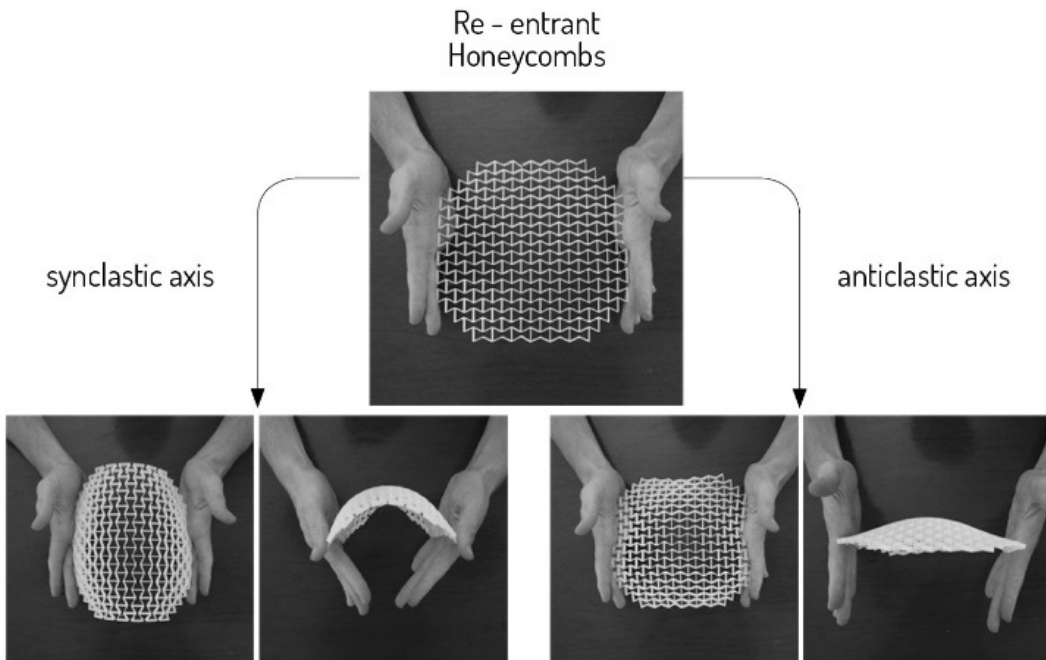


This bi-directional pattern reaches a different configuration according to the axial direction of bending forces (Fig. 6). Research and experiments on the creation of isotropic auxetic lattices can be found in literature (Lorato, 2010). In our research differential responses according to the bending direction is considered as an exploitable feature to generate less predictable architectural results. Empirical tests proved that forces applied on the indented sides produced synclastic curvatures in opposition with forces applied in the parallel direction.

Figure 6: Bending analysis on a 3d printed model showing two different curvatures obtained by changing the axis of action

Auxetic behavior in two dimensional patterns

The simulation of the bending behaviour of the auxetic pattern is fundamental in order to develop its architectural application and to preview configurations under specific load conditions.

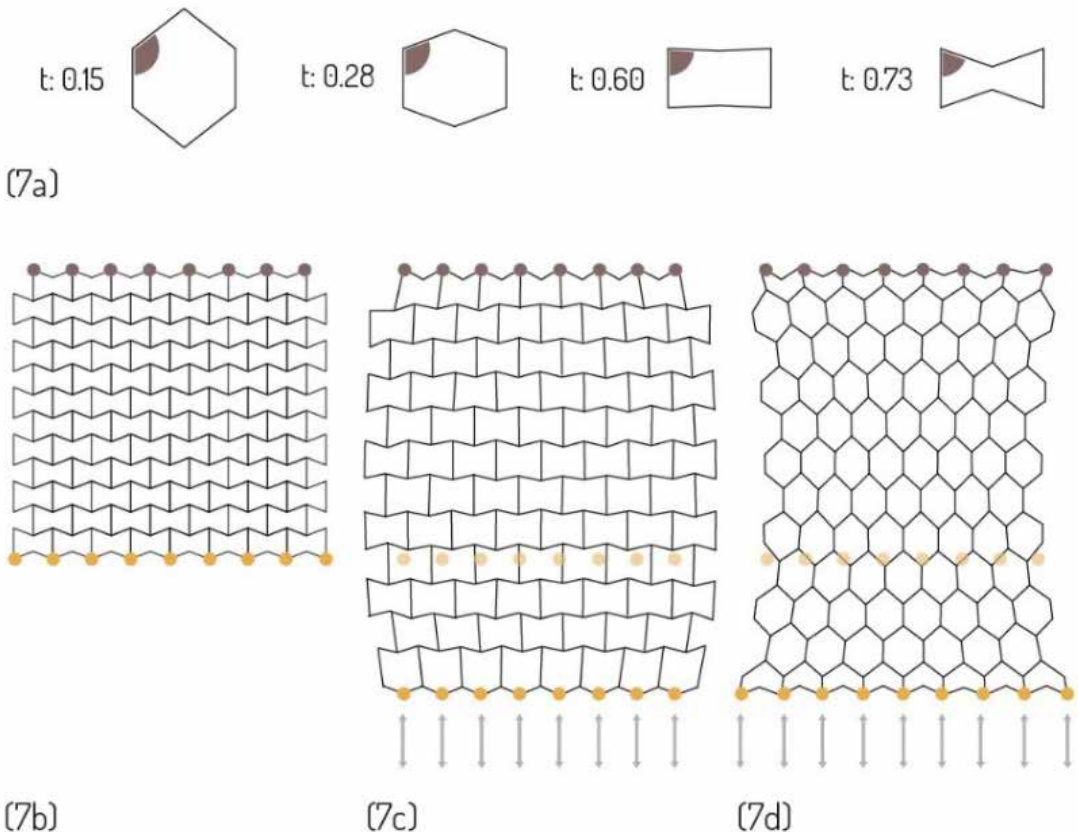


Considering the advantage of working within a common modelling environment, simulations were performed with the Particle Springs Engine (PS) Kangaroo for Grasshopper. This workflow guarantees the easy and effective testing of different pattern solutions by defining anchor points and forces applied to the structure, without the need of exporting geometries, a factor of great importance in evaluating many different patterns.

An initial test was performed on a default 2D re-entrant honeycomb structure with no extrusion on the z axis in order to understand the auxetic expansion/compression in relation to the variation of the parameter t , which defines the angles characterizing the hexagons (Fig. 7a). Through the variation of this parameter within a range from 0 to 1, it is possible to generate different kinds of hexagons: values from 0 to 0.5 define convex (and so non-auxetic) hexagons (Fig. 7d), while values ranging from 0.5 to 1 produce re-entrant hexagons (Fig. 7b and Fig. 7c). The simulation shows how the variation of this parameter influences the Poisson ratio and consequently the auxetic properties of the structure. Fig. 7 shows the results of this test, with Fig. 7b presenting the layout of the structure in a relaxed condition, Fig. 7c showing the expanding behaviour of the structure in an auxetic configuration ($t = 0.73$), whereas Fig. 7d reveals how the structure is stretched when turned into its non-auxetic version ($t = 0.28$) and the overall area decreases.

A subsequent test was carried out in a more complex situation where a homogeneous field of upward forces was applied to simulate out-of-plane bending. In opposition to the expected results, the simplified out-of-plane bending for an auxetic pattern ($t > 0.5$) resulted in a developable surface instead of a synclastic one. This is to be understood as a consequence of testing patterns with no extrusion in the z axis, which are unable to provide sufficient sectional resistance to produce a synclastic curvature.

Figure 7: The scheme shows how the change of the angular parameter t affects geometry and expansion geometry (7a). 7b) auxetic structure in relaxed state, 7c) auxetic structure in extension and 7d) non-auxetic structure in extension.

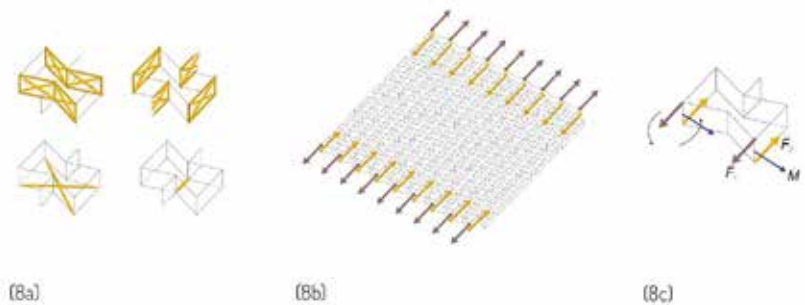


Form-finding of form-active auxetic structures

Subsequent tests were performed on patterns extruded in the z-direction, converted into meshes and tested in Kangaroo, where physical forces are assigned to simulate the actual physical response of the prototyped patterns. A first set of forces (i) named springs is used to keep both chevron and parallel rods stiff (Fig.8a), a second set (ii) of the same topology of forces is applied to guarantee the overall structure in tension (Fig.8b). A third set of forces (iii) is applied on two external edges of the structure to induce a moment of forces by the combination of linear vectors with opposite direction acting with equal distance from a pivot point (Fig.8d). Within internal and external loading configurations, a realistic bending behaviour is obtained by assigning the maximum stiffness parameters to all of the internal springs (i and ii), thus accurately reproducing the behaviour recorded in the physical prototype (Fig.9).

Once that the forces are set, several experiments testing the influence of variable sectional heights of the rods have been performed (Fig.9). With an extrusion of 1 unit the structure is not able to define a stable shell: the chevron rods are not rigid enough to support the stresses. Increasing the extrusion values up to 30 units, equivalent to 15% of the span, a higher rigidity were conferred. Values ranging from 2,5% to 10% of the span of the shell are considered suitable for a bending-active structure. Variation of the parameter t in structures with constant extrusion values determine the creation of synclastic and anticlastic shells, with values $t = 0.76$ and $t = 0.40$, respectively.

Figure 8: Forces set-up in Kangaroo. In 8a and 8b are represented the setting of internal springs; 8c represents general scheme of applied compression and tension forces;



BENDING TESTS - CONSTANT EXTRUSION VARIATION

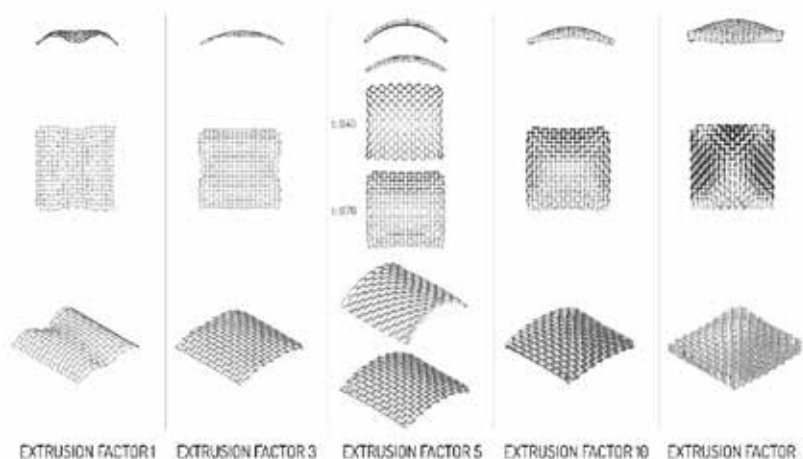


Figure 9: Test of the structure reaction to bending when thickness variations are applied.

