



# GESTÃO E TECNOLOGIA DE PROJETOS

Design Management and Technology

2019; 14 (1)

Uma publicação do  
Instituto de Arquitetura e Urbanismo  
Universidade de São Paulo



© 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

Marcio Presente

- 4**      **EDITORIAL**  
Maria Elena Tosello e Frederico Braida
- 9**      **CALÇADAS DRENANTES: INTERVENÇÕES FÍSICAS COM DESENVOLVIMENTO SOCIAL**  
DRAINING PAVEMENTS: PHYSICAL INTERVENTIONS WITH SOCIAL DEVELOPMENT  
Daniella Naomi Yamana, Jady Medeiros, Eduardo Ignacio Lopes, Paulo Eduardo Fonseca de Campos
- 25**     **FORMWORK FABRICATION FREEDOM FOR A CONCRETE CANOE**  
Andrei Jipa, Mathias Bernhard, Nicolas Ruffray, Timothy Wangler, Robert Flatt, Benjamin Dillenburger
- 45**     **PARAMETRICAL DESIGN TOOL AND THE PRODUCTION OF TECHNICAL DATA FOR SUPERADOBE DOMES**  
FERRAMENTA DE DESENHO PARAMÉTRICO E A PRODUÇÃO DE DADOS TÉCNICOS PARA DOMOS DE SUPERADOBE  
Deborah Macêdo dos Santos, José Nuno Beirão
- 61**     **ARQUITECTURAS EN RELACIÓN CON EL CONTEXTO: COMPORTAMIENTOS SENSIBLES COMO FORMAS DE COMUNICACIÓN**  
ARCHITECTURES IN RELATIONSHIP WITH THE CONTEXT: SENSITIVE BEHAVIOURS AS A KIND OF COMMUNICATION  
Daniela Frogheri, Fernando Meneses-Carlos, Alberto T. Estévez
- 76**     **PAVILHÃO FAB!t PROPOSTA PORTÁTIL PARA INSERÇÃO DA CULTURA MAKER NO ENSINO TRADICIONAL**  
FAB!t PAVILION: A PORTABLE PROPOSAL TO INCLUDE THE MAKER CULTURE IN TRADITIONAL EDUCATION  
Giordana Dileta Pacini, Andrés Martín Passaro, Gonçalo Castro Henriques
- 90**     **A ESTRUTURAÇÃO DO SABER RELACIONADO A GEOMETRIA COMPLEXA E A MODELAGEM PARAMÉTRICA DE ESTRUTURAS REGENERATIVAS NA ARQUITETURA**  
THE STRUCTURING OF KNOWLEDGE RELATED TO COMPLEX GEOMETRY AND PARAMETRIC MODELING OF REGENERATIVE STRUCTURES IN ARCHITECTURE  
Janice de Freitas Pires, Alice Theresinha Cybis Pereira
- 111**    **BONE-INSPIRED 3D PRINTED STRUCTURES FOR CONSTRUCTION APPLICATIONS**  
Roberto Naboni, Anja Kunic
- 125**    **AValiação DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS ABS E PLA EM IMPRESSÃO 3D VISANDO SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ESTRUTURAL**  
EVALUATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF ABS AND PLA POLYMERS IN 3D PRINTING FOR STRUCTURAL PERFORMANCE SIMULATION  
Andressa C. P. Martinez, Douglas L. de Souza, Denise M. dos Santos, Leonardo G. Pedroti, Joyce C. Carlo, Marianna A. D. Martins
- 142**    **MODELAGEM DINÂMICA DE COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS POR MULTICRITÉRIOS: EMPREGO DE MODELO PARAMÉTRICO E ALGORITMO GENÉTICO NO ESTUDO DA ÁREA DE PATRIMÔNIO MUNDIAL RECONHECIDO PELA UNESCO NA PAMPULHA, BRASIL**  
DYNAMIC MODELS OF MULTICRITERIA TO COMBINE VARIABLES: THE USE OF PARAMETRIC MODEL AND GENETIC ALGORITHM IN THE STUDY OF THE WORLD HERITAGE AREA RECOGNIZED BY UNESCO IN PAMPULHA, BRAZIL  
Silvio Romero Fonseca Motta, Ana Clara Mourão Moura, Suellen Roquete Robeiro

# Editorial Volume 14 Número 1 2019

## Número Especial: *Resilience Design*

Continuando a colaboração entre a revista Gestão & Tecnologia de Projetos (GTP) e da Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital (SIGraDi), para esta edição especial nós selecionamos o tema do XXI Congresso da SIGraDi, *Resilience Design*, que foi realizado de 22 a 24 de novembro de 2017 na cidade de Concepción, no Chile, e foi organizado pela Faculdade de Arquitetura, Urbanismo e Geografia da Universidade de Concepción.

*Resilience Design* revela a preocupação dos acadêmicos e pesquisadores sobre questões relacionadas às mudanças climáticas e aos desastres naturais, associados a estados de vulnerabilidade e riscos, com amplos efeitos sobre a sociedade e as diversas formas de habitar o território. Estes temas são relevantes para os campos da Arquitetura e do Design, bem como para áreas emergentes das Artes e das Ciências Humanas.

Pensar no *Resilience Design* é nos posicionar sobre novos cenários de reflexão e ação, em que, apoiados no pensamento transdisciplinar e no trabalho colaborativo, possamos realizar uma nova aproximação aos nossos territórios e as suas demandas, mais contextualizada e ajustada às suas necessidades atuais e futuras, estabelecendo os elementos-chave para promover a mudança em nossas sociedades e em nossas cidades.

As tecnologias de informação e comunicação (TIC), o design e a construção paramétrica, o design de interface com base na experiência do usuário (UX), o uso do *Building Information Modeling* (BIM) e/ou dos Sistemas de Informação Geográfica (GIS) entre muitos outros, vêm oferecendo uma grande variedade de instrumentos e possibilidades de interação com o habitat social, propiciando uma mudança substancial na maneira de entendermos e nos relacionarmos com o ambiente construído e com o território. Isto implica em um forte compromisso e responsabilidade social das nossas disciplinas e uma necessária vinculação das pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos para as nossas diversas realidades, para nos colocarmos a serviço das comunidades vulneráveis ou com uma condição de alto risco, submetidos a constantes processos resilientes.

Integrar-se e agir sobre esses novos cenários de mudança através do *Resilience Design*, permite sustentar pesquisas e processos produtivos, assim como o surgimento de novos meios em contextos de interdisciplinaridade, cujo maior valor é influenciar os processos de ensino, aprendizagem e prática profissional das distintas áreas do conhecimento relacionadas ao habitat humano.

Após o Congresso e com base na avaliação realizada pelo Comitê Científico Internacional da SIGraDi, pré-seleccionamos 24 trabalhos provenientes da Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Espanha, Itália, México, Suíça e Uruguai, e seus autores foram convidados a enviar artigos expandidos que passaram por um novo processo de avaliação em dupla rodada por pares da revista, e como resultado deste processo foram selecionados nove artigos. Enquadrados nas áreas do design e do projeto em todas as suas escalas, os diversos tipos de abordagens apresentados nos artigos desta edição propõem uma nutrida e valiosa pluralidade de visões que pode fomentar uma reformulação do nosso olhar sobre a temática desenvolvida.

No primeiro artigo, Daniella Naomi Yamana, Jady Medeiros, Eduardo Ignacio Lopes e Paulo Eduardo Fonseca de Campos apresentam seus estudos sobre as calçadas drenantes, levando-se em consideração a instalação de um sistema de microdrenagem de águas pluviais em áreas de vulnerabilidade socioeconômica localizadas na cidade de São Paulo, no Brasil. Tomando como partido as tecnologias de fabricação digital, o artigo mostra a produção de formas e de módulos pré-fabricados de microconcreto de alto desempenho. Assim, este artigo se insere dentro de um escopo que abarca a fabricação digital como meio de otimização do trabalho de carpintaria tradicional empregado na construção civil.

Andrei Jipa, Mathias Bernhard, Nicolas Ruffray, Timothy Wangler, Robert Flatt e Benjamin Dillenburger também apresentam um método que busca superar as limitações das tradicionais formas de trabalhar a madeira. Para tanto, os autores exploram o uso de impressoras 3D na produção de uma canoa, intitulada skelETHon, cuja forma também é fruto de um pensamento fundamentado na biomimética, temática amplamente explorada no contexto da arquitetura digital. A partir dessa experiência, os autores buscam evidenciar que a otimização computacional pode contribuir tanto para a redução de materiais quanto para o desenho de estruturas inovadoras.

Deborah Macêdo dos Santos e José Nuno Beirão também contribuem para evidenciar algumas potencialidades das tecnologias digitais, mais especificamente, do desenho gerativo paramétrico, nos processos construtivos. Os autores apresentam uma ferramenta paramétrica, intitulada CICERO, que objetiva auxiliar os arquitetos a projetarem e construir domos de superadobe. Assim, verificam-se algumas contribuições do desenho paramétrico na concepção formal em Arquitetura.

A partir da temática da construção de pavilhões, Daniela Frogheri, Fernando Meneses-Carlos e Alberto Estévez desenvolvem um objeto arquitetônico sensível que, baseado no comportamento de seres vivos, interage com o exterior, gerando uma resiliência recíproca entre o pavilhão e o ambiente. Por meio dessa experiência, os autores integram os processos de morfogênese digital, o design algorítmico e a utilização de Arduino, propondo uma arquitetura que supera os limites estáticos e contempla princípios formais dinâmicos.

Giordana Dileta Pacini, Andrés Martín Passaro e Gonçalo Castro Henriques apresentam uma proposta de um pavilhão portátil, intitulado Pavilhão FAB!t, o qual, a partir de estruturas montáveis e desmontáveis, incorpora mecanismos de retração e expansão, de tal forma que possa atender a diferentes demandas espaciais. Além de abordar os temas da cultura maker e da indústria 4.0, os autores buscam articular algumas questões da fabricação digital aplicada ao contexto da educação.

Janice de Freitas Pires e Alice Theresinha Cybis Pereira buscam explicitar, a partir de duas teorias didáticas, alguns casos de modelagem paramétrica de estruturas regenerativas na Arquitetura, com especial enfoque na geometria de superfícies mínimas. De forma mais específica, o artigo enfoca algumas possibilidades de aplicação, no campo da Arquitetura e do Design, da geometria complexa de estruturas com potencial de regeneração. Assim, o artigo faz uma contribuição para a modelagem paramétrica e para o desenvolvimento de projetos que se valem de algumas estruturas formalmente inspiradas na natureza para sua composição formal.

O artigo de Roberto Naboni e Anja Kunic apresenta uma abordagem metodológica projetual também baseada na biomimética. Visando às construções materialmente eficientes, os autores investigam as propriedades intrínsecas às estruturas ósseas e propõem sua exploração a partir do uso de técnicas de prototipagem rápida e de fabricação digital. Mais especificamente, o texto apresenta os resultados de uma pesquisa de uma estrutura treliçada, um protótipo construtivo baseado em células de octaedro, o qual objetiva a resiliência estrutural.

Uma vez que o uso de impressoras 3D de baixo custo já está difundido tanto no meio acadêmico quanto na prática profissional, Andressa Carmo Pena Martinez, Douglas Lopes de Souza, Denise Mônaco dos Santos, Leonardo Gonçalves Pedroti, Joyce Correna Carlo e Marianna Auxiliadora Dias Martins contribuem com um artigo que fornece subsídios para o melhoramento da performance dos modelos impressos com essa tecnologia. Os autores apresentam um estudo sobre o comportamento mecânico dos filamentos termoplásticos de polímeros ABS e PLA, os quais são recorrentemente utilizados nos processos de fabricação digital aditiva, nas impressoras 3D. A partir da realização de alguns ensaios destrutivos dos modelos físicos, os autores buscam levantar dados que possam contribuir para a criação de novos algoritmos que visam facilitar a simulação computacional, a otimização estrutural e a maior precisão do comportamento mecânico dos modelos.