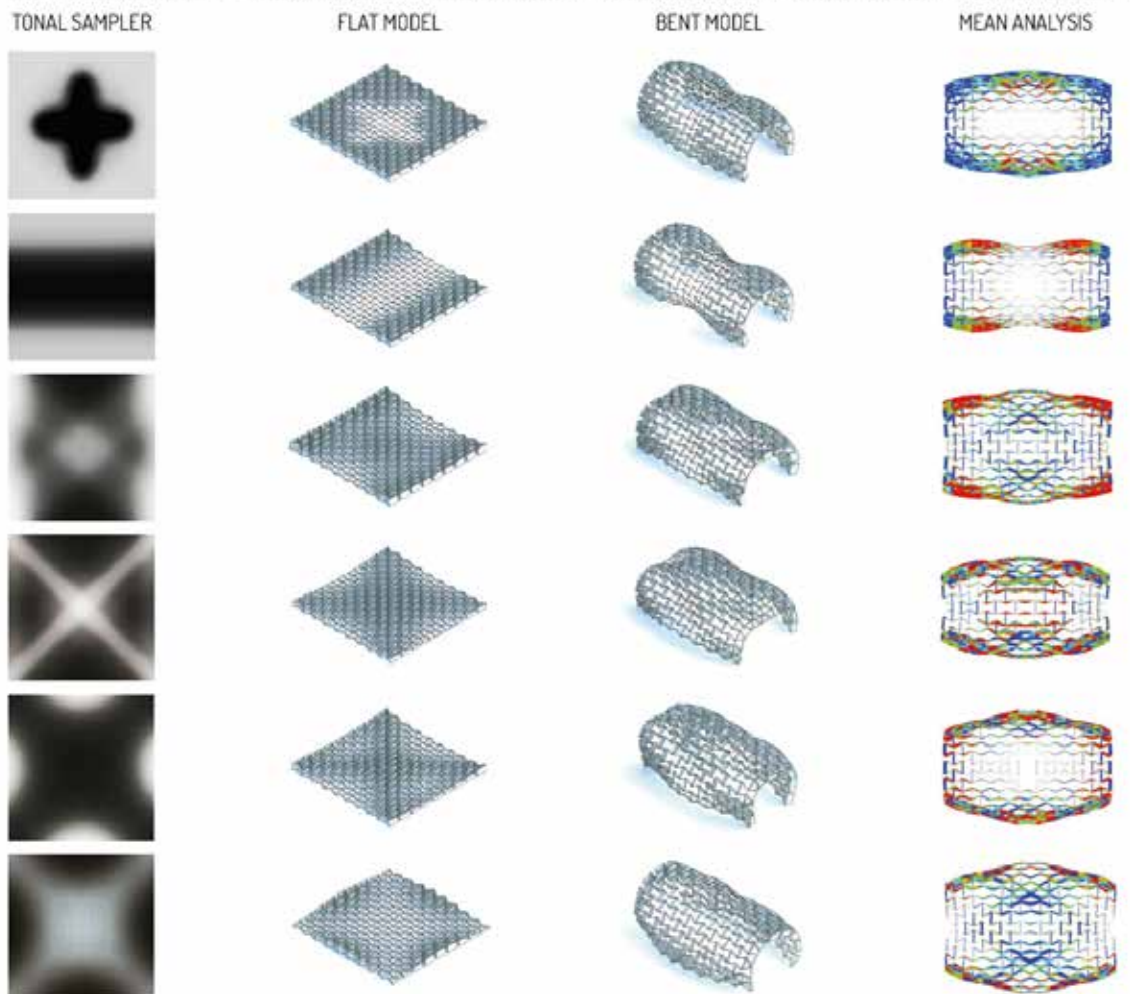
Finally various patterns with variable extrusions were generated by a tonal image sampler to understand the influence of complex height arrangements in the form-finding process (Fig.10).

Shape variations and microstructural optimization

A further implementation of the form-finding process is possible through the description of the different initial grid shapes, which consequently inform different curvatures of the actively-bent structure. Changes in the initial configuration allow for the possibility to customize the structural morphology in order to produce articulated spatial compositions while reducing the number of anchor points needed on the ground. The resulting shapes were evaluated with the Finite Element (FE) solver of Millipede for Grasshopper which displays stresses and previews zones with excessive deflection levels. This structural analysis provides feedback to inform the extrusion values in any point of the shell, optimizing structural performance and material usage. Moreover, the finite element solver revealed that the active-bending operations produced and internalized a different amount of stress in each rod. This analysis can be mapped to optimize bending capacity along the structure and control deformation and resistance of the shell at any individual point.

Figure 10: Differentiation of the pattern extrusion depending on the set of gradients. For each example is shown: flat configuration, bent configuration and curvature analysis of the structure.

BENDING TESTS - TONAL SAMPLER



Initial experiments in the material organization of the auxetic structure are conducted by the typology and density variation of a simple infill grid: more dense infill is placed where higher rigidity is required, whereas less dense infill is used for the rods where an elastic behaviour is required in order to guarantee the active bending of the overall structure (Fig. 11).

RESULTS

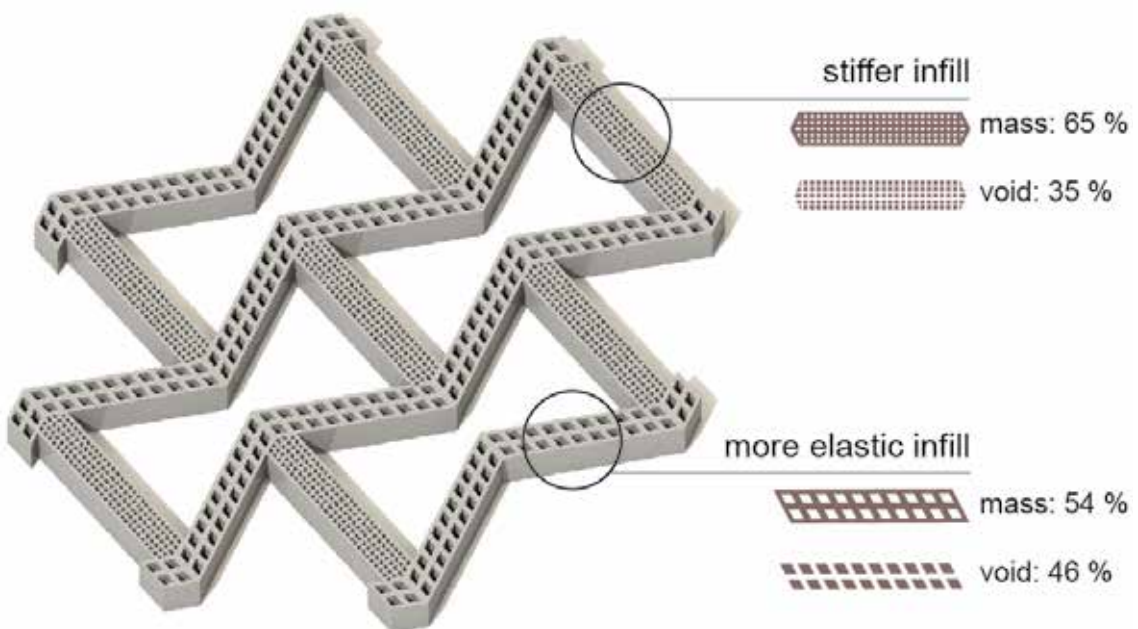
The design methodology described above produced various results in terms of computational workflow, in understanding the bending-active behaviour of auxetic structures and in how to fabricate them.

Pattern comparison

A Through this computational approach, a set of 3D-printed samples have been designed and tested showing typical in-plane auxetic behaviour. However, in contrast to what was expected, only a few have produced synclastic curvatures when an out-of-plane bending moment was applied (Fig.4). Among the tested typologies, only the re-entrant honeycombs and mesostructured materials demonstrated an actual synclastic curvature. A comparative test highlights the 2D re-entrant honeycombs as a compelling design option for further research and development given the enhanced synclastic curvature they are able to generate, their simple geometric configuration (Malgorzata, 2009) and ease of customization towards the design of form-active gridshells.

Bending-active gridshells are essentially generated by the torsion of the elastic chevron rods whereas inelastic parallel rods ensure stability to the structure. The rigidity of the parallel rods and the flexibility of the chevron rods are the parameter that mostly characterize 2D re-entrant auxetic structures. Auxetic patterns were also discovered to have a specific axis along which the structure displays a synclastic curvature - in the case of 2D re-entrant lattice this corresponds to the direction perpendicular to the chevron rods.

Figure 11: Infill with modulated stiffness for 3D Printing. More elastic infill is applied to the chevron rods to favour elasticity while the parallel rods are designed with stiffer infill.



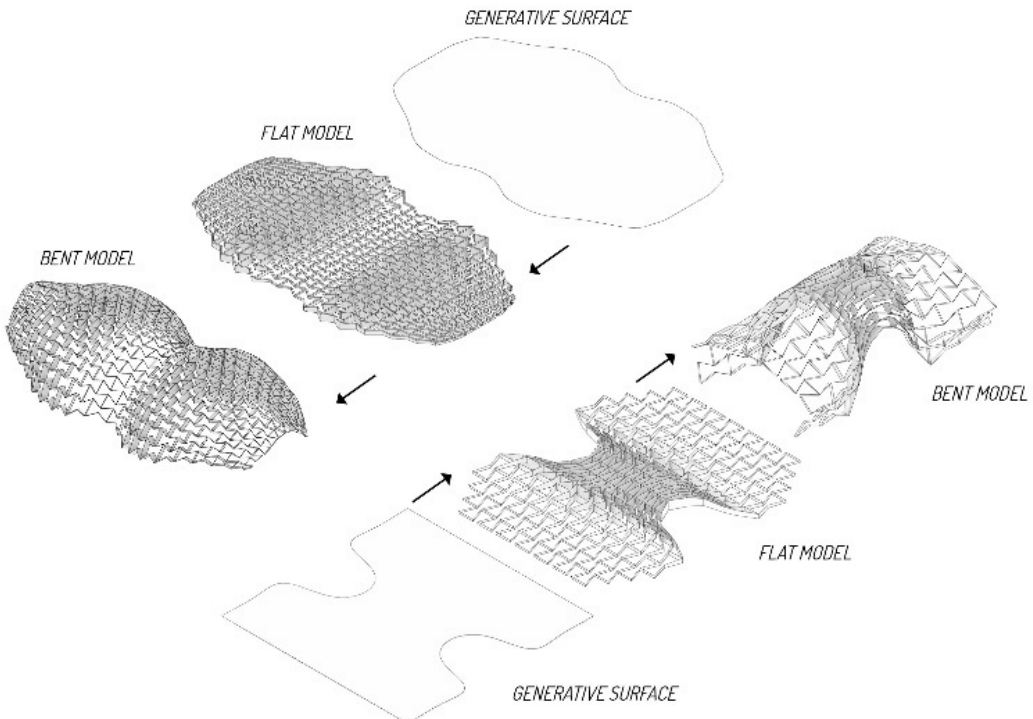
Parameters and pattern tuning

Auxetic patterns can be tuned in their response through the modification of simple morphological parameters which determine the material response of the structure. Variable extrusion height and thickness contribute to modulate the resistance to torsion, which influences the shape configuration of the gridshell. Differential infill patterns within the linear elements, which compose an auxetic cell, can be set to vary the behaviour of the chevron and parallel rods (see Fig. 10c). In particular, variations in the pattern topology affect the bending behaviour more than variations in density. An interesting comparison can be made with the work of Schumacher (2015) in which three-dimensional figures are subdivided into different areas and - depending on the degree of stiffness/elasticity that is needed - are filled with microstructures that once printed will confer specific elastic behaviours to each area.