Por fim, no último artigo desta edição, Silvio Romero Fonseca Motta, Ana Clara Mourão Moura e Suellen Roquete Robeiro apresentam os resultados de uma pesquisa que tem como recorte espacial a região da Pampulha (localizada na cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais, no Brasil) reconhecida pela UNESCO como patrimônio mundial. Do ponto de vista metodológico, os autores exploram as potencialidades da simulação com algoritmos genéticos, utilizando um conjunto de parâmetros para aumentar as potencialidades do modelo de análise multicritério, um método tradicional e útil para apoiar o processo de planejamento espacial.

Aproveitamos este editorial para agradecer aos autores dos artigos que compõem esta edição em nome do Comitê Executivo Internacional da SIGraDi, bem e ao editor chefe, Dr. Márcio Minto Fabricio, pela confiança mais uma vez depositada em nosso trabalho.

Desejamos a todos uma excelente leitura e que as reflexões apresentadas nos artigos possam impulsionar futuras pesquisas.

Dra. Maria Elena Tosello

Dr. Frederico Braida

# Editorial Volumen 14 Numero 1 2019

## Numero Especial: *Resilience Design*

Continuando con la colaboración entre la revista Gestión y Tecnología de Proyectos (GTP) y la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital (SIGraDi), para este número especial hemos seleccionado el tema del XXI congreso de SIGraDi, *Resilience Design*, el cual se realizó del 22 al 24 de noviembre de 2017 en la ciudad de Concepción, Chile, y fue organizado por la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía de la Universidad de Concepción.

*Resilience Design* revela la preocupación de académicos e investigadores sobre cuestiones vinculadas al cambio climático y los desastres naturales, asociados a estados de vulnerabilidad y riesgo, con amplios efectos sobre la sociedad y las diversas formas de habitar el territorio. Estos temas resultan relevantes en los campos de la Arquitectura y el Diseño, como así también en áreas emergentes de las Artes y las Ciencias Humanas.

Pensar en *Resilience Design* es situarnos sobre nuevos escenarios de reflexión y acción, donde apoyados en el pensamiento transdisciplinar y el trabajo colaborativo, realicemos una nueva aproximación a nuestros territorios y sus demandas, más contextualizada y ajustada a sus actuales y futuros requerimientos, estableciendo los elementos claves para impulsar un cambio en nuestras sociedades y en nuestras ciudades.

Las tecnologías de información y comunicación (TIC), el diseño y la construcción paramétrica, el diseño de interfaces basado en la experiencia de usuario (UX), el uso de *Building Information Modeling* (BIM) y/o de Sistemas de Información Geográfica (SIG) entre muchos otros, vienen entregando un enorme caudal de instrumentos y posibilidades de interacción con el hábitat social, propiciando un cambio sustantivo en la forma de entender y relacionarnos con el entorno construido y los territorios que lo albergan. Esto implica un fuerte compromiso y responsabilidad social de nuestras disciplinas, y una necesaria vinculación de las investigaciones y los desarrollos tecnológicos a nuestras diversas realidades, para ponerlos al servicio de comunidades y entornos vulnerables o con una alta condición de riesgo, sometidos a constantes procesos resilientes.

Integrarse y actuar en estos nuevos escenarios de cambio a través de *Resilience Design*, permite sustentar investigaciones y procesos productivos, así como el surgimiento de nuevos medios en contextos de interdisciplina, cuyo mayor valor es el de influir en los procesos de enseñanza, aprendizaje y práctica profesional de las distintas áreas del conocimiento relacionadas con el hábitat humano.

Luego del congreso y en base a la evaluación realizada por el Comité Científico Internacional de SIGraDi, pre-seleccionamos 24 trabajos provenientes de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, España, Italia, México, Suiza y Uruguay, y sus autores fueron invitados a enviar artículos ampliados que pasaron por un nuevo proceso de evaluación a doble vuelta por pares de la revista, y como resultado de este proceso fueron seleccionados nueve artículos. Enmarcados en los ámbitos del diseño y el proyecto en todas sus escalas, los diversos tipos de abordajes presentados en los artículos de esta edición proponen una nutrida y valiosa pluralidad de visiones que puede provocar una reformulación de nuestra mirada sobre la temática desarrollada.

En el primer artículo, Daniella Naomi Yamana, Jady Medeiros, Eduardo Ignacio Lopes y Paulo Eduardo Fonseca de Campos presentan sus estudios sobre aceras drenantes, teniendo en cuenta la instalación de un sistema de microdrenaje de aguas pluviales en áreas de vulnerabilidad socioeconómica localizadas en la región en la ciudad de San Pablo, Brasil. Tomando como punto de partida las tecnologías de fabricación digital, el artículo muestra la producción de formas y módulos prefabricados en microconcreto de alto rendimiento. Así, este artículo se inserta dentro de un ámbito que abarca la fabricación digital como medio de optimización del trabajo de carpintería tradicional empleado en la construcción civil.

Andrei Jipa, Mathias Bernhard, Nicolas Ruffray, Timothy Wangler, Robert Flatt y Benjamin Dillenburger también presentan un método que busca superar las limitaciones de las tradicionales formas de trabajar la madera. Para ello, los autores exploran el uso de impresoras 3D en la producción de una canoa, titulada skelETHon, cuya forma también es fruto de un pensamiento fundamentado en la biomimética, temática ampliamente explorada en el contexto de la arquitectura digital. A partir de esa experiencia, los autores buscan evidenciar que la optimización computacional puede contribuir tanto a la reducción de materiales como al diseño de estructuras innovadoras.

Deborah Macêdo dos Santos y José Nuno Beirão también contribuyen a evidenciar algunas potencialidades de las tecnologías digitales, más específicamente, del diseño paramétrico generativo en los procesos constructivos. Los autores presentan una herramienta paramétrica denominada CICERO, cuyo propósito es auxiliar a los arquitectos a proyectar y construir domos de superadobe. Así, se verifican algunas contribuciones del diseño paramétrico en la concepción formal de la Arquitectura.

A partir de la problemática en torno a la construcción de pabellones, Daniela Frogheri, Fernando Meneses-Carlos y Alberto Estévez desarrollan un objeto arquitectónico sensible que, basado en el comportamiento de seres vivos, interactúa con el exterior, generando una resiliencia recíproca entre el pabellón y el ambiente. Por medio de esta experiencia, los autores integran procesos de morfogénesis digital, diseño algorítmico y utilización de Arduino, proponiendo una arquitectura que supera los límites estáticos contemplando principios formales dinámicos.

Giordana Dileta Pacini, Andrés Martín Passaro y Gonçalo Castro Henriques presentan una propuesta de un pabellón portátil denominado Pabellón FAB!t, el cual, a partir de estructuras montables y desmontables, incorpora mecanismos de retracción y expansión para atender diferentes demandas espaciales. Además de abordar los temas de la cultura maker y de la industria 4.0, los autores buscan articular algunas cuestiones sobre la fabricación digital aplicada al contexto de la educación.

Janice de Freitas Pires e Alice Theresinha Cybis Pereira buscan explicitar, a partir de dos teorías didácticas, algunos casos de modelado paramétrico de estructuras regenerativas en la Arquitectura, con especial énfasis en la geometría de superficies mínimas. Más específicamente, el artículo se enfoca en algunas posibilidades de aplicación en el campo de la Arquitectura y el Diseño, de la geometría compleja de estructuras con potencial de regeneración. Así, el artículo realiza una contribución al modelado paramétrico y al desarrollo de proyectos que utilizan estructuras inspiradas en la naturaleza para su composición formal.

El artículo de Roberto Naboni y Anja Kunic presenta un enfoque metodológico proyectual también basado en la biomimética. Los autores investigan las propiedades intrínsecas de las estructuras óseas y proponen su exploración a partir del uso de técnicas de prototipado rápido y fabricación digital, a fin de lograr construcciones materialmente eficientes. Más específicamente, el texto presenta los resultados de una investigación sobre una estructura trenzada, un prototipo constructivo basado en células de octaedro cuyo objetivo es la resiliencia estructural.

Dado que el uso de impresoras 3D de bajo costo ya está difundido tanto en el medio académico como en la práctica profesional, Andressa Carmo Pena Martínez, Douglas Lopes de Souza, Denise Mónaco dos Santos, Leonardo Gonçalves Pedroti, Joyce Correna Carlo y Marianna Auxiliadora Dias Martins contribuyen con un artículo que proporciona orientaciones para el mejoramiento del desempeño de los modelos impresos con esa tecnología. Los autores presentan un estudio sobre el comportamiento mecánico de los filamentos termoplásticos de polímeros ABS y PLA, los cuales son recurrentemente utilizados en los procesos de fabricación digital aditiva con impresoras 3D. A partir de la realización de algunos ensayos destructivos de los modelos físicos, los autores buscan relevar datos que puedan contribuir a la creación de nuevos algoritmos orientados a facilitar la simulación computacional, la optimización estructural y la mayor precisión del comportamiento mecánico de los modelos.

En el último artículo de esta edición, Silvio Romero Fonseca Motta, Ana Clara Mourão Moura y Suellen Roquete Robeiro, presentan los resultados de una investigación que tiene como recorte espacial la región de la Pampulha (ubicada en la ciudad de Belo Horizonte, en Minas Gerais, Brasil), reconocida por la UNESCO como patrimonio mundial. Desde el punto de vista metodológico, los autores exploran las potencialidades de la simulación con algoritmos genéticos, utilizando un conjunto de parámetros para aumentar las potencialidades de un modelo de análisis multicriterio, un método tradicional y útil para apoyar el proceso de planificación espacial.

Aprovechamos esta editorial para agradecer a los autores de los artículos que componen esta edición en nombre del Comité Ejecutivo Internacional de SIGraDi, así como al editor en jefe de GTP, Dr. Márcio Minto Fabricio, por la confianza depositada una vez más en nuestro trabajo.

Deseamos a todos una excelente lectura y que las reflexiones presentadas en los artículos puedan impulsar futuras investigaciones.

Dra. Maria Elena Tosello

Dr. Frederico Braidá



# CALÇADAS DRENANTES: INTERVENÇÕES FÍSICAS COM DESENVOLVIMENTO SOCIAL

ARTIGO

**Draining Pavements: physical interventions with social development**

**Daniella Naomi Yamana<sup>1</sup>, Jady Medeiros<sup>2</sup>, Eduardo Ignacio Lopes<sup>1</sup>, Paulo Eduardo Fonseca de Campos<sup>1</sup>**

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma pesquisa aplicada relacionada à instalação de um sistema de microdrenagem de águas pluviais em áreas de vulnerabilidade socioeconômica na cidade de São Paulo, Brasil. Para tal, foi empregada a pré-fabricação leve em microconcreto de alto desempenho, moldado em fôrmas produzidas com o auxílio de máquinas de fabricação digital. O principal objetivo é promover melhoramentos urbanos em assentamentos precários acompanhados de desenvolvimento econômico local, fomentado pela autogestão e produção comunitária. Ademais, nota-se a importância para esta pesquisa de se encorajar processos participativos que envolvem a comunidade local em atividades para resolução de problemas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Urbanismo colaborativo; Drenagem urbana; Microconcreto; Fabricação digital.

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo

<sup>2</sup> Universidade São Judas Tadeu

**ABSTRACT:** This work presents the development of an applied research related to the installation of rainwater drainage systems in areas of economic and social vulnerability in São Paulo City, Brazil. For such, we are employing light prefabrication based on high performance microconcrete, molded in formwork produced with the aid of digital manufacturing. Our main purpose is to promote urban improvements in precarious settlements along with local economic development, made possible by self-management and community production. It is also relevant for us to encourage participatory processes that involve the local community in problem-solving activities, while allowing appropriation of the technology applied.

**KEYWORDS:** Collaborative urbanism; Urban drainage; Microconcrete; Digital fabrication.

## How to cite this article:

YAMANA, D. N.; MEDEIROS, J.; LOPES, E. I.; CAMPOS, P. E. F. Calçadas drenantes: intervenções físicas com desenvolvimento social. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.14, n.1, p.9-24, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.147900>

## Fonte de financiamento:

Declaro não haver

## Conflito de interesse:

Declaro não haver

**Submetido em:** 07/07/2018

**Aceito em:** 21/02/2018



## INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de pesquisa aplicada voltada a explorar as possibilidades do uso da fabricação digital em projetos de infraestrutura urbana. Com esse intuito vem sendo desenvolvida uma proposta para a produção de módulos pré-fabricados de microconcreto de alto desempenho, cujos moldes serão executados com o uso de uma fresadora CNC. A proposta prevê a posterior transferência da tecnologia às comunidades residentes em bairros da periferia de São Paulo, que constituem a população-alvo do projeto. A seguir são apresentadas as etapas do processo de investigação e prototipagem do sistema construtivo denominado “Calçadas Drenantes” no contexto urbano de áreas de alta vulnerabilidade social e ambiental, a fim de buscar solucionar não só a questão técnica da drenagem de águas superficiais, mas também de modo a fomentar o desenvolvimento de uma alternativa de geração de emprego e renda nestas localidades.

### O contexto da intervenção

O crescimento da população urbana no século XX, decorrente da industrialização das metrópoles brasileiras e do êxodo rural, culminou em um processo de ocupação territorial acelerado e desordenado, onde grande parte da população migrante passa a se instalar em áreas periféricas das cidades. A segregação urbana resultante consolida a existência de uma cidade informal - paralela à cidade formal e ordenada - que surge espontaneamente por demanda, em ocupações irregulares organizadas pelos próprios moradores. Nela, somam-se as dificuldades de acesso à infraestrutura e aos serviços urbanos básicos, menores oportunidades de emprego, uma maior exposição à violência e à discriminação (Maricato, 2003). Um reflexo direto desse processo na qualidade de vida dos brasileiros é o acesso ao saneamento básico (Figura 1) que, no ano de 2010, não chegava a metade da população do país (Instituto Trata Brasil, 2010).

**Figura 1:** Gráfico comparativo do número de moradias com e sem acesso a esgoto no Brasil por ano.

**Fonte:** Instituto Trata Brasil/ FGV.



Ademais, a vulnerabilidade dos assentamentos precários é acentuada quando a população marginalizada ocupa regiões de risco ambiental, como é o caso das comunidades-alvo aqui focalizadas, residentes nos bairros Jardim Lapenna e Jardim Pantanal, localizados junto à várzea do Rio Tietê e no extremo leste da Cidade de São Paulo (Figura 6). Nesses bairros é possível ainda visualizar o avanço de ocupações irregulares em direção aos corpos d'água (Figuras 2 e 3), fenômeno potencializado nos últimos anos em decorrência do empobrecimento da população, da demanda por moradia e do crescimento acelerado do desemprego (Figura 4).



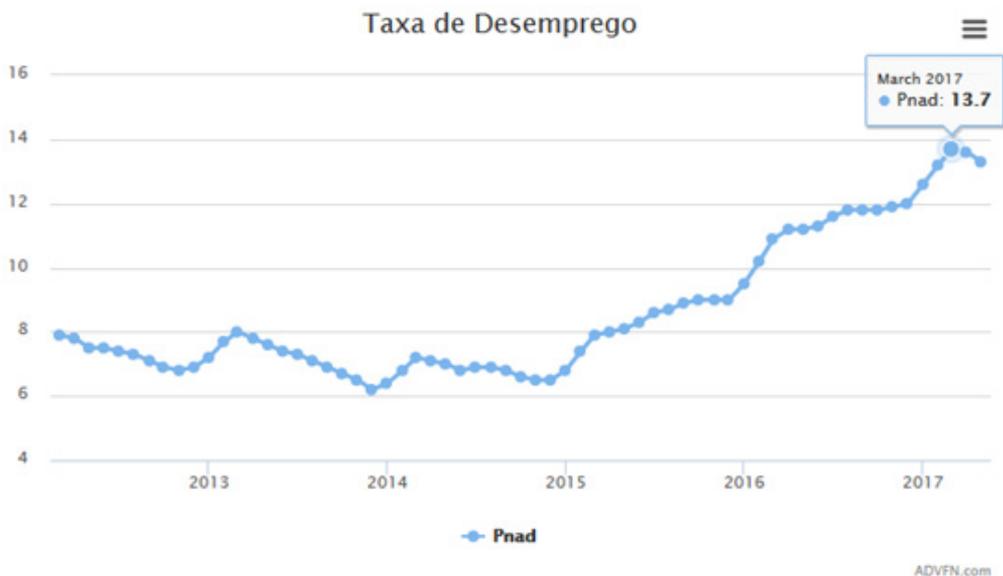
**Figura 2:** Imagens de satélite do bairro Jardim Lapenna, São Paulo, onde é possível comparar, ao longo dos anos, o crescimento da ocupação irregular nas margens do Córrego Jacu.

**Fonte:** Google Earth Pro.



**Figura 3:** Imagens de satélite do bairro Jardim Pantanal, São Paulo, onde é possível comparar, ao longo dos anos, o crescimento da ocupação irregular nas margens do Rio Tietê.

**Fonte:** Google Earth Pro.



**Figura 4:** Gráfico da taxa de desemprego no Brasil – proporção entre a população desempregada e a população economicamente ativa - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua.

**Fonte:** PNAD 2013 a 2017. Elaborado por ADVFN Brasil.

Considerando o agravamento das condições de segurança e salubridade nas comunidades-alvo, o intuito da proposta aqui apresentada é, portanto, oferecer uma alternativa a esse tipo de condição, e assim, minimizar os danos e riscos causados pelas inundações recorrentes. A alternativa desenvolvida para esse problema foi a utilização de módulos pré-fabricados leves em microconcreto, projetados de forma a favorecer a transferência de tecnologia e a participação comunitária.

O sistema construtivo apresentado teve sua origem em 2006, por meio de uma ação ocorrida no âmbito do PIAI – *Programa de Integración de Asentamientos Irregulares*, vinculado ao *Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente* (MVOTMA) do Uruguai. Na concepção original do projeto estava prevista a criação de unidades de produção designadas como CPC – Centro de Produção Comunitária – as quais seriam responsáveis pela produção de elementos pré-fabricados de microconcreto voltados para a construção de infraestrutura e equipamentos urbanos em zonas periféricas de diversas cidades uruguaias (FONSECA DE CAMPOS, 2013).

A partir dessa experiência foram obtidos resultados satisfatórios na prototipagem dos componentes da calçada drenante que, mesmo produzidos com métodos convencionais – fôrmas de madeira executadas em carpintaria tradicional – e em condições não ideais, alcançaram o desempenho estrutural e a qualidade desejados (Figura 5).



**Figura 5:** Execução do protótipo da calçada drenante em um centro comunitário na periferia de Montevideu, Uruguai, em 2006.

**Fonte:** *Microconcreto de Alto Desempenho: La tecnología del MicroCAD aplicada en la construcción del hábitat social.*

Cabe aqui ressaltar a importância histórica da bem-sucedida experiência uruguaia na produção de habitação social por meio das cooperativas de ajuda-mútua. A sua influência direta é sentida no primeiro experimento do tipo na cidade de São Paulo, em Vila Nova Cachoeirinha no início dos anos 1980, e em especial na sua terceira fase, onde já existia a intenção da racionalização das construções por meio do uso de pré-fabricação leve com argamassa armada. (BARAVELLI, 2006).

Uma oportunidade de dar continuidade ao trabalho desenvolvido no Uruguai foi justamente a aplicação do sistema construtivo à realidade de periferias paulistanas, que também sofrem com o problema do manejo de águas e drenagem. Além disso, viu-se aí a possibilidade de incorporar novas técnicas de fabricação digital na construção do sistema, a fim de facilitar a replicação do modelo e transferência de conhecimento técnico. Para tornar o projeto viável neste âmbito, conta-se atualmente com o suporte da rede municipal Fab Lab Livre SP, implantada há cerca de dois anos na cidade de São Paulo e reconhecida atualmente como a maior rede pública de laboratórios de fabricação digital no mundo, constituída por 12 unidades (Figura 6).



**Figura 6:** Mapa simplificado do Município de São Paulo com a localização das unidades Fab Lab Livre SP e das comunidades-alvo do projeto “Calçadas Drenantes”.

**Fonte:** Vinícius H. Ladivez e Guilherme Queiroz.

A aplicação prática do sistema construtivo de pré-fabricados leves para infraestruturas se dará nos chamados “canteiros experimentais”, unidades de produção comunitária implantadas nas comunidades-alvo. Em suma, pode-se dizer que o objetivo final da investigação aqui apresentada é oferecer às comunidades envolvidas as ferramentas e informações necessárias a fim de melhorar sua qualidade de vida, capazes de garantir seus direitos básicos de acesso à cidade, dentro de uma perspectiva emancipatória e de maior autonomia.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A inserção do projeto na realidade de uma cidade como São Paulo busca não apenas reproduzir os conceitos abordados na experiência ocorrida no Uruguai, mas também rever e adequar a proposta visando à democratização do acesso à informação e à aplicação dos processos construtivos nas condições específicas de cada local. Contando com a extensa rede pública de laboratórios de fabricação digital Fab Lab Livre SP, o grupo de pesquisa vem trabalhando no redesenho das fôrmas para a galeria de microconcreto, de modo a que ela possa ser construída utilizando-se uma fresadora CNC de grande formato. Esse equipamento, assim como a impressora 3D, cortadora a laser, cortadora de vinil e fresadora de precisão, fazem parte do maquinário básico de um Fab Lab (nome derivado do termo em inglês *Fabrication Laboratory*), estando disponível em todos os laboratórios da rede mundial criada no início dos anos 2000, a partir da experiência do “Center for Bits and Atoms” no MIT – *Massachusetts Institute of Technology* (GERSHENFELD, 2005). Logo, o projeto das “Calçadas Drenantes” poderá ser replicado em qualquer laboratório de fabricação digital de São Paulo, bem

como em qualquer Fab Lab do mundo, reforçando seu caráter colaborativo e aberto.

O produto deste trabalho, as fôrmas da galeria em microconcreto de alto desempenho, está sendo desenvolvido durante os Open Days de um Fab Lab Acadêmico – dia específico da semana aberto ao público externo à comunidade universitária –, quando seus integrantes, além de pesquisadores vindos de outras instituições de ensino e membros da comunidade, podem se reunir. O processo foi estudado com base em análises e discussões sobre as possibilidades de uso da pré-fabricação leve associada à manufatura digital, envolvendo a utilização da tecnologia do microconcreto de alto desempenho em obras de habitação de interesse social e infraestrutura urbana. Além disso, para cada etapa foram executados modelos em escala reduzida e programados experimentos práticos, principalmente relacionados à prototipagem rápida das fôrmas e ao manuseio dos equipamentos de fabricação digital.