DISCUSSION

Auxetic metamaterials have unique characteristics which are explored in their architectural potential by parametric modelling and particle spring systems. A workflow for the form-finding and analysis of bending-active structures based on auxetic patterns is proposed and effectively help to preview the bending behaviours of such structures. After an analysis of different options, the paper focuses on the study of 2D re-entrant structures which produce variably curved shells by the parametrization of a few parameters of the planar patterns (Fig. 12). Their capacity to bend and support different loads is fundamental for architectural applications. The research identifies Additive Manufacturing (AM) as the ideal production process to control the implications of an optimized microstructural organization in order to tune the response of auxetic mega-structures (Fig. 13). Future investigations will implement the discovered geometric and topological parameters into the creation of complex spatial arrangements at architectural scale.

Figure 12: Auxetic structures bending process



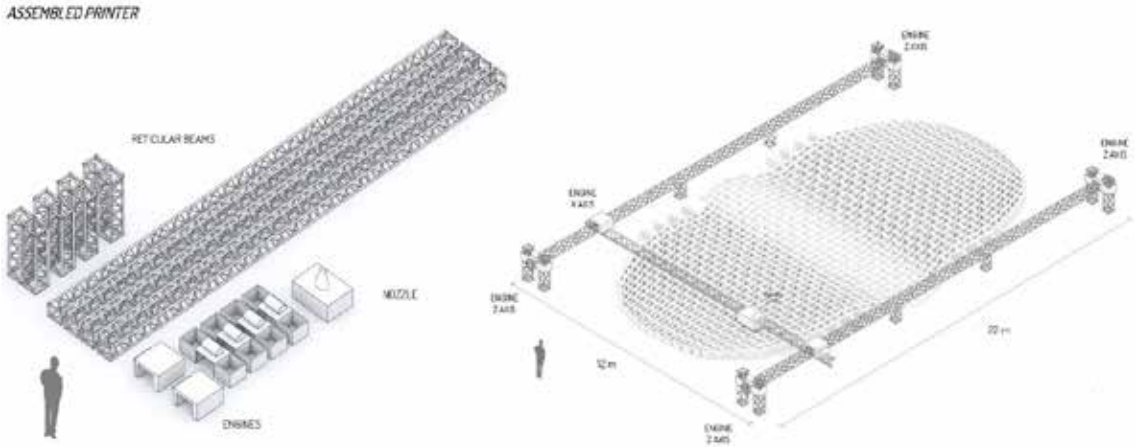


Figure 13: Additive Manufacturing as an ideal production process in controlling and tuning the response of auxetic mega-structures

ACKNOWLEDGEMENTS

The contents of this paper are reflecting and extending a research work previously published in “Metamaterial computation and fabrication of auxetic patterns for architecture (Naboni and Mirante, 2015), which has been presented at the XIX Congress of Iberoamerican Society of Digital Graphics). We would like to thank Anja Kunic for her support in developing the graphic material of this work. We also express our gratitude to KLONER 3D which provided the fundamental fabrication equipment to develop this work.

REFERENCES

- ABDELAAL, O. A. M.; DARWISH, S. M. H. Analysis, Fabrication and a Biomedical Application of Auxetic Cellular Structures. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, v. 2, i. 3, p. 218-223, 2008.
- CHATURVEDI, P. Optical Metamaterials: Design, Characterisation and Applications. University of Illinois at Urbana-Champaign. Electronic Thesis or Dissertation. 2009.
- CREMERS, J. M. Energy Saving Design Of Membrane Building Envelopes. *Structural Membranes 2011*, V International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures. Conference proceedings. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) Barcelona, Spain. p.147-157, 2011.
- EVANS, K.E.; NKANSAH, M. A.; HUTCHINSON, I.J.; ROGERS, S.C. Molecular Network Design. *Nature*, v. 353, n.124, 1991.
- EVANS, K.E.; ALDERSON, A. Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!. *Advanced Materials*, v. 12, n. 9, p. 617-628, 2000.
- FINDLEY, T. An Experimental Analysis of Auxetic Folded Cores for Sandwich Structures Based on Origami Tessellations. Electronic Thesis or Dissertation. 2013.
- LAKES, R. Foam structure with a negative Poisson's Ratio. *Science*, v. 235, p. 1038-1040, 1987.
- LIENHARD J. Bending-Active Structures. Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. Electronic Thesis or Dissertation. Institute of Building Structures and Structural Design, Stuttgart. 2014.

- LIU, Q. Literature Review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence. Electronic Thesis or Dissertation. 2006.
- LIU, Y.; HU, H. A Review on Auxetic Structures and Polymeric Materials. Scientific Research and Essays, v. 5(10), p. 1052-1063, may. 2010.
- LORATO, A.; INNOCENTI, P.; SCARPA, C.; ALDERSON, A.; ALDERSON, K.L.; ZIED, K.M.; RAVIRALA, N.; MILLER, W.; SMITH, C.W.; EVANS, K.E. The transverse elastic properties of chiral honeycombs. Composites, science and Technology, v. 70, p. 1057-1063, 2010.
- MALGORZATA, J-M. Micromechanical Model of Auxetic Cellular Materials. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, v. 47, n. 4, p. 1-14, 2009.
- MIR, M.; MURTAZA, N.A.; JAVARIA, S.; ANSARI, U. Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2014, 2014.
- MOZAFAR, S.R.; YUNAN, P.; ZAINI, A. Analytical solution and finite element approach to the 3d re-entrant structures of auxetic materials. Mechanics of Materials, v. 74, p. 76-87, 2014.
- NABONI, R; MIRANTE, L. Metamaterial computation and fabrication of auxetic patterns for architecture. SIGraDI 2015. XIX Congress of Iberoamerican Society of Digital Graphics. Conference proceedings. Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, Brazil. p. 129 – 136, 2015.
- OTTO, F.; BURKHARDT, B. Multihalle Mannheim. Stuttgart: Freunde und Förderer der Leichtbauforschung. 1978.
- SANAMI, M.; RAVIRALAA, N.; KIM, A.; ALDERSON, A. Auxetic Materials for Sport Applications. Procedia Engineering, v. 72, p. 453 – 458, 2014.
- SCARPA, F. Auxetic Materials for Bio Prostheses. IEEE Signal Processing Magazine. v. 25(5), p. 126-128, 2008.
- SCARPA, F. L.; GIACOMIN, J. A.; BEZAZI, A.; BULLOUGH, W. A. Dynamic behavior and damping capacity of auxetic foam pads. Conference proceedings. SPIE, San Diego CA, USA. 2006.
- SCHENK, M.; SIMON, D. Origami Folding: A Structural Engineering Approach. 50SME, 5th international conference on Origami in Science, Mathematics and Education. Conference proceedings. 2010.
- SCHUMACHER, C; BERND, B.; JAN, R.; STEVE, M.; CHIARA, D.; MARKUS, G. Microstructures to Control Elasticity in 3D Printing. ACM Transactions on Graphics (TOG), v.34, n.4, p. 136:1 – 136:13, 2015.
- SEFFEN, K.A. Compliant shell mechanisms. Philosophical Transactions of the Royal Society A, v. 370, p. 2010-2026, 2012.
- THEODOROS, T. Modelling, Simulation and Verification of Pneumatically Actuated Auxetic Systems. Open Systems: 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research. Conference proceedings, p. 395-404, 2014.
- TOMOHIRO, T. Freeform Origami Tessellations By Generalizing Resch's Patterns. Journal of Mechanical Design, v. 135, i.11, 2013.
- YANG, L.; HARRZSSON, O.; CORMIER, D.; WEST, H.; PARK, C.; PETERS, K. Design of Auxetic Sandwich Panels for Structural Applications. Solid Freeform Fabrication Symposium, v. 929, 2013.

Correspondência:

Roberto Naboni

roberto.naboni@gmail.com

Lorenzo Mirante

lorenzo.mirante@mail.polimi.it

O DESENVOLVIMENTO DE ELEMENTOS DE PROTEÇÃO DE FACHADA RESPONSIVOS – EXPLORAÇÃO E CONTROLE DE UM PROCESSO

Development of a responsive system for building façade protection – exploring and controlling a process

Carlos Eduardo Verzola Vaz¹, Joana Pack Melo Sousa, Hugo Rodrigues de Souza Pinto², Adriano Rodrigo Barreto Cardoso², Natalia Queiroz³

RESUMO: Este artigo tem como objetivo apresentar um processo exploratório de pesquisa para a integração de ferramentas e técnicas visando a criação de elementos de proteção de fachada. Como será visto neste documento, o cobogó foi utilizado como referência para o desenvolvimento de um protótipo físico funcional. Este elemento foi criado por dois comerciantes e um engenheiro radicados no Recife no início do século XX – Coimbra, Boeckmann e Góes. O Cobogó apresenta como características básicas o modo de produção seriado, a capacidade de proteger ambientes internos da luz direta do sol e de promover a adequada ventilação destes espaços, a possibilidade de, mesmo sendo um elemento vazado, permitir a sensação de privacidade e, além disso, funcionar como um elemento compositivo na fachada das edificações. O trabalho irá apresentar as diferentes etapas da pesquisa que envolveram, a coleta de dados sobre o uso do Cobogó na cidade do Recife, o processo de desenvolvimento de um conceito geométrico, a elaboração dos diferentes protótipos físicos e digitais e as demais metodologias e softwares utilizados no processo de trabalho. .

PALAVRAS-CHAVE: Proteção de fachadas; Cobogó; Arquitetura responsiva.

ABSTRACT: The aim of this paper is present an exploratory research process to integrate technichs and tools to develop a system for building protection façade using as reference the Cobogó. Two traders and one engineer –Coimbra, Boeckmann and Góes - settled in Recife created this element in the early XIX. The Cobogó has as main characteristics the capacity of been manufactured in a mass production system, the capacity of protecting indoor environment from direct sun light and promote natural ventilation in these spaces, the possibility of, even being a hollow element, create a sensation of privacy and, furthermore, be used as a composition element in building façades. This document will present the research different steps, which involved collecting data about how the Cobogó has been used in different buildings in the city of Recife, the genesis of a geometric concept, the development of different physical and digital prototypes and other methodologies and software used along the research. .

KEYWORDS: Façade protection; Cobogó; Responsive architecture.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

² Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

³ Universidade Federal da Paraíba - UFPA

How to cite this article:

VAZ, C. E. V.; SOUZA, J. P. M.; PINTO, H. R. S. CARDOSO, A. R. B.; QUEIROZ, N. O desenvolvimento de elementos de proteção de fachada responsivos – exploração e controle de um processo. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v. 11, n. 2, p. 73-87, jul-set. 2016.

Fonte de financiamento:

CAPES

Conflito de interesse:

Declara não haver

Submetido em: 27/07/2016

Aceito em: 25/10/2016



INTRODUÇÃO

Segundo Achten (2014) os edifícios responsivos podem ser definidos como aqueles que inteligentemente reagem ao ambiente, as necessidades dos usuários e as condições em seus ambientes internos. Tais estruturas são definidas a partir de diferentes denominações que apresentam pequenas variações de significado: sistemas de automação do edifício, casas inteligentes, edifícios sensíveis, adaptativos, dinâmicos ou interativos, arquitetura cinética, etc. Não há, segundo os autores, um acordo comum em relação à definição de uma categorização e, aparentemente, os termos gravitam entorno de um conjunto de tecnologias e as diferentes distinções estão relacionadas às influências causadas pelos avanços tecnológicos.

Fortmeyer e Linn (2014), afirmam que entre os componentes das edificações com a capacidade de responder automaticamente ao ambiente estão os envelopes ativos ou peles de alta performance. Estes elementos têm a capacidade de responder às condições ambientais, tanto externas quanto internas, funcionando como um meio para a transferência de energia. A origem destes sistemas remete à busca pelo homem de controlar a transferência de energia e o desejo em eliminar as barreiras entre o ambiente construído e o ar fresco e a luz natural do ambiente externo, sem sacrificar o conforto.

Historicamente, exemplos de estratégias com o objetivo de tornar a transição entre o ambiente externo e o interno podem ser identificados em painéis de portas e janelas chinesas (DYE, 1974; STINY, 1977), em painéis Muxarabis islâmicos (TALIB, 1983) ou no brise soleil e Cobogó (GUTIERREZ e LABAKI, 2005), amplamente utilizados na arquitetura moderna (SOUZA, 2012).

Fortmeyer e Linn (2014) também ressaltam que muitos arquitetos que buscam soluções relacionadas ao aprimoramento da troca de energia em fachadas, priorizando o conforto, racionalizaram este conhecimento em uma arquitetura que é dinamicamente responsiva ao lugar, ao clima e aos ocupantes, sem sacrificar os legados formais, materiais e históricos que definem a Arquitetura contemporânea. Recentemente, baseados nesta tradição, arquitetos propuseram investigações mais radicais sobre energia e conforto tirando proveito das novas tecnologias.

A fachada dinâmica do edifício do Instituto do Mundo Árabe, projetada por Jean Nouvel, pode ser citada como um dos primeiros exemplos de impacto que tiram proveito da movimentação de suas partes para controlar o fluxo de energia entre ambientes internos e externos. A fachada sudoeste do edifício é uma parede cintilante de vidro formada por 240 painéis foto sensíveis que se abrem e fecham automaticamente com o objetivo de modular a luz do dia e o ganho de calor solar. Neste caso, pela primeira vez, um edifício usa uma linguagem de projeto tradicional – brise soil em formato de padrões árabes – mas de uma maneira completamente diferente e dinâmica.

Não tão dinâmicas, mas também responsivas eram as soluções tradicionais. O cobogó, por exemplo, pode ser considerado como sendo uma resposta ao problema da ventilação, principalmente em locais de clima quente e úmido. Foi amplamente utilizado na arquitetura moderna, contudo, as possibilidades geradas pelo acesso às tecnologias de condicionamento de ar tornaram este sistema incapaz de competir com o nível de conforto que se busca hoje. Muitas vezes, como será visto neste texto, este é substituído por sistemas mecanizados de condicionamento de ar, a solução mais rápida e simples para se climatizar os ambientes.

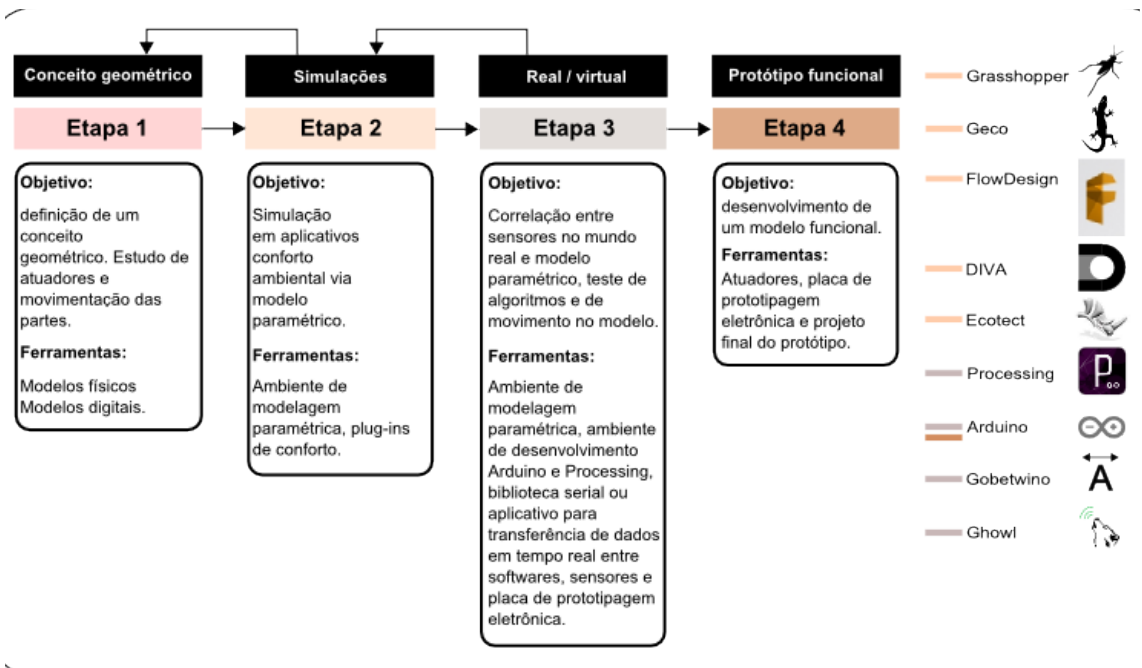
Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados de um estudo exploratório, visando a integração de ferramentas e técnicas para a criação de elementos de proteção de fachada. Como será visto neste documento, o cobogó foi utilizado como referência para o desenvolvimento de um protótipo físico funcional de um anteparo de proteção responsivo a parâmetros ambientais e a fatores humanos.

Estes componentes funcionam em grupos independentes, possibilitando assim o direcionamento do vento ou o aumento e redução da iluminação segundo a função exercida em um determinado ambiente. Além de visar a melhoria da performance em relação ao conforto, o sistema reproduz três das características básicas deste sistema de proteção: a capacidade de resguardar os ambientes internos de olhares externos, a possibilidade de serem produzidos em série e a aptidão em produzir diferentes texturas na fachada das edificações, funcionando como componente compositivo.

O trabalho de pesquisa se desenvolveu em duas fases. Na primeira delas foram analisados vários exemplos de fachadas responsivas, podendo destacar que existem dois tipos de sistemas: os que funcionam com uso de energia externa, e os que se modificam pelas propriedades intrínsecas ao material. A segunda fase da pesquisa relaciona-se ao desenvolvimento do protótipo em si e foi dividida em quatro etapas. A primeira envolveu, por meio de um processo exploratório, a definição de um conceito norteador para a geometria do protótipo, o estudo da movimentação das partes do sistema e de diferentes atuadores que possibilitariam este deslocamento. Nesta etapa foram estudados princípios de dobragem e de deformação de materiais a partir da elaboração de maquetes físicas ou modelos paramétricos. Na segunda etapa os modelos paramétricos foram testados a partir de diferentes aplicativos de simulação e conforto ambiental. Na terceira etapa uma correlação entre sensores e modelo paramétrico foi realizada com o objetivo de testar algoritmos para a implementação da etapa final, que envolvia o desenvolvimento de um protótipo funcional. A quarta e última fase envolveu a elaboração de um protótipo físico funcional.

Durante todas as etapas da pesquisa foi utilizada uma estratégia exploratória, com objetivo de se mapear e testar as diferentes ferramentas que possibilitariam se obter um protótipo físico e, posteriormente, realizar uma análise do comportamento do cobogó “inteligente”. Como resultado, este artigo não apresenta conclusões em relação à eficiência do protótipo em si, mas mostra um caminho para que outros pesquisadores desenvolvam trabalhos com objetivos semelhantes. A Figura 1 mostra as etapas da pesquisa, fazendo uma correlação com as diferentes ferramentas utilizadas no trabalho.

Figura 1: Etapas de desenvolvimento do protótipo e as diferentes ferramentas utilizadas. Fonte: Elaboração própria



SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE FACHADA – DO COBOGÓ AOS SISTEMAS RESPONSIVOS

Segundo Vieira, Borba e Rodrigues (2012), o Cobogó foi inventado por dois comerciantes e um engenheiro radicados no Recife no início do século XX — Coimbra, Boeckmann e Góes. Seu nome foi dado a partir das iniciais dos sobrenomes de seus inventores e foi inicialmente concebido como um simples elemento pré-fabricado, próprio para ser construído em série, baseado em uma retícula vazada sobre uma placa prismática de concreto. Conforme os autores, na prática, se utilizado como elemento de composição de septos verticais, o elemento permite a passagem da ventilação natural, ao mesmo tempo em que reduz a incidência da luz solar, características que os adequam para projetos em lugares de clima quente e úmido.