### Microconcreto de alto desempenho

A nomenclatura microconcreto de alto desempenho tem sido adotada para descrever a técnica da argamassa armada ou ferro-cimento no contexto da pré-fabricação leve, destacando-se aqui as mais recentes inovações tecnológicas alcançadas nos últimos 15 anos. Diferentemente dos concretos convencionais, a argamassa armada já apresentava um baixo fator água/cimento, limitado pela norma brasileira a 0,45 (NBR 11173, 1990). Essa característica confere ao material elevada resistência estrutural, propiciando a concepção de elementos pré-fabricados de pequena espessura – entre 20 e 30 mm em média – e, conseqüentemente, de pequena massa.

A transição da argamassa armada para o microconcreto de alto desempenho, ou microCAD, ocorre na medida em que são incorporados à sua composição aditivos superplastificantes que permitem a redução da quantidade de água na mistura, sem perda de trabalhabilidade, alcançando valores de aproximadamente 0,40 na relação água/aglomerante – aglomerante, pois considera-se a possibilidade de adição de materiais ligantes complementares ao cimento. Sendo 0,40 a fronteira entre concretos usuais e concretos de alto desempenho (FONSECA DE CAMPOS, 2017), o microCAD se apresenta como um material com grande potencial para uso na pré-fabricação leve, capaz de oferecer uma maior densidade tecnológica e valor agregado aos produtos.

A redução da quantidade de água na mistura, entretanto, busca não apenas o aumento de resistência estrutural, como também a diminuição da porosidade do composto. Ao obter uma matriz mais compacta e menos permeável, é possível impedir ou dificultar, consideravelmente, a penetração de agentes agressivos externos e aumentar a vida útil do microconcreto de alto desempenho. Ademais, adotam-se armaduras difusas – malhas de aço com fios finos e pouco espaçados entre si, fibras sintéticas ou naturais – que reforçam a estrutura e limitam a fissuração da matriz cimentícia.

Em um contexto de desigualdade e segregação sócio-espacial, comum no ambiente urbano latino-americano, este trabalho adota como premissa o emprego da tecnologia do microCAD no desenvolvimento da pré-fabricação leve para obras de infraestrutura e habitação social. Dada a escassez de recursos públicos destinados às melhorias urbanas nas periferias, torna-se indispensável a busca por tecnologias acessíveis que visem a melhoria na qualidade de vida da população marginalizada e vulnerável.

Dentro dessa proposta, o microconcreto de alto desempenho se apresenta como uma alternativa economicamente viável. Graças à popularidade do concreto armado, os materiais necessários para a execução dos pré-fabricados leves podem ser encontrados facilmente em qualquer país. Ademais, a transferência de tecnologia é facilitada pelo conhecimento técnico prévio já acumulado em vários países da região, a exemplo do Brasil. Como resultado, o investimento inicial para a implantação de uma unidade de produção de elementos pré-fabricados em microconcreto, ou a adoção

dessa tecnologia em empresas, é consideravelmente reduzido.

No entanto, o maior atrativo desse método construtivo é, possivelmente, a velocidade e facilidade de execução, viabilizando políticas públicas que sejam mais eficientes ao atender às demandas da população por melhorias urbanas. Devido à sua leveza, o transporte e manuseio dos elementos pré-fabricados dispensam o uso de máquinas de grande porte ou capacidade de carga. Nesse sentido, a pré-fabricação em microCAD se apresenta como uma tecnologia bastante apropriada para intervenções em assentamentos precários, na medida em que as obras têm um caráter menos invasivo e mais adequado ao contexto, pois podem considerar o tecido urbano existente.

## Fabricação Digital

Ao contrário do que parece indicar o senso comum, as ferramentas de fabricação digital ou, mais precisamente, os equipamentos que operam através de Controle Numérico Computadorizado (CNC – *Computer Numerical Control*, no original em inglês), não são frutos de uma tecnologia recente, sendo que alguns possuem mais de 50 anos de existência. A primeira fresadora de controle numérico (NC – *Numeric Control*, no original em inglês) surgiu no final da década de 1940 no MIT com o intuito de facilitar a execução de peças de geometria complexa para a indústria aeronáutica e militar. Após duas décadas de desenvolvimento lento em virtude da baixa demanda fora da área governamental e da necessidade de computadores poderosos (e caros), o controle numérico computadorizado começa a se disseminar através de diversas áreas da manufatura apenas no final da década de 1960.

Em paralelo à disseminação dos computadores pessoais no começo da década de 1980, as tecnologias de fabricação digital passaram a ter um alcance ainda maior, com o advento de sistemas de prototipagem rápida, como a estereolitografia, as cortadoras a laser e outros equipamentos de comando numérico que foram submetidos a um processo exponencial de miniaturização e aumento de potencial produtivo. Esse salto culminou, no final dos anos 2000, com o aparecimento de máquinas CNC cuja operação, dimensões e custos eram muito mais acessíveis, passíveis de serem chamadas de equipamentos de fabricação pessoal (GERSHENFELD, 2005)

Analogamente à evolução no universo dos computadores — que em 1950 ocupavam andares inteiros em edifícios e hoje são carregados no bolso — pode-se dizer que as máquinas de comando numérico que pesavam toneladas e se serviam de enormes mainframes, atualmente podem funcionar sobre a mesa de um escritório, conectadas a um computador pessoal como, por exemplo, uma impressora 3D.

A fabricação ou manufatura digital é o termo genérico que engloba processos distintos de manufatura que possuem o fato em comum de fazerem uso de equipamentos e máquinas CNC. Em linhas gerais, os processos de fabricação digital podem ser classificados como sendo aditivos, subtrativos ou conformativos.

Na manufatura aditiva, ou impressão 3D, o material de base é depositado por extrusão (filamentos termoplásticos ou materiais de base cimentícia), processado por sinterização a laser ou impresso por meio de aglutinantes aplicados sobre material em pó, camada sobre camada, sucessivamente, formando assim o objeto final. Os processos subtrativos ocorrem quando a conformação final do objeto é obtida pelo desbaste e retirada do material de base, como nos processos tradicionais de usinagem. Fresadoras, cortadoras a laser, jato d'água e plasma são alguns dos equipamentos mais utilizados nesse tipo de processo. Já nos processos conformativos o material de base não sofre desbaste, adição ou transformação de estado físico, mas sua forma é alterada diretamente pela deformação mecânica do material, utilizando-se para tanto uma calandra ou braços robóticos, por exemplo.

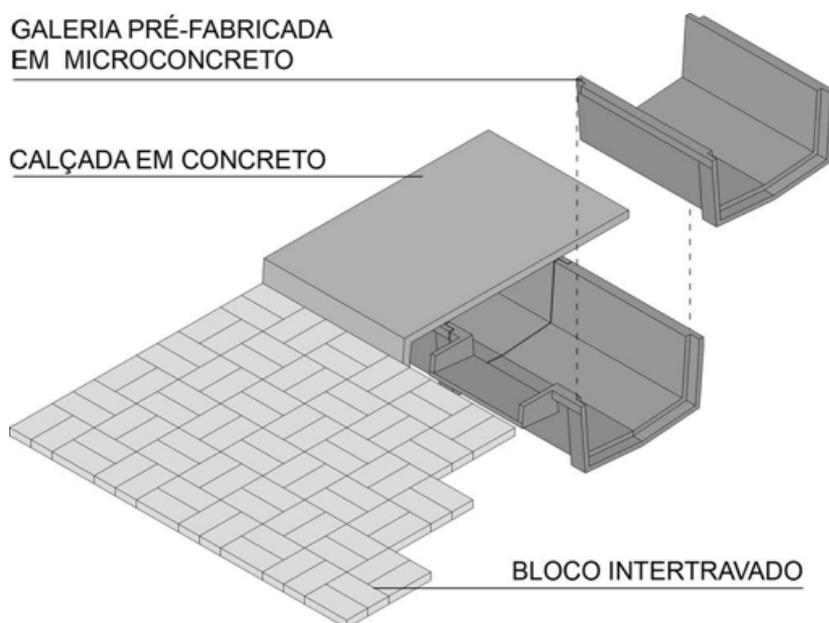
Em quaisquer dos processos de manufatura digital, sejam eles aditivos, subtrativos ou conformativos, a lógica é sempre a mesma: uma forma é

gerada por computador (CAD – Desenho/Projeto Auxiliado por Computador ou *Computer Aided Design*, no original em inglês) e nela são introduzidos os parâmetros pertinentes à sua fabricação (CAM – Manufatura Auxiliada por Computador ou *Computer Aided Manufacturing*, no original em inglês). Após essa etapa o programa gera uma sequência de instruções numéricas, o G-code (Código G, em português), que irá comandar um equipamento controlado por computador (CNC) de maneira a que ele execute todas as diferentes tarefas necessárias para a fabricação do objeto em questão.

Diferentemente das máquinas utilizadas na manufatura tradicional em série, que são ajustadas — e às vezes até mesmo fabricadas — para executar uma mesma tarefa específica indefinidamente, uma máquina CNC pode produzir objetos na escala de uma única unidade, pois, para esse equipamento flexível, não existem formas ou ajustes preestabelecidos, ele obedecerá às instruções contidas no G-code, possibilitando assim um altíssimo grau de personalização ou customização.

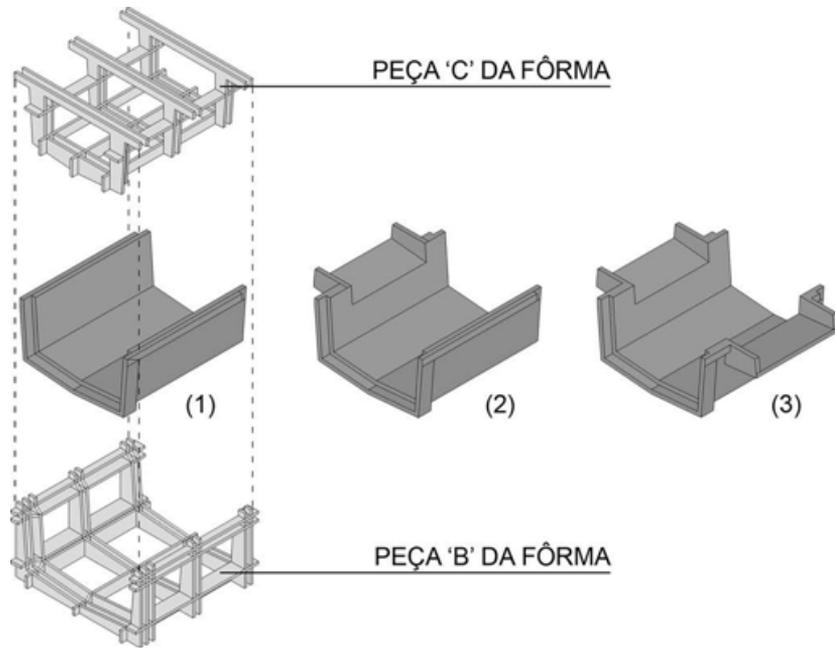
### Processo de fabricação digital do produto

O objeto de estudo, o sistema construtivo denominado “Calçadas Drenantes” (Figura 7), é composto por dois elementos principais: a galeria, peça pré-fabricada em microconcreto de alto desempenho, e a calçada propriamente dita, peça feita de concreto convencional. O projeto original – concebido no âmbito do PIAI, vinculado ao MVOTMA do Uruguai, 2006 – consiste em três módulos de galeria: simples (1), com uma boca de lobo (2) e com duas bocas de lobo (3); que, montados com juntas a seco, configuram um sistema de galerias de microdrenagem superficial de águas pluviais (Figura 8). Adicionalmente, o conjunto pode exercer a função de canaleta de utilidades, abrigando tubulações de água, esgoto, entre outros serviços, e atendendo à demanda por uma infraestrutura urbana básica (Figura 9).