Segundo Oliveira (2013), o Cobogó tem função semelhante à dos antigos muxarabi de madeira, também resgatados pela arquitetura moderna. Estes podem funcionar como filtros solares e visuais, apresentando assim atributos semelhantes aos ripados de madeira, porém com a vantagem de possibilitar a criação de grandes planos leves e permeáveis. Um dos primeiros exemplos do uso do Cobogó pode ser identificado na Caixa d'água de Olinda, projetada pelo arquiteto Luiz Nunes, em 1936. Oliveira (2013) afirma que apesar da volumetria da edificação, de geometria simples, contrastar com o ambiente urbano em que foi construída, a obra teve destaque no número especial sobre o Brasil da revista inglesa *The Architectural Review*, em 1944, como representante de um diálogo entre tradição e modernidade. Vieira et. al. (2012) explicam que o Cobogó, na caixa d'água de Olinda, foi utilizado com a função de “quebra-sol”, que auxiliava na amenização do calor, que incide nas tubulações, preservando e resfriando também a temperatura das águas acumuladas nos tanques superiores.

Assim como o brise soleil, o Cobogó foi largamente utilizado na construção civil durante o século XX, sendo possível identificar sua presença em obras que podem ser consideradas referências da arquitetura brasileira. Atualmente, apesar deste elemento construtivo ainda estar presente em diversas edificações, este tem sido gradativamente substituído pelos sistemas de ar condicionado, que apresentam um alto grau de consumo energético. Em Recife, por exemplo, em inúmeras situações pode se observar a perda da funcionalidade ou a sua substituição. Mesmo em edifícios mais antigos, sistemas de ar condicionado foram adicionados, complementando o conforto em ambientes internos (Figura 2).

Na mesma cidade, é possível verificar que os novos edifícios raramente contemplam o uso do Cobogó como estratégia passiva de projeto, sendo que o ar-condicionado passou a ser utilizado como principal instrumento para gerar conforto em ambientes internos. Esta situação reflete no desprezo em relação à implantação das edificações e a ausência de preocupação com as fachadas. Em alguns casos ainda se observa o emprego do Cobogó, contudo não diretamente relacionada ao conforto e proteção dos ambientes, mas para a criação de uma segunda pele, com uma textura diferenciada, contemplando aspectos relacionados à estética das edificações.

Apesar de em Recife, em diferentes situações não se observar estratégias adequadas de proteção de ambientes internos, atualmente há uma crescente preocupação com questões relacionadas à sustentabilidade das edificações, o que tem promovido cada vez mais pesquisas que visam identificar soluções alternativas que possibilitem a redução do consumo energético ao longo da vida útil do edifício.

Sistemas responsivos baseados na automação

Uma das estratégias exploradas por inúmeros projetistas envolve a aplicação de princípios de automação com o objetivo de criar edifícios que respondam a diferentes estímulos ambientais. Este conceito tem origem no trabalho de Negroponte (1975), que descreve a arquitetura responsiva como

sendo o produto natural da integração da computação com a arquitetura para a produção de espaços ou estruturas otimizadas. Segundo o autor, o início de pesquisas na área foi um reflexo da crise na arquitetura racionalista e da interminável repetição de formas da arquitetura industrializada. O objetivo era criar espaços mais “inteligentes” que respondessem às diferentes exigências dos usuários.

Em diferentes projetos arquitetônicos é possível identificar soluções baseadas na automação do edifício ou de suas partes para promover a adequada insolação e permitir a otimização de processos de ventilação. D’alecon (2013), define as fachadas inteligentes ou responsivas como aquelas que têm a capacidade de se adaptar às condições do ambiente, graças a um sistema que integra dados sobre a performance do edifício, uma modelagem ou avaliação deste desempenho e sistemas de controle permanente para corrigir e adequar o ambiente construído ao clima e uso. Segundo o autor, os elementos típicos que fazem parte dessas estratégias são: a regulação da iluminação natural e artificial, segundo condições de nebulosidade e de calefação, e de refrigeração, segundo a ocupação dos ambientes.

Tanto o SDU Campus Kolding na Dinamarca, projetado pelo escritório de Henning Larsen Architects, quanto as Torres Al Bahar, em Abu Dhabi projetadas pelos arquitetos do escritório Aedas, contém uma segunda película na fachada que responde a estímulos climáticos. O primeiro é formado por 1600 painéis triangulares perfurados basculantes, enquanto o segundo foi projetado com inspiração cultural no muxarabi (FRANCO, 2013). Ambos possuem um sistema inovador de sombreamento dinâmico, que se auto-ajusta de acordo com o ângulo de incidência e intensidade dos raios solares. As fachadas responsivas têm um conjunto de sensores que determinam a regulação individual e automática de cada painel, permitindo a manutenção das condições de conforto no interior do edifício (SDU, 2015). O edifício Bad Gleichenberg, projetado por Ernst Giselsbrecht and Partner ZT GmbH, construído na Áustria em 2007, também introduz um sistema de fachadas dinâmicas que podem ser adaptados às necessidades dos usuários (LOMHOLT, 2008). O grupo DesignInc projetou em 2006 o prédio da prefeitura de Melbourne o CH2 (Council House 2) com o objetivo de o tornar o prédio mais sustentável da Austrália. Um dos elementos considerados no projeto foi o desenho de uma fachada de painéis de madeira automatizados que se adaptam ao longo das quatro estações do ano (MARCON, 2013).

Figura 2: Imagens extraídas de Vieira et. al. (2012) mostrando em detalhe o uso do Cobogó em edificações de substancial valor arquitetônico na cidade do Recife; (2) Situações em que o ar-condicionado passou a ser utilizado como principal instrumento para adequar ambientes internos. Na imagem à esquerda verifica-se que o Cobogó foi retirado em parte da fachada original; (3) Edifícios residenciais padrões da cidade. Neste caso é possível observar o corriqueiro o uso de elementos vazados; (4) Edificações contemporâneas, com o mesmo projeto, seguindo diferentes orientações no terreno. Fonte: elaboração própria.

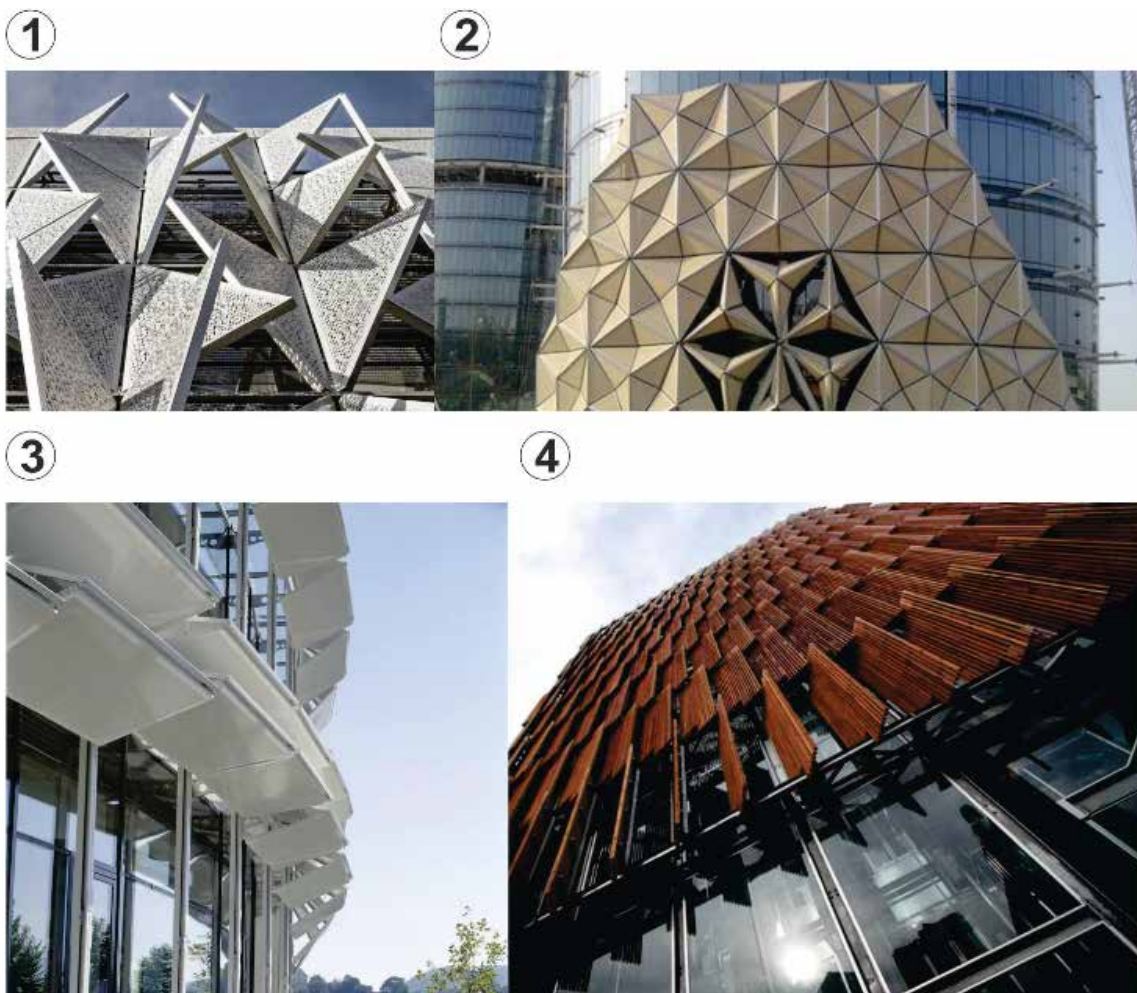


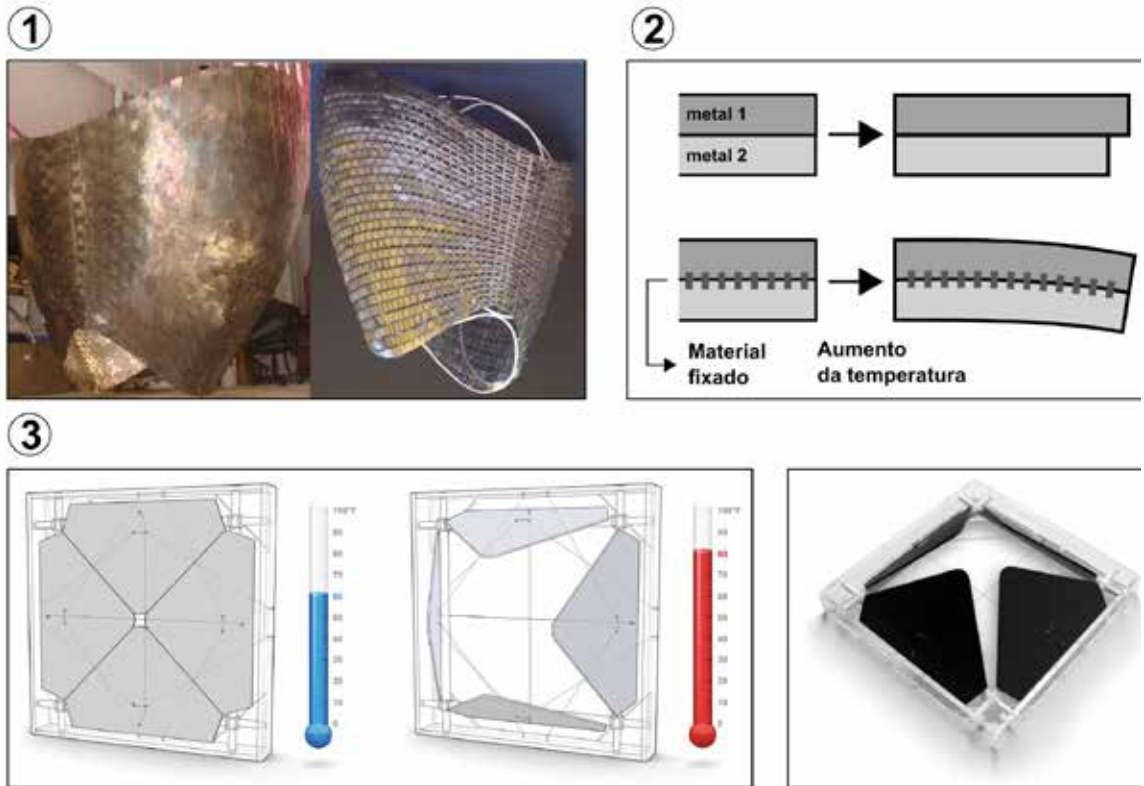
Sistemas responsivos baseados nos materiais inteligentes

Outra abordagem para o desenvolvimento de sistemas de fachadas responsivas relaciona-se ao uso de materiais inteligentes. Segundo Addington e Schodek (2005), este tipo de sistema incorpora funções tecnológicas permitindo respostas ao ambiente por meio de mudanças em suas propriedades internas ou por meio da ação externa. Os autores definem materiais inteligentes como sendo aqueles que respondem ao ambiente em tempo real, segundo diferentes estímulos. Uma de suas características mais relevantes é sua habilidade em transformar suas propriedades físicas e formais sem requerer uma fonte externa de energia. Os experimentos de cobertura responsiva desenvolvidos pela arquiteta Dóris Sue podem ser citados como exemplo de aplicação destes princípios. Muitos de seus trabalhos envolvem o uso de lâminas com duas camadas de metais com diferentes coeficientes de dilatação. Isto permite que a alteração na temperatura expanda os materiais de forma diferente. Neste caso, a arquiteta faz uso de peles metálicas que apresentam a capacidade de abrir seus poros, dependendo da temperatura ambiental.

Outro exemplo da utilização de materiais inteligentes pode ser identificado na Air Flow(er) (Figura 4). Este é um sistema independente de energia ativado por meio de variações térmicas, criado pelo escritório Lift Architects. Seu funcionamento se baseia nas pétalas de uma flor de Crocus que se abrem quando expostas a temperaturas mais elevadas.

Figura 3: (1) SDU Campus Kolding; (2) Torres Al Bahar; (3) Bad Gleichenberg; (4) Council House 2. Fonte: (1) SDU, 2015; (2) Franco (2013); (3) Lomholt (2008); (4) Marcon (2013).





O componente ativo neste caso é um cabo manufaturado com efeito térmico de memória, responsável por movimentar as partes móveis do sistema. Há assim, uma clara diferença em relação às superfícies criadas por Doris Sung, que é materializada com o próprio material responsivo.

Addington e Schodek (2005) também ressaltam que estes sistemas inteligentes respondem basicamente a uma série de condições climáticas e sistemas mais complexos deveriam também acomodar uma maior variedade de condições e critérios de performance, tais como a capacidade de responder a estímulos e necessidades dos usuários e aprender ao longo do tempo.

Figura 4: (1) Estrutura projetada com “materiais inteligentes” pela arquiteta Doris Sung; (2) Diagrama ilustrando a dilatação em lâminas de metal; (3) Elemento de proteção de fachada desenvolvido pela Lift Architects. Fonte: (1) Dewidar, Mohamed e Ashour (2013); (2) Elaboração própria; (3) LIFT ARCHITECTS (2016).

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO

Definição de um conceito geométrico a partir de modelos físicos e digitais

Nesta etapa da pesquisa foram definidas as possíveis características geométricas e funcionais que o protótipo deveria ter, fazendo uma correlação com o clima da cidade do Recife, local em que o Cobogó foi inventado. O clima da cidade é caracterizado por ser tropical litorâneo quente e úmido, com temperaturas elevadas ao longo do dia e do ano (média anual de 25,5°C), com uma radiação difusa muito intensa, um alto grau de umidade do ar (média de 80%) e uma precipitação média anual elevada, sobretudo nos meses de inverno, acima de 2.000mm (FREITAS, 2008). Existem dois padrões climáticos durante o ano: a estação seca ou de estiagem, que se prolonga de setembro a fevereiro (primavera-verão), e a estação chuvosa, de março a agosto (outono-inverno) (BARROS E LOMBARDO, 2013).

A cidade está sob a influência dos ventos alísios do hemisfério austral, com a direção predominante de sudeste e direções secundárias de Sul e de

Leste. A velocidade média, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), é de 2,82 m/s. Como resultado, o protótipo deverá ter as seguintes características:

(1) Funções básicas: assim como o Cobogó original deve permear a ventilação natural e funcionar como anteparo de proteção da fachada;

(2) Responsivo à luz: Suas partes devem ser móveis, permitindo assim o controle pelo usuário, segundo as necessidades de luz em relação às atividades a serem desenvolvidas nos ambientes;

(3) Responsivo ao vento: em panos de fachada maior, grupos de componentes devem trabalhar num sistema independente, de modo a possibilitar o direcionamento do vento para diferentes áreas dos ambientes.

(4) Padrões de desenho: os componentes devem gerar diferentes configurações na fachada, permitindo variar a composição do edifício.

A partir destas diretrizes, definiu-se que a geometria do componente e a forma com que se daria a movimentação de suas partes deveriam ser definidas segundo a correlação entre as diferentes possibilidades de configuração do elemento, de modo isolado, e com estes trabalhando em diferentes grupos. Além disso, o sistema deveria ser controlado de modo a permitir diferentes configurações em relação à ventilação, à presença ou não de luz direta, ou a parâmetros relacionados a umidade e temperatura. Como resultado, inicialmente foram definidos como parâmetros ambientais a serem coletados pelo sistema: a temperatura, a umidade, e a luminosidade.

O primeiro método explorado durante a elaboração dos protótipos geométricos foi o Miura Fold (NISHIYAMA, 2012). Este sistema de dobragem foi desenvolvido pelo astrofísico japonês Korio Miura com objetivo de reduzir a área de uma superfície segundo um padrão de dobragens que cria uma tesselação formada por paralelogramos. O origami Miura é uma estrutura utilizada inicialmente para dobragem de mapas e de painéis solares de satélites. Nesta etapa foi utilizado como suporte de referência o livro *Origami Tessellations: Awe-Inspiring Geometric Designs* (GJERDE, 2008).

Além da utilização de métodos de dobragem de papel como fonte de inspiração para a criação de um protótipo, também foi estudada a possibilidade do uso da deformação de materiais como meio para a geração de diferentes padrões geométricos. Neste caso, foi avaliada a alteração da forma em tecidos com propriedades elásticas.

Como a intenção era que o sistema associasse fatores ambientais à presença do usuário e à atividade que poderia estar sendo desenvolvida no espaço, optou-se por combinar a deformação destes materiais à ação de atuadores. Como resultado, a característica básica dos materiais inteligentes, de apresentarem uma “inteligência” interna, não foi absorvida ao longo da pesquisa.

Nesta etapa da investigação foram elaborados tanto modelos físicos, em diferentes materiais, quanto digitais, gerados em ambientes de modelagem paramétrica visual. No primeiro caso, os modelos foram criados com materiais simples, em um processo exploratório. Por exemplo, padrões geométricos elaborados por meio da dobragem de papel, segundo a técnica Miura Fold, foram separados e alterados, de modo a se compreender quais seriam os aspectos da forma que poderiam contemplar as características que se buscava no Cobogó responsivo. Em relação aos modelos paramétricos, estes foram implementados a partir do que foi verificado nos modelos físicos e, também, foram exploradas novas ideias.

Além de definir um padrão geométrico, tanto os modelos físicos quanto os paramétricos também foram elaborados com o objetivo de realizar testes preliminares e verificar as dificuldades que poderiam ser enfrentadas em relação à automatização do sistema.



Como resultado, nesta etapa também se passou a investigar os diferentes tipos de atuadores e motores elétricos (servo motores, motores de passo e corrente contínua) que possibilitariam deslocar as partes dos protótipos estudados. Como parte do objetivo da pesquisa era buscar a redução de custos e evitar a dificuldade de aquisição de componentes, foi estudado, por exemplo, a utilização de motores de passo presentes em componentes eletrônicos (leitores de CD e DVD, drives de disquete, etc.) abandonados na própria Universidade Federal de Pernambuco e que podem ser encontrados na maioria das instituições públicas de ensino superior.

A partir dessa etapa da pesquisa optou-se por utilizar micro servo motores (HXT9001) como atuadores por estes serem de fácil aquisição, baixo custo e simples instalação. Apesar dos motores de passo estarem disponíveis na Universidade em equipamentos obsoletos, estes requerem um maior conhecimento de eletrônica para funcionarem de forma adequada e, a partir de motores de corrente contínua, não é possível controlar o giro do eixo de forma precisa, impossibilitando interromper o movimento em ângulos pré-definidos.

Figura 5: (1) Modelos executados por meio de dobragem de papel; (2) Modelo executado por meio da técnica de dobragem Miura fold, seu desmembramento para testes de movimentação e modelo paramétrico; (3) Outro exemplo de modelo gerado por dobragem e o respectivo modelo paramétrico. Fonte: Elaboração própria.

Etapa 2 - Teste em ambiente de modelagem paramétrica e em aplicativos de ventilação e iluminação

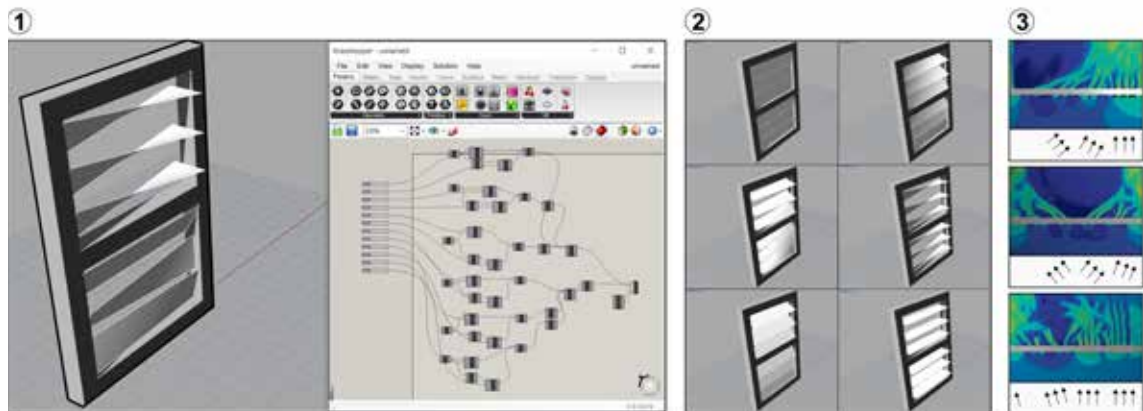
Nesta etapa o objetivo era criar modelos paramétricos com a intenção de simular qual poderia ser o comportamento do protótipo físico em relação a mudança de diferentes parâmetros climáticos. As simulações foram realizadas visando compreender dois aspectos diferentes nos modelos. No primeiro, cada módulo foi implementado e estudado com o objetivo de avaliar como se daria a alteração da sua geometria levando em consideração intervalos numéricos similares aos dos parâmetros ambientais. Por exemplo, se a temperatura e a umidade aumentam em um ambiente, qual porcentagem da área deve abrir no sistema, permitindo assim o aumento da ventilação? Se a luminosidade diminui no ambiente interno, qual deverá ser a proporção de abertura para entrada de luz natural?