**Figura 7:** Montagem do sistema construtivo para drenagem superficial “Calçadas Drenantes”.

**Fonte:** Autores.



**Figura 8:** Módulos da galeria pré-fabricada em microCAD do projeto original, concebido no Uruguai: (1) simples; (2) com uma boca de lobo; (3) com duas bocas de lobo; e representação da montagem da fôrma em madeira, separada em duas peças: B e C.

**Fonte:** Autores.



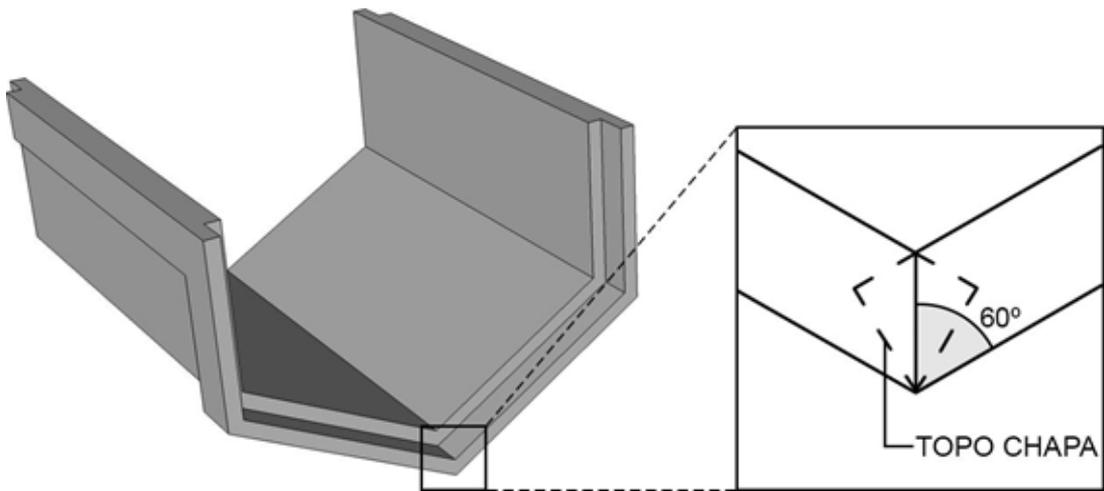
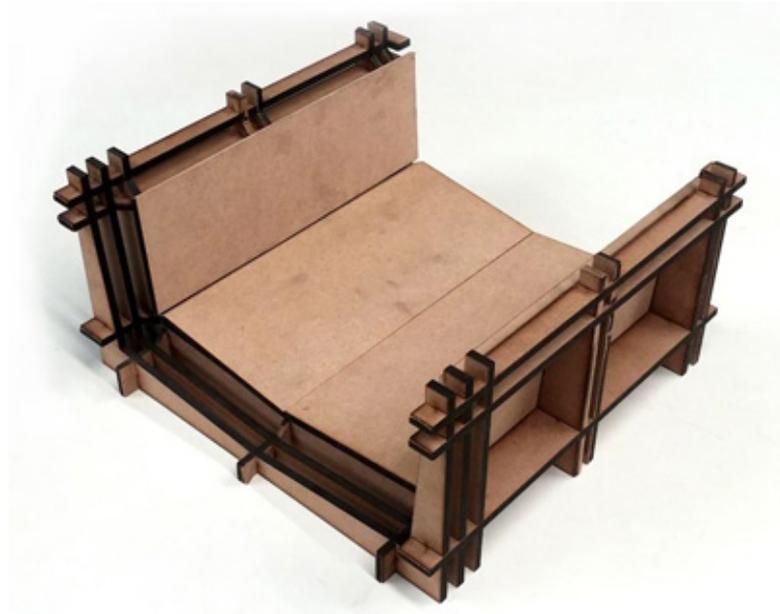
**Figura 9:** Fotomontagem representando a implantação do sistema “Calçadas Drenantes” de drenagem superficial em áreas de assentamento precário.

**Fonte:** FONSECA DE CAMPOS, P.E.

A recuperação deste projeto e sua implantação na cidade de São Paulo se deu com a incorporação dos instrumentos de fabricação digital, sendo o primeiro passo a adaptação da fôrma, originalmente em carpintaria tradicional, para a usinagem na fresadora CNC. Procurou-se manter a materialidade da fôrma, devido à tradição brasileira em utilizar madeira para moldar concreto armado in loco, adotando compensado naval de 18 mm de espessura como material-base de ótima resistência estrutural e impermeabilidade. Com base no projeto uruguaio, o processo começou com o redesenho e prototipagem da fôrma para o módulo da galeria pré-fabricada em microconcreto sem nenhuma abertura, de geometria mais simples. A lógica aplicada era que, a partir desse modelo básico, seriam trabalhadas as galerias mais complexas, como os módulos que realizam curvas ou que possuem boca de lobo.

Os protótipos iniciais foram feitos com auxílio do programa de modelagem digital 123D *Make*, capaz de transformar objetos tridimensionais em ‘fatias’ 2D planificadas para a máquina de corte a laser. Entretanto, os modelos de organização das ‘fatias’ oferecidos pelo programa não eram os mais eficientes estruturalmente para o projeto, resultando no abandono dessa abordagem. Desse modo, o grupo de pesquisa se dedicou ao desenho manual da fôrma, utilizando-se do programa de computador *Rhinoceros*, “software de modelagem de superfícies NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) que possibilita a proposição e visualização de superfícies de múltiplas curvaturas a partir da modelagem através de pontos de controle” (SOARES, 2013). Simulando o projeto em carpintaria tradicional, a fôrma foi separada em duas peças, nomeadas de peça C e peça B (Figura 8), que facilitariam o saque do elemento em microCAD depois de concretado. As peças foram desenvolvidas separadamente, porém seguindo a mesma lógica estrutural de encaixe ‘macho-fêmea’ das costelas de sustentação. Para a junção das partes da fôrma durante a concretagem foi pensado um sistema de fixação por barra roscada, onde as peças B e C seriam unidas pelo travamento de blocos de madeira fixados entre duas costelas de sustentação transversais, solução que exigiu a duplicação da estrutura.

Ao finalizar a modelagem digital dessa primeira proposta, foram realizadas duas maquetes na cortadora a laser: uma de papelão, na escala 1:6; e outra de MDF (Medium Density Fiberboard), na escala 1:3. Ainda que tenha sido feita com um material diferente, a maquete em papelão induziu análises estruturais importantes, como a necessidade de um travamento horizontal para a peça C que impedisse maiores deformações. Enquanto a peça C ia sendo redesenhada, o grupo focou no modelo em MDF da peça B (Figura 10) que, simulando o comportamento do material e os encaixes das costelas, apresentou um bom desempenho funcional e indicou a continuidade dessa abordagem estrutural. Em contrapartida, esse ensaio expôs de forma clara um problema comum à produção de fôrmas de madeira com ângulos obtusos ou agudos: o topo das chapas de compensado que formam a geometria da galeria em microconcreto precisa ser aplainado em ângulo (Figura 11), para que se crie um encaixe preciso, apropriado para a concretagem. Devido à pequena dimensão das placas de MDF na escala adotada para o modelo, o chanfro foi feito com uma lixadeira elétrica, processo manual e demorado que resultou em ângulos aproximados e encaixes sem precisão. Desse modo, ficou evidente a necessidade de se resolver o chanframento na própria fresadora, uma vez que a realização desse trabalho manualmente demandaria um esforço adicional que contradiz a introdução da fabricação digital no projeto.



**Figura 10:** Topo das chapas de compensado precisa ser aplainado em ângulo (representação do módulo redesenhado).

**Fonte:** Autores.

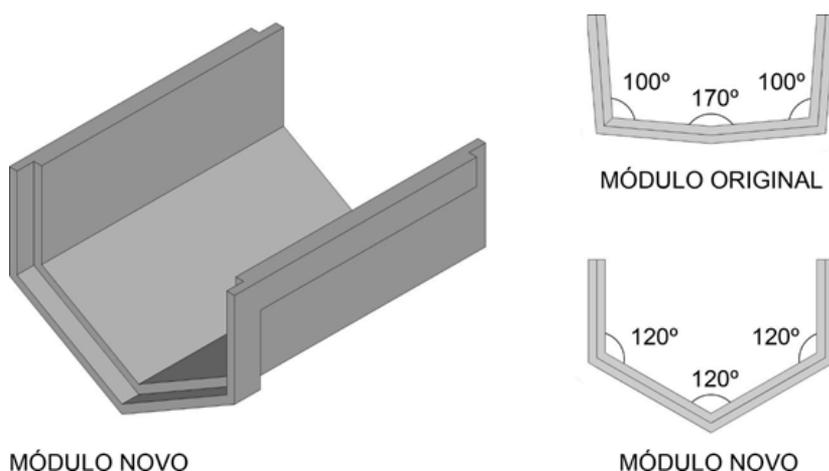
Prosseguindo com o desenvolvimento da fôrma, um novo protótipo em papelão foi executado, conforme as alterações realizadas na peça C. Esse modelo físico, por ser leve e pequeno, foi levado para diversas reuniões externas e apresentado para o público em geral: professores, estudantes, moradores das comunidades-alvo, líderes comunitários e profissionais de outras áreas. Observou-se que, ao interagir com o modelo, várias pessoas encaixavam as peças C e B com as costelas intercaladas, e não sobrepostas. Tal comportamento deu indícios de que era necessário rever o método de união das partes, adotando uma solução mais intuitiva na montagem. Pensar em um método onde as próprias costelas funcionassem como ponto de ancoragem para junção resultaria em uma estrutura mais econômica, uma vez que não seriam necessários os blocos de travamento e as costelas duplicadas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de redesenho das fôrmas para a sua adequação ao processo de fabricação digital envolveu uma série de modificações em função do modelo produtivo escolhido. Alterações que, sem a experimentação prática nesta fase inicial do trabalho, seriam feitas apenas em etapas futuras e demandariam maior esforço e custo. Visto que a introdução da fabricação digital no projeto visa alcançar uma produção mais eficiente das fôrmas – precisa, rápida e com economia de recursos –, considerou-se a hipótese de que os moldes de madeira sejam usinados integralmente na fresadora CNC, saindo prontos para a montagem. Para tal, o estudo das juntas entre as chapas de que constituem a superfície das fôrmas deve estar incluído nesse processo de desenvolvimento, sem depender de outros equipamentos ou processos manuais para sua finalização. A solução encontrada para essa questão foi a adequação da geometria da galeria pré-fabricada em microCAD para que se pudesse utilizar uma fresa de chanfro angular na realização do corte das placas.

Levando em consideração a espessura de 18 mm do compensado naval utilizado, foi necessário adotar uma fresa de ângulo mais fechado, capaz de atravessar toda a placa e realizar o corte. Após alguns estudos com fresas de chanfro comerciais, adotou-se a de 60 graus de ângulo. No entanto, ao estabelecer um ângulo fixo de inclinação para a fresagem dos topos das chapas de fôrma, altera-se o ângulo de saque da peça a ser moldada e, conseqüentemente, a geometria final do elemento pré-fabricado. Como resultado, a galeria foi redesenhada para a utilização da fresa de chanfro angular (Figuras 11 e 12), com o objetivo de simplificar a usinagem das peças e tornar o processo de produção coeso, utilizando apenas a fresadora CNC, sem a necessidade de pós processamento manual nas fôrmas.