A outra abordagem envolveu o uso de diferentes plug-ins e ferramentas de simulação ambiental com o objetivo de compreender melhor quais aspectos poderiam ser trabalhados a partir do protótipo que estava sendo desenvolvido. Esta fase da pesquisa também foi realizada de modo exploratório, sendo que os diferentes aspectos ambientais não foram aprofundados. Por exemplo, o módulo de extensão Geco, para Grasshopper, foi utilizado para criar uma conexão com o aplicativo de análise de performance ambiental Autodesk Ecotect. A partir dele foi possível pré-visualizar a radiação solar que incidiria sobre as partes do modelo. Também, por meio do plug-in DIVA foi analisada a variação da intensidade luminosa e no aplicativo Autodesk Flow Design a alteração do fluxo de vento. Em relação à ventilação, o objetivo era verificar, de forma preliminar, a possibilidade de mudar o deslocamento do vento segundo as necessidades de cada ambiente. A Figura 6 mostra o modelo paramétrico e diferentes configurações do Cobogó, com o objetivo de redirecionar o fluxo de ar.

Etapa 3 - Correlação entre sensores e modelos digitais

A partir dos resultados obtidos na fase anterior, passou-se à etapa de implementação dos sensores utilizando-se uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre e de placa única. Ao invés de construir um protótipo físico, os testes foram realizados em ambiente digital, a partir do modelo paramétrico. Este processo permitiu testar o algoritmo que iria movimentar as partes do Cobogó antes mesmo de construir o protótipo físico. Inúmeras opções poderiam ter sido avaliadas por meio deste método, pois não há custo para alterar e gerar novos modelos. O que pode se tornar inviável quando se deseja construir um protótipo físico funcional.

Figura 6: (1) Protótipo elaborado por técnica de deformação implementado em ambiente de modelagem paramétrica; (2) Diferentes modelos gerados parametricamente; (3) Simulações em plataforma para análise de ventilação. Fonte: Elaboração própria.



Fase	Componente		Objetivo
1	Arduino	Plataforma de prototipagem eletrônica	Processa os dados coletados pelos sensores
2	Gobetwino	Aplicativo que coleta ou envia dados por meio de portas seriais. Outra possibilidade é a utilização da biblioteca serial do próprio Processing.	Utilizado como ponte entre o Arduino e o ambiente Processing IDE
4	Processing IDE	Linguagem de programação de código aberto e ambiente de desenvolvimento integrado	Utilizado para processar os dados coletados pelo Gobetwino
5	GHOWL	Conjunto de componentes que estendem a habilidade do Grasshopper de comunicar e trocar informações com outras aplicações e dispositivos físicos	Coletar os dados processados pelo Processing e direcioná-lo ao modelo paramétrico

Fonte: elaboração própria.

Este pode ser um aspecto interessante, pois por meio deste processo é possível ensinar inúmeros conceitos aos estudantes, correlacionando o mundo real ao digital.

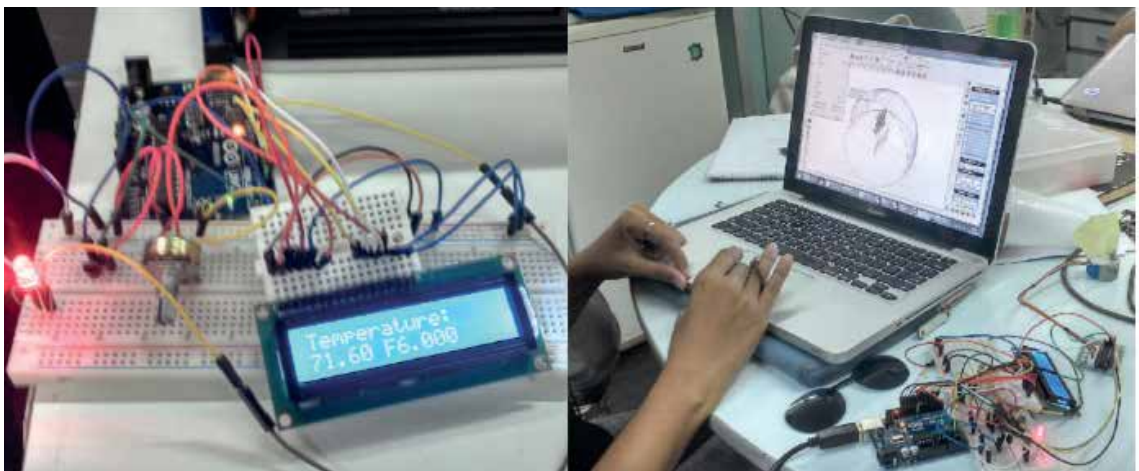
Para capturar as informações diretamente do ambiente foram instalados três sensores: o de temperatura com precisão calibrada de 1°C (LM35), o de umidade que abrange um intervalo de 20% a 50% (DHT11) e o de luminosidade cuja resistência varia conforme a quantidade de luz (LDR). Estes foram conectados a uma placa de Arduino UNO, responsável por processar os dados coletados no ambiente e enviar ao modelo paramétrico. A sequência de aplicativos e ferramentas utilizadas é apresentada no Quadro 1. A Figura 7 mostra o sensor de temperatura sendo testado.

Quadro 1: Quadro apresentando os aplicativos segundo a sequência de transferência dos dados até os modelos paramétricos. Fonte: elaboração própria.

Etapa 4 - Elaboração de protótipo físico funcional do modelo

Apesar de diferentes modelos físicos e digitais terem sido desenvolvidos na primeira etapa da pesquisa, apenas um foi selecionado para a implementação em um protótipo físico funcional. Os modelos elaborados a partir da dobragem de papel apresentavam um padrão de movimentação das partes mais complexo, com deformações em relação aos eixos X, Y e Z. Como resultado, o protótipo final foi elaborado levando em consideração a deformação do material a partir movimentação causada por atuadores. A Figura 8 mostra a configuração final do protótipo. Nele, são movimentadas três fitas largas de poliéster posicionadas paralelamente, na horizontal. Cada uma de suas pontas é fixada a um servo motor acoplado em uma esquadria de alumínio de formato retangular, sendo que estas podem se mover separadamente, promovendo, por meio da torção, diferentes gradientes de circulação de ar e de entrada de luz no ambiente. Na mesma imagem diferentes possibilidades de composição da fachada também são apresentados.

Figura 7: Correlação entre os sensores e o modelo digital por meio de placa de prototipagem eletrônica. Fonte: Elaboração própria.



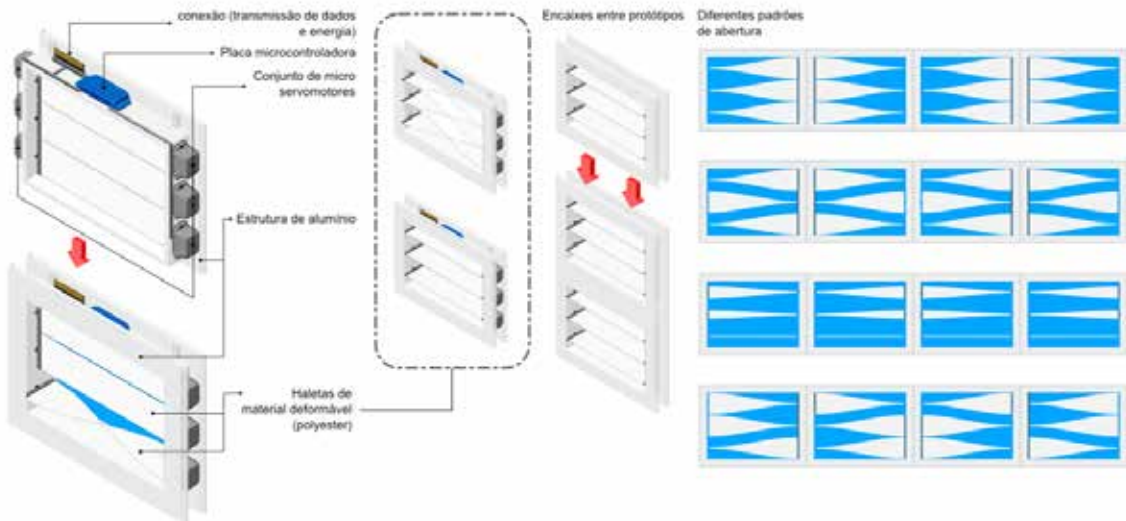


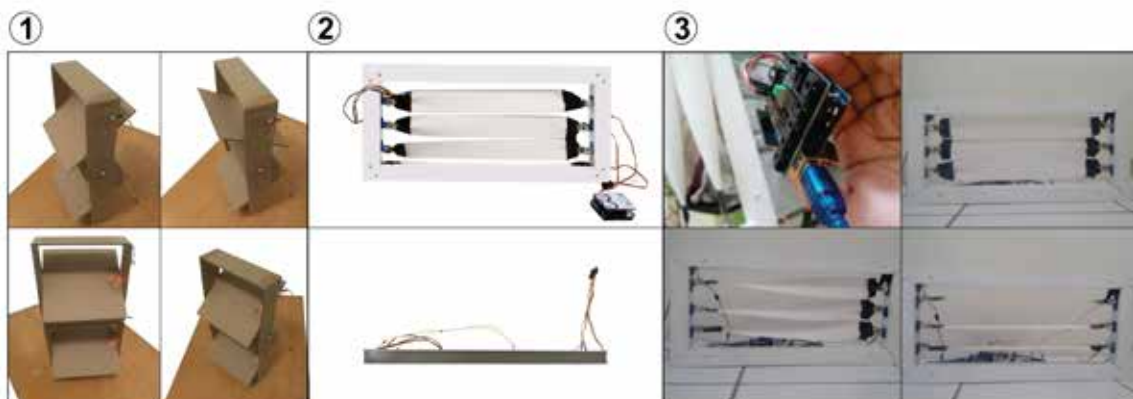
Figura 8: Esquema geral do protótipo. Fonte: Elaboração própria.