Analisando o processo de projeto até então, é possível reconhecer a prototipagem rápida como prática determinante no desenvolvimento do produto. A elaboração de modelos físicos, além de auxiliar na análise formal e funcional do objeto, facilita a interação do mesmo com o público-alvo e profissionais de outras áreas do conhecimento, como foi observado nas visitas das comunidades envolvidas à universidade e nas reuniões com membros do setor público e sociedade civil. Ademais, a utilização das máquinas de fabricação digital durante o desenvolvimento do projeto ajuda a reconhecer o processo de produção como um todo, incorporando aspectos técnicos e de funcionamento do equipamento no design final do objeto. Como exemplo desse processo, pode-se citar a adoção da fresa de chanfro angular para o corte das chapas de superfície dos moldes, solução que alterou a geometria da galeria.



**Figura 11:** Módulo da galeria pré-fabricada em microCAD adaptado para o uso de uma fresa de chanfro angular em comparação com o módulo original concebido no Uruguai, em 2006.

**Fonte:** Autores.

A introdução da fabricação digital na produção dos elementos pré-fabricados leves em microconcreto, além de dispensar o uso de mão-de-obra especializada (carpinteiro ou marceneiro) na construção das fôrmas de madeira, possibilita a capacitação da população de modo que ela se aproprie integralmente dos modelos produtivos. Em seu formato atual, o projeto consiste na implantação de canteiros experimentais de pré-fabricação leve em microconcreto nas comunidades-alvo – Jardim Lapenna e Jardim Pantanal –, onde serão produzidos os componentes para montagem da calçada drenante. Esses canteiros serão espaços de trabalho e formação, criados pelas comunidades em terrenos disponíveis e equipados com o ferramental básico. São locais de experimentação e, sobretudo, de troca de saberes entre técnicos e moradores. Supõe-se que o canteiro seja o embrião de unidades de produção comunitária de componentes construtivos pré-fabricados leves, como os CPCs da proposta uruguaia, permitindo a disseminação das tecnologias adaptadas e a capacitação da mão-de-obra local. Além disso, espera-se promover melhorias urbanas aliadas a um processo de desenvolvimento local, com geração de emprego e renda, fomentado pela autogestão e produção comunitária.

A proposta se viabiliza também devido à implantação recente dos Fab Labs Livres SP da Prefeitura de São Paulo que, como laboratórios públicos, têm como principal objetivo a capacitação e conscientização da população em relação às tecnologias de manufatura digital, incentivando a realização de projetos colaborativos que buscam soluções para problemáticas locais. Nesse sentido, a lógica do canteiro experimental se estende até o ambiente do Fab Lab, uma vez que esse espaço oferece cursos gratuitos voltados para a formação técnica, facilitando a transferência do conhecimento e, conseqüentemente, o processo de apropriação dos meios de produção pelos moradores das comunidades.

Nesse contexto, as atividades realizadas no Fab Lab Acadêmico e nos Fab Labs Livres SP da prefeitura situados na Zona Leste de São Paulo (CEU Três Pontes, Itaquera e Cidade Tiradentes) irão desenvolver um tipo complementar de pesquisa, produção e formação, focados na modelagem e fabricação digitais. Acredita-se que a médio prazo, esse vínculo com os Fab Labs pode gerar novas iniciativas de melhoramentos nas comunidades e parcerias com grupos de extensão e pesquisa universitários. Assim, busca-se um meio da universidade atuar em convergência com as demais políticas públicas voltadas para a região, integrando-as com iniciativas da sociedade civil e procurando efetivar iniciativas de cunho inovador que confirmem seu compromisso com o interesse social.

Em ambos os casos, a transferência de conhecimento é percebida através da lógica de emancipação por meio da democratização do acesso à tecnologia. A emancipação, nesse sentido, pode ser entendida como uma possibilidade de transformação socioeconômica e ambiental, uma vez que a tecnologia apropriada e a experiência de autogestão oferecem às comunidades envolvidas a oportunidade de transformar o habitat em que vivem por sua própria iniciativa, atendendo às demandas locais e melhorando a qualidade de vida da população residente. Além disso, possibilita a geração de emprego e renda através da implantação da lógica do empreendedorismo, configurando um polo econômico alternativo apropriado frente à crise econômica e às altas taxas de desemprego no país. Em outras palavras, procura-se construir uma sociedade resiliente, capaz de se adaptar e procurar soluções para superar a vulnerabilidade.

Através dessa experiência foi possível analisar o papel do arquiteto e do designer como catalisadores de intervenções de cunho social, desenvolvendo soluções técnicas passíveis de aplicação e apropriação por movimentos organizados. A finalidade do projeto é a de viabilizar a transformação do habitat pelos próprios usuários, mudando a forma com que eles percebem e interagem com o ambiente construído. Para tal, é preciso que a mobilização tenha origem na própria comunidade, a partir de demandas reais, atribuindo ao projetista, arquiteto ou designer, a função de apoio e assessoria técnica, onde a tecnologia concebida atua como coadjuvante do processo social.

Por fim, considerando que este é um trabalho em andamento, vale destacar que os resultados, assim como as discussões, ainda estão em progresso. Dando continuidade à proposta, os próximos passos serão a conclusão do desenvolvimento da fôrma para a galeria pré-fabricada em microconcreto, focando na exploração material das fresas de chanfro angular, e a execução do protótipo em escala 1:1 no laboratório que servirá de demonstração para os moradores das comunidades-alvo. A implantação dos canteiros experimentais já está sendo discutida com os movimentos organizados locais e a coordenação da rede Fab Lab Livre SP já demonstrou interesse em colaborar com a proposta. A expectativa é que, com o êxito do projeto “Calçadas Drenantes”, apareçam novas oportunidades de demonstrar que a inovação e tecnologia têm espaço para produzir soluções alternativas adequadas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando o contexto da América Latina, onde a segregação social e territorial das cidades se sobrepõem, questões como a otimização do espaço urbano, habitabilidade e sustentabilidade da habitação social são os maiores desafios a se alcançar (FONSECA DE CAMPOS, 2013). Entretanto, a prática adotada pelos governos é a de utilizar métodos conservadores de gestão e construção para intervir em assentamentos precários, que apresentam uma organização social e espacial diferentes da cidade formal. Frente à incapacidade do Estado em oferecer soluções apropriadas para a população marginalizada, reafirma-se a importância em pensar alternativas para promover melhorias na qualidade de vida desses grupos vulneráveis nas grandes cidades latino-americanas.

O projeto “Calçadas Drenantes” se apresenta, dentro desse cenário, como uma proposta que une a credibilidade e experiência acumulada com o microconcreto de alto desempenho com a flexibilidade e capacidade das ferramentas de fabricação digital, em busca de uma solução tecnológica apropriada para áreas periféricas e em situação de vulnerabilidade. Não obstante, tal solução deve ser capaz de coadjuvar processos liderados por movimentos sociais organizados, que possam implementar propostas que confirmem seu compromisso social com a comunidade.

Mesmo em andamento, o trabalho vem demonstrando um potencial transformador, principalmente aliado a uma rede pública cujo objetivo é incentivar a inovação local através de uma lógica emancipadora, como é o caso da rede Fab Lab Livre SP. Os laboratórios de fabricação digital, verdadeiros espaços de produção colaborativa e educação não-formal, conformaram pontos de apoio para a elaboração da proposta, tanto no processo de desenvolvimento de produto, no Fab Lab SP Acadêmico, como na implantação integral do projeto, nos Fab Labs da rede pública. Diante desse vínculo, espera-se que, a partir do regime de capacitação e transferência de tecnologia adotado no “Calçadas Drenantes”, novas iniciativas de projetos colaborativos surjam.

## REFERÊNCIAS

ADVFN BRASIL. **Indicadores econômicos – PNAD**. Disponível em: <<http://br.advfn.com/indicadores/pnad>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de argamassa armada: NBR 11173**. Rio de Janeiro: 1990.

BARAVELLI, J. E. **O cooperativismo uruguaio na habitação social de São Paulo: Das cooperativas FUCVAM à Associação de Moradia Unidos de Vila Nova Cachoeirinha**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FONSECA DE CAMPOS, P. E (org.). **Microconcreto de Alto Desempenho: La tecnología del MicroCAD aplicada en la construcción del hábitat social**. São Paulo: Mandarim, 2013.

FONSECA DE CAMPOS, P. E. **Tecnologias para a construção do Habitat Social: O microconcreto de alto desempenho para o desenvolvimento da pré-fabricação leve**. In: 4º CONGRESSO INTERNACIONAL DE HABITAÇÃO NO ESPAÇO LUSÓFONO, 2017, Covilhã, Portugal.

FONSECA DE CAMPOS, P. E.; YAMAGUTI, A.; KENCHIAN, A. **Pré-Fabricação por Ajuda-Mútua**. III Simpósio Ibero-Americano sobre técnicas Construtivas Industrializadas para Habitação de Interesse Social e I Fórum Brasileiro da Construção Industrializada-Habitação, 1993, São Paulo.

GERSHENFELD, N. **FAB: The coming revolution on your desktop – From personal computers to personal fabrication**. Cambridge, MA: Basic Books, 2005.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios Econômicos da Expansão do Saneamento Brasileiro**. Fundação Getúlio Vargas, 2010.

MARICATO, E. **Metrópole, legislação e desigualdade**. Estudos Avançados, São Paulo, v.17, n.48, p.151-166, 2003.

SOARES, J. P. **Processo de Design em Arquitetura: Complexidade e meios digitais**. Tese de Mestrado – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

**Daniella Naomi Yamana**  
daniella.yamana@alumni.usp.br

**Jady Medeiros**  
jady.mms@gmail.com

**Eduardo Ignacio Lopes**  
eilopes@usp.br

**Paulo Eduardo Fonseca de Campos**  
pfonseca@usp.br

# FORMWORK FABRICATION FREEDOM FOR A CONCRETE CANOE

ARTIGO

Andrei Jipa<sup>1</sup>, Mathias Bernhard<sup>1</sup>, Nicolas Ruffray<sup>2</sup>, Timothy Wangler<sup>2</sup>, Robert Flatt<sup>2</sup>, Benjamin Dillenburger<sup>1</sup>

**ABSTRACT:** The pursuit for complex geometries in contemporary architecture is driving innovation towards an unconstrained fabrication freedom for building components. Concrete is a building material with excellent structural and architectural qualities, which has the theoretical capacity of being cast into any shape. However, in practice, concrete is generally limited by the formwork manufacturing industry to solid, planar shapes. The aim of this research is to overcome the fabrication limitations for formwork and, indirectly, for concrete. To achieve this aim, the objective of this research is twofold: a) enable the fabrication of building-scale concrete components through 3D-printed plastic formworks and b) develop computational design and optimisation methods suitable for this fabrication method. The resulting design and construction method takes advantage of the load-bearing capacity of concrete and relies on the fabrication freedom inherited from the 3D-printed formwork, thus making complex topologies and precise details possible for concrete structures. The research method for demonstrating this fabrication process focused on the design to fabrication steps of skelETHon —a functional four-meter-long concrete canoe— which was designed, built and raced in a regatta on the Rhine river (Figure 1). The main research achievement was the fabrication of the canoe, an optimised truss-like concrete component with members as thin as 15 mm in diameter. Such slender geometric features are difficult to produce in concrete with other known formwork systems.