A implementação do protótipo físico funcional foi realizado em duas etapas diferentes. Inicialmente, uma versão simplificada do sistema foi prototipada em um modelo de papelão (Figura 8), descartando assim o efeito da torção das fitas elásticas. Neste caso, o objetivo era realizar um teste inicial sem a confecção da esquadria de alumínio, prevendo-se assim futuros problemas. Em uma segunda etapa o protótipo final foi construído. A mesma figura apresenta este em funcionamento, com o mesmo código utilizado para controlar o sensor de temperatura e enviar os dados ao modelo digital. Como resultado, as respostas obtidas no mundo real foram muito semelhantes às que foram testadas na fase anterior. Portanto, realizar a ponte entre sensor físico, além de não ser um processo complexo, colaborou na compreensão do que iria ocorrer a partir da construção do protótipo.

RESULTADOS

Figura 9: (1) Proto versão do sistema em um modelo funcional executado em papelão; (2) Vista frontal e inferior do protótipo físico funcional; (3) Diferentes posições pelo acionamento de sensores. Fonte: Elaboração própria.

Apesar de terem sido desenvolvidos vários modelos físicos e digitais, o protótipo físico final foi elaborado com materiais simples e com reduzida complexidade geométrica. Optou-se por esta estratégia devido a restrições em relação à obtenção de materiais e equipamentos adequados confecção do modelo e sua automação. Contudo, apesar do componente em si apresentar uma geometria simples, quando trabalhando em conjunto há uma grande possibilidade de composições pelos diferentes níveis de movimentação. As ilustrações apresentadas na Figura 7 mostram esta flexibilidade do sistema. Esta característica é comparável com a dos Cobogós tradicionais em que,



um elemento de geometria simples repetido em larga escala, gera um efeito compositivo em panos de fachada.

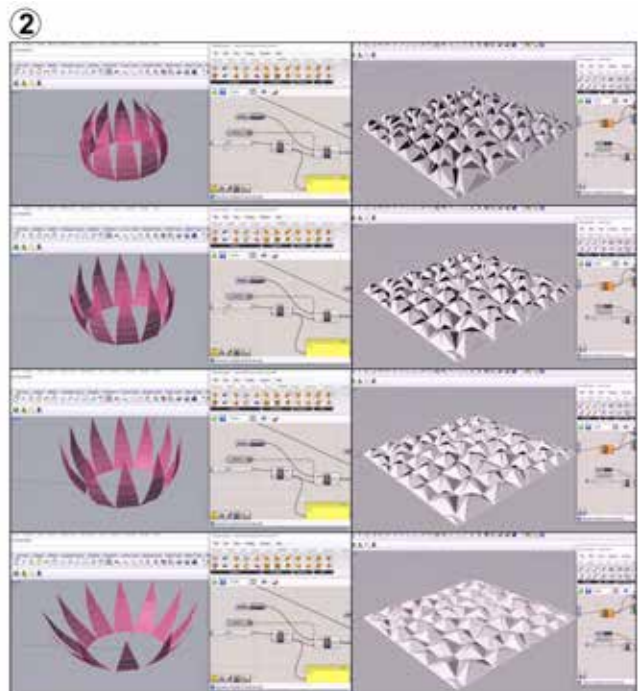
Outra característica que deve ser ressaltada é a flexibilidade de resposta que o uso de atuadores pode dar ao sistema. A partir deles e de diferentes sensores e estratégias é possível construir algoritmos que gerem movimentos pré-definidos, como resposta a estímulos ambientais ou em relação à presença de usuários. Por outro lado, apesar de depender de uma fonte de energia para funcionar, esta capacidade o torna um ótimo objeto de pesquisa e ensino. No primeiro caso, é viável desenvolver inúmeros algoritmos para o seu funcionamento. Já, no segundo caso, pode ser utilizado como instrumento para o ensino de conceitos simples de modelagem paramétrica, programação e computação física a estudantes de arquitetura e urbanismo.

CONCLUSÕES

A partir deste trabalho foi possível dominar, mesmo que parcialmente, uma série de ferramentas e o conhecimento necessário para criar protótipos tanto digitais quanto físicos de elementos de proteção de fachada. Ainda não há resultados sobre a eficiência do protótipo aqui apresentado, segundo os diferentes parâmetros ambientais. Este processo demanda um estudo para cada um dos diferentes aspectos. Por exemplo, em relação à possibilidade de se alterar a direção do vento em ambientes foi realizado um pequeno experimento. Contudo, para se concluir se de fato isto é possível é necessário realizar outros experimentos aprofundados, com diferentes tipos de modelos, tanto físico quanto digitais, e com auxílio de um especialista na área. Ou seja, o trabalho futuramente irá se desmembrar em outras pesquisas, aprofundando assim o estudo das fachadas responsivas.

O controle do ferramental utilizado nesta pesquisa também já possibilitou a realização de um curso de curta duração, sobre fachadas responsivas, na Universidade Federal de Pelotas. Utilizando parte das técnicas adotadas durante a pesquisa foi possível rapidamente gerar modelos paramétricos e, alguns destes, foram selecionados para serem implementados em protótipos físicos. O curso teve duração de três dias e os resultados são apresentados na Figura 9.

Figure 10: (1) Imagens durante o desenvolvimento de protótipos físicos funcionais. (2) Modelos paramétricos elaborados durante o workshop. Fonte: Elaboração própria.



AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenadoria de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa por meio de uma bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- ACHTEN, Henri. One and Many: An Agent Perspective on Interactive Architecture source. Fonte: ACADIA 14: DESIGN AGENCY, 34, 2014, Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Los Angeles, p. 479-486.
- ADDINGTON, Michelle; SCHODEK, Daniel. Smart materials and new technologies. Oxford: Architectural Press, 2005.
- BARROS, H.; LOMBARDO, M. Zoneamento climático urbano da cidade do Recife: uma contribuição ao planejamento urbano. Revista GEOUSP: Espaço e Tempo, São Paulo: n. 33, p. 187-197, 2013.
- D'ALECON, Renato. Fachadas transparentes: sistemas activos y passivos. Cuadernillo de la técnica, Santiago, n. 84, p. 1-5, Ago. 2013.
- DEWIDAR, K.; MOHAMED, N.; ASHOUR, Y. Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems. In: SB13 DUBAI, 1, 2013, Dubai, Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems, 2013. Disponível em: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC26849.pdf> Acesso em: Ago. 2014.
- DYE, Daniel. Chinese Lattice Designs. Nova York: Dower Publications Inc., 1974.
- FORTMEYER, Russell; LINN, Charles D. Kinetic architecture: designs for active envelopes. Mulgrave: The Images Publishing Group, 2014.
- FRANCO, José. As Torres Al Bahar e sua fachada sensível, por Aedas Architects. Revista on-line Archdaily, 28 Jan. 2013. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/01-93779/as-torres-al-bahar-e-sua-fachada-sensivel-por-aedas-architects>>. Acesso em: 20 Maio 2014.
- FREITAS, Ruskin. Entre mitos e limites: as possibilidades do adensamento construtivo face à qualidade de vida no meio urbano. Recife: EDUFPE, 2008.
- GJERDE, Eric. Origami Tessellations: Awe-Inspiring Geometric Designs. Massachusetts: A K Peters Press, 2008.
- GUTIERREZ, Grace; LABAKI, Lucila. Considerações sobre o brise-soleil na arquitetura moderna Brasileira. In: VIII ENCONTRO NACIONAL e IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. Anais do ENCAC – ELACAC, 2005, Maceió: ANTAC, v. 1, p. 874-882.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Normais climatológicas do Brasil 1961-1990. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>> Acesso em: Jan. 2014.
- KLOOSTER, Thorsten. Smart Surfaces and their Application in Architecture and Design. Berlin: Birkhauser T. press, 2009.
- LIFT ARCHITECTS. The air flow(er). Disponível em: <<http://www.liftarchitects.com/#/air-flower>> Acesso em: Jul. 2016.
- MARCON, Naiane. Escritórios do Conselho de Melbourne 2 (CH2) / DesignInc. Revista on-line Archdaily, 5 Ago. 2013. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/01-132298/escritorios-do-conselho-de-melbourne-2-ch2-slash-design-inc>>. Acesso em: 26 Maio 2014.
- NEGROPONTE, Nicholas. Soft Architecture Machines. Cambridge: MIT Press, 1975.
- NISHIYAMA, Yutaka. Miura Folding: Applying Origami to Space Exploration. International Journal of Pure and Applied Mathematics.v. 79, n. 2, p. 269-279, Abr. 2012.
- OLIVEIRA, N. Superfícies abstratas: o elemento cerâmico como textura na arquitetura moderna brasileira In: IV SEMINÁRIO DOCOMOMO SUL: Pedra, barro e metal - Norma e licença na arquitetura moderna do cone sul americano, 1930/70, 2013.
- SDU Campus Kolding / Henning Larsen Architects. Revista on-line Archdaily, 30 Jan. 2015. Disponível em: <<http://www.archdaily.com/590576/sdu-cam>>

pus-kolding-henning-larsen-architects>. Acesso em: 30 Maio 2014.

SUNG, Doris. Prototyping a Self-Ventilating Building Skin with Smart Thermobimetals. Disponível em: <<http://www.aia.org/aiaucmp/groups/aia/documents/pdf/aiab092636.pdf>>. Acesso em: Ago. 2014

SOUZA, Heloisa. O conforto ambiental na arquitetura colonial brasileira: heranças muçulmanas. Architecton: revista de arquitetura e urbanismo. v.2, n.2, p. 41-54, 2012.

STINY, G. Ice-ray: a note on Chinese lattice designs. Environment and Planning

B: Planning and Design, v. 4, n. 1, p. 89-98, 1977.

TALIB, Kaizer. Review of climatic design concepts and details in traditional architecture in various climatic zones - Saudi Arabia. In: INTERNATIONAL AND PASSIVE LOW ENERGY ARCHITECTURE CONFERENCE, 1983, Creta. Proceedings of the Second International PLEA Conference. Oxford: Pergamon press, 1983, p. 233-245.

VIEIRA, Antenor; BORBA, Cristiano, RODRIGUES, Josivan. Cobogó de Pernambuco. Recife: J. Rodrigues, 2012.

Corrêspodência:

Carlos Eduardo Verzola Vaz

cevv00@gmail.com

Joana Pack Melo Sousa

joanapacksousa@gmail.com

Hugo Rodrigues de Souza Pinto

hugordsp@gmail.com

Adriano Rodrigo Barreto Cardoso

adrianoarbc@gmail.com

Natalia Queiroz

nataliaqueiroz.arq@gmail.com



GESTÃO E TECNOLOGIA DE PROJETOS

Design Management and technology

Bases de Indexação e Divulgação

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

latindex



.periodicos.