<sup>1</sup> Digital Building Technologies, ITA, D-Arch, ETH Zürich

<sup>2</sup> Physical Chemistry of Building Materials, IfB, D-Baug, ETH Zürich

**KEYWORDS:** Concrete; 3D Printing; Formwork; Topology Optimisation; Canoe.

## How to cite this article:

JIPA, A.; BERNHARD, M.; RUFFRAY, N.; WANGLER, T.; FLATT, R.; DILLENBURGER, B. Formwork Fabrication Freedom for a Concrete Canoe. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.14, n.1, p.25-44, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148264>

## Fonte de financiamento:

Declaro não haver

## Conflito de interesse:

Declaro não haver

**Submetido em:** 17/07/2018

**Aceito em:** 21/02/2019





**Figure 1:** skeleTHon, the four-metre-long canoe made entirely out of concrete.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

## INTRODUCTION

With serious concerns regarding the vulnerable state of the environment, material efficiency is becoming a critical design driver in architecture. This is especially relevant for materials that are difficult to recycle, such as concrete. Concrete is of particular relevance in relation to material efficiency because it is by far the most used construction material in the world, being used twice as much as all the other construction materials combined (Crow, 2008). Moreover, the amount of concrete used annually is predicted to double in the next thirty years.

Concrete is used in such vast amounts for good reasons. Its excellent structural properties, combined with its versatility, make concrete indispensable in a wide variety of environments and applications, both for buildings and infrastructure works. Furthermore, concrete is celebrated by architects because it can be cast into any shape and thus it is in theory capable of materialising almost any imaginable design.

But this formal flexibility has applications beyond architectural aesthetics. The recent rise in computational form-finding tools such as topology optimisation has demonstrated how considerable material savings can be achieved by manipulating the geometry of structures and distributing material precisely where it is most needed, without affecting, or sometimes even improving the overall performance and functionality. Designing with material efficiency as a goal can be achieved through ribbings, porosity gradients, hierarchical articulations, venations and other similar geometric features (Amir, 2013; Jipa et al, 2016).

Given the significant amount of concrete used around the world, optimising concrete structures for reducing material use can have a global impact in releasing pressure from natural resources and reducing the carbon footprint of buildings and infrastructure. However, this excellent potential of concrete is only enabled by complex optimised shapes, and achieving such shapes is in turn limited by the capacity to fabricate the necessary formwork.

### Formwork

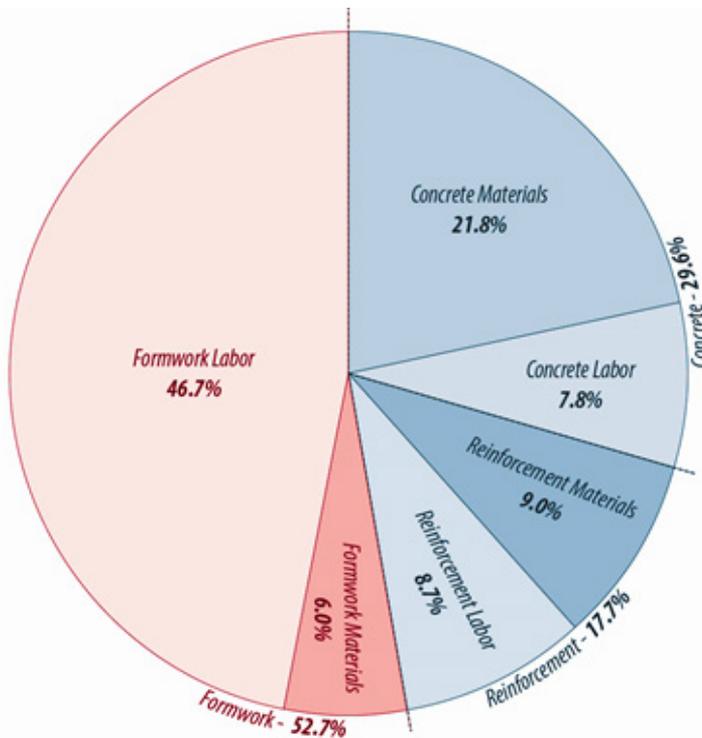
“...although reinforced concrete has been used for over a hundred years and with increasing interest during the last decades, few of its properties and potentialities have been fully exploited so far. Apart from the unconquerable inertia of our own minds, which do not seem to be able to adopt freely any new ideas, the main cause of this delay is a trivial technicality: the need to prepare wooden frames.”

(Nervi, 1956, p. 56)

This paper describes a method that aims to overcome the limitations of the traditional wooden formwork described by Nervi and unlock the full geometric potential of concrete.

In order to relinquish concrete from the orthogonal constraints of the flat mould panel, new types of formwork with less geometric limitations are needed. New, free-form formwork systems can expand the geometric freedom available for concrete components. Such non-standard shapes can reduce material use in large-scale, functional, load-bearing structures by mass customising concrete components for their specific context, boundary conditions and load-cases.

Aside from its key role in defining the shape of concrete structures, formwork is also a critical topic in concrete construction because it accounts for roughly 50% of the overall costs —more than the costs of cementitious materials, aggregates, additives, reinforcement and labour combined (Robert, 2007). For one-of-a-kind, non-standard shapes, the costs of formwork can be even more significant (Figure 2).



**Figure 2:** The average distribution of costs for concrete constructions. Formwork raw materials and labour are responsible for roughly half the overall costs. This figure highlights the importance of optimising formwork fabrication processes.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

## Related works

Architects designing topologically complex concrete elements with material economy in mind are therefore facing the limitations of the available formwork fabrication methods. A compromise has to be made between material efficiency and formwork fabrication costs.

To aid in this dilemma, digital fabrication of formwork is already being investigated. Production of formwork for non-standard concrete elements can be done by CNC milling of foam blocks (Søndergaard & Dombernowsky, 2011), CNC milling of wax (Gardiner & Janssen, 2014), actuated moulds (Oesterle et al., 2012), robotic extrusion (Hack et al., 2013), robotic hot wire cutting (Rust et al., 2016), laser-cutting and folding polypropylene sheets (Kaczynski, 2013) or robotic welding (Hack & Lauer, 2014). Certain types of lightweight formwork can also be produced with patterning fabric (Veenendaal et al., 2011) or with knitting (Popescu et al., 2018). However, all these approaches are resource-intensive as regards the necessary time and labour (robotic cutting and milling tools are slow and wasteful processes,

while fabrics require extensive patterning) and have limitations regarding the geometries that can be produced (e.g. no undercuts for milling, provision for collision-free robotic tool-head access paths, only ruled surfaces for wire-cutting and only smooth anticlastic surfaces for fabrics).

### Objectives. 3D-Printed Formwork

To overcome these limitations, different 3D printing technologies have already been proposed for formwork, such as binder jetting of sand (Morel & Schwartz, 2015; Aghaei-Meibodi et al., 2017). Binder jetting is particularly interesting because of its precision, great level of geometric flexibility and availability in large scale. Still, certain geometric features, such as long tubular voids are difficult to achieve because of the necessary post-processing steps, such as unbonded sand removal and surface infiltration for stability. Moreover, due to the frail nature of the 3D prints, very thin free-standing features, such as millimetre-thick shells are also a challenge.

Another 3D printing technology, fused deposition modelling (FDM) has also been proposed for fabricating formwork (Peters, 2014; Jipa et al., 2017). However, there are some inherent characteristics of FDM 3D printing that need to be addressed in order to make it feasible for large scale fabrication.

This research builds up on the state-of-the-art of 3D-printed formwork, targeting the fabrication of building-scale elements. In particular, the research is addressing the following two-fold research objectives and questions:

a) Develop an efficient fabrication process for free-form concrete components based on 3D printing. To address this objective, how to optimise the 3D printing process? and how to stabilise the plastic formwork during casting? are critical research questions.

b) Develop associated computational design and optimisation processes which synergise with the free-form capabilities of the 3D printing fabrication process. The associated research questions are: what is the design potential for new concrete components? and what are the advantages of the new components beyond aesthetics (e.g. material reduction, structural optimization etc.).

## METHODOLOGY

To pursue the objectives stated in the previous section, the methodology follows the design and fabrication process of a four-meter-long functional concrete canoe, dubbed *skeLETHon* (Figure 1) due to the resemblance of its structural system with a biological skeleton. The canoe demonstrates how even for complex load-cases, computational optimisation can facilitate material reduction and effectively enable a concrete boat to be light enough to float and support two people. The main design to fabrication steps are covered in this chapter: the computational design (Section 2.2), the shape optimisation (Sections 2.3), the 3D printing of the Formwork (Section 2.4 and 2.5), the concrete casting and the formwork removal (Section 2.6).

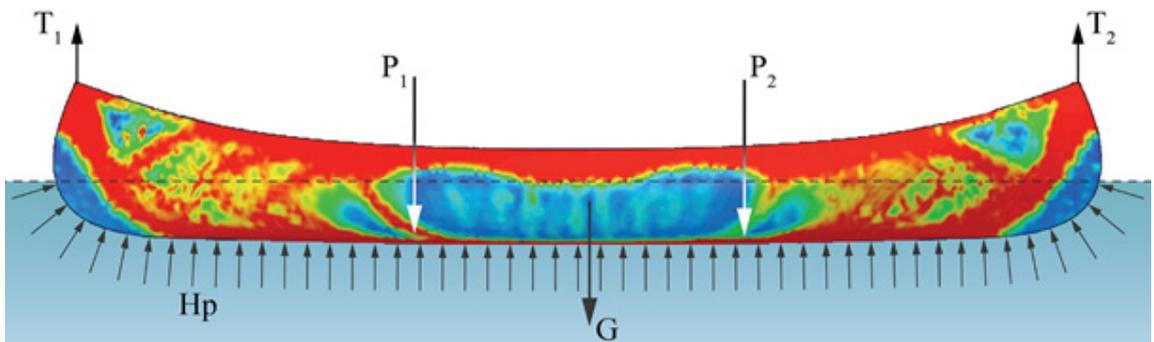
### Why a concrete canoe?

At a first glance, a concrete canoe is a counter-intuitive challenge and may seem a parody project of sorts, akin a steel plane. Nonetheless, concrete canoe competitions have a long-standing tradition, having been organised in the US since the 1960s. They are currently a well-respected international phenomenon, attracting crowds of hundreds of participants at annual or biennial regatta events organised in more than 20 countries around the world.

*skeLETHon* took part in the 16th Concrete Canoe Regatta in June 2017 in

Cologne, Germany. Approximately 1`000 participants registered 90 concrete boats and raced them for 200 metres at a flat-water racing facility on the Rhine river. This particular race route included two 100-metre-long straight lines where the hydrodynamic designs could demonstrate their top-speeds, as well as a 180o turn to prove the stability of the boats and cornering skills of the competitors. The German Regatta is an important event, with Lafarge-Holcim and Sika being among the sponsors. While also a sporting event, it mainly draws scientific interest for demonstrating innovations in concrete construction methods. The canoe regattas in Germany have been over the years stepping stones for research projects which have since become valuable contributions to the scientific community, like Mesh Mould (Hack & Lauer, 2014) and Smart Dynamic Casting (Lloret et al., 2015).

Apart from a similar scale to building components, a canoe has complex load-cases, which make it a representative case-study for architecture. The canoe has to be designed for the floating load-case in water (self-weight, live point loads from two canoeists ( $P_1$ ,  $P_2$ ), and a distributed support force provided by the hydrostatic pressure) as well as for a transport load-case on land (two support points and self-weight) (Figure 3).



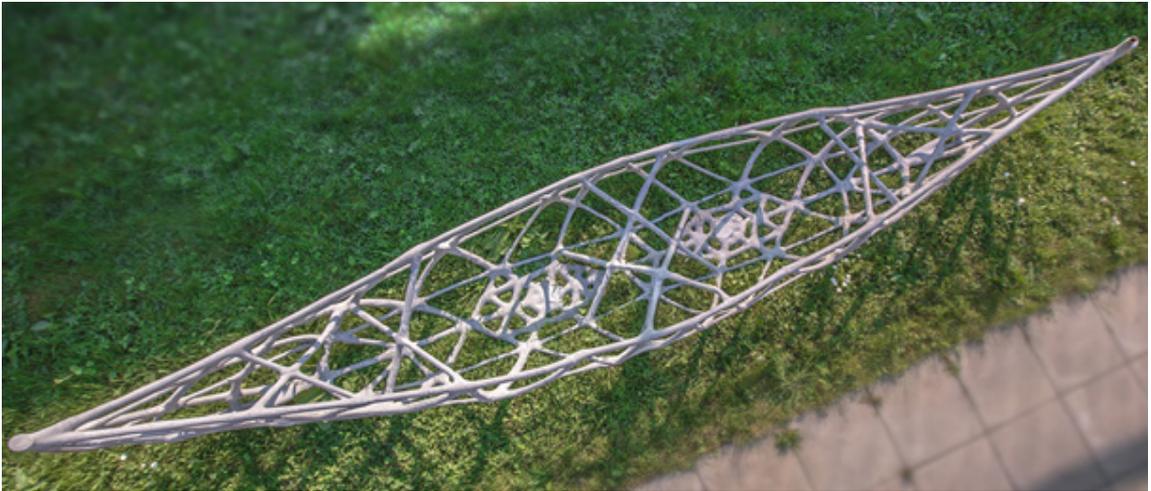
**Figure 3:** The two different load-cases used for the topology optimisation of the canoe: a) the floating load-case in water: self-weight ( $G$ ), live point loads from two canoeists ( $P_1$ ,  $P_2$ ), and a distributed support force provided by the hydrostatic pressure ( $H_p$ ); and b) a transport load-case on land: two support points ( $T_1$ ,  $T_2$ ) and self-weight.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

When designing a canoe, two aspects have to be considered: the structural integrity and waterproofing. Inspired by traditional wood and canvas canoes, these two functions are separated in two different construction layers:

a) The waterproofing of the canoe is ensured by a two-millimetre-thick outer “skin” made of highly fluid cement paste coated on cotton reinforcement. This process is described in-depth in a patent application and is not covered by this paper (Fontana et al., 2014).

b) The structural integrity is provided by an inner “skeleton” (Figure 4) which is fabricated using a 3D printed formwork, documented in this paper.

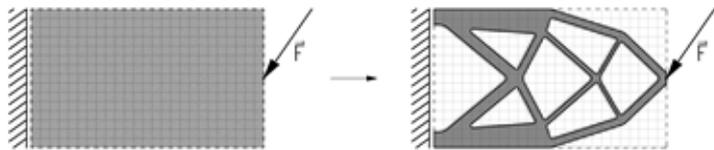


**Figure 4:** The complex concrete “skeleton” which provides the structural integrity for the canoe

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

### Design through topology optimisation

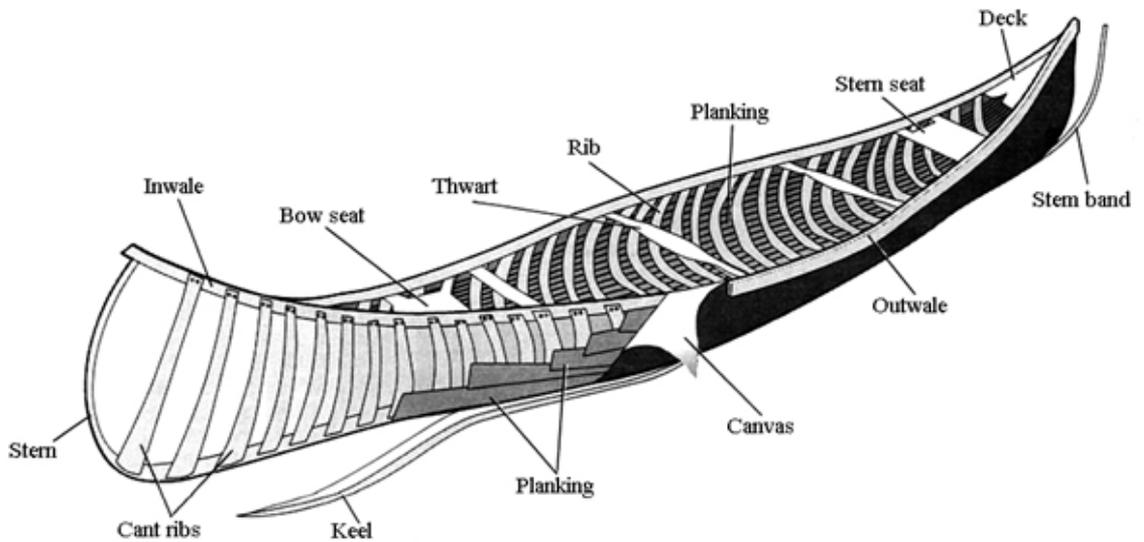
Topology optimisation is an iterative computational process which determines the most efficient spatial configuration of material distribution in order to maximise certain performance criteria (Figure 5). The algorithm works within a confined, discretised space, with a set of given boundary conditions, i.e. loads and supports.



**Figure 5:** Sample topology optimisation of a simple rectangular design space with a single point load (left). After the topology optimisation, only 30% of the material is kept and distributed in order to minimise the deflection of the part (right).

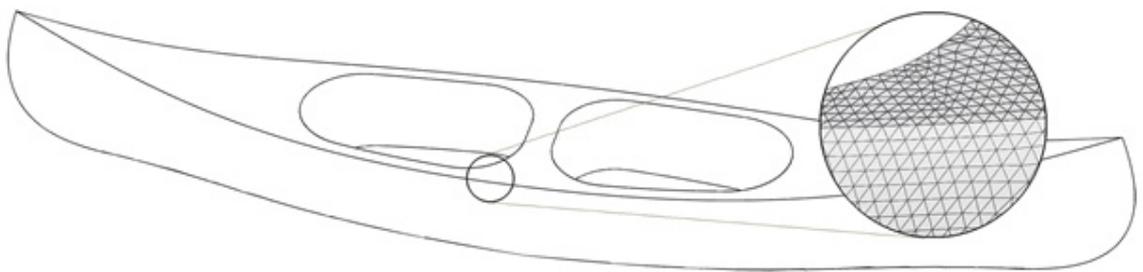
**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

The starting point of the design was the outer shape of a traditional wood and canvas canoe for two persons. The 3D model was created based on its plan and elevation projections from a stock image (Figure 6). This solid volume containing two cavities for the canoeists served as the input solution space for the topology optimisation algorithm (Figure 7).



**Figure 6:** Traditional canoe shape used as starting point for the creation of the bounding volume. The structural skeleton of the concrete canoe is inspired by the ribs, keel and thwarts of the traditional canoe

**Source:** John Earle, The Virginia Beach Beacon



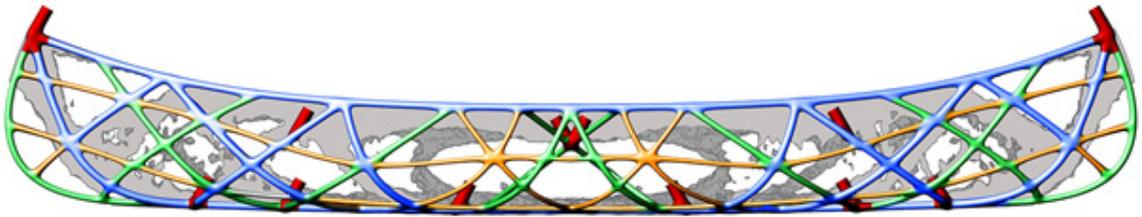
**Figure 7:** Bounding volume discretised into tetrahedral nodes of -15 mm edge length.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

For *skeLEThon*, the TOSCA engine of SIMULIA Abaqus was used to perform a simple topology optimisation. The design space was discretised into tetrahedral nodes of approximately 15 mm edge length. The supports and loads were defined for the two separate load cases as described above. The optimisation goals were to reduce material to a 0.15 set fraction of the initial volume while keeping to a minimum the strain energy of each node. The parameters used in the algorithm to describe the behaviour of concrete were a density of 2'400 Kg/m<sup>3</sup>, a Young's modulus of 50 GPa and a Poisson ratio of 0.2. The compressive and tensile strengths of concrete can be used in the engine to constrain the optimisation to safe results.

The result of a topology optimisation is the amount of strain energy and stresses calculated for every single node. When the predefined threshold of desired volume reduction is applied, a branching structure of ribs and tubes remains that optimally guides the forces through the structure. Some are explicitly present, others are only indicated by a gradient of porosity. This raw result serves as the input for the next step, where principal axes are retraced with a cage of NURBS curves, along crystallised, dense conglomerates of nodes.

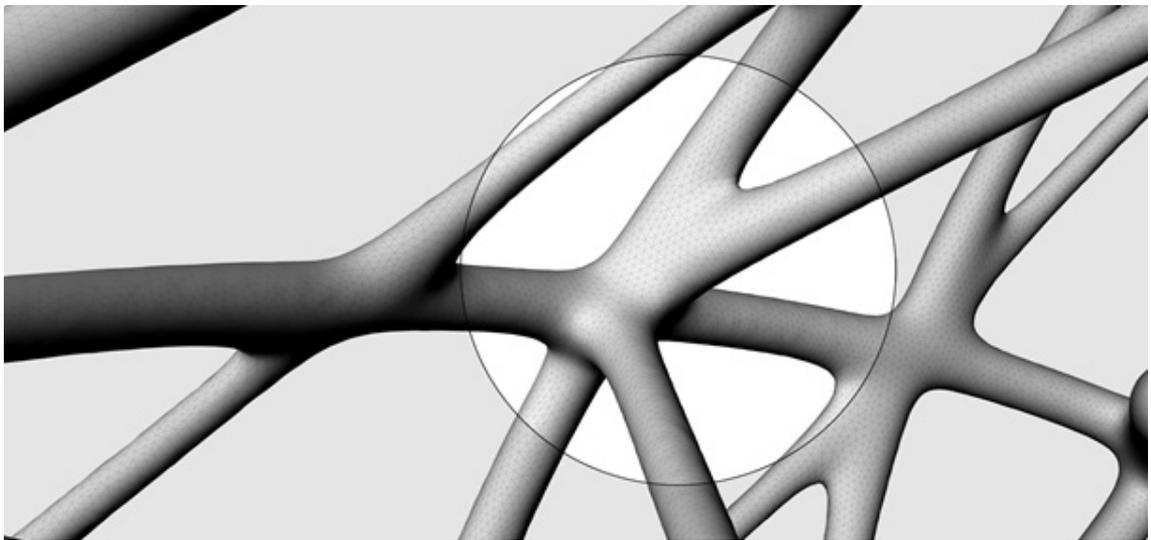
At this stage, the axes can be adjusted slightly to tailor for any constraints of the fabrication process. In areas with lower density, additional auxiliary axes are introduced to limit the size of the open fields in the skeleton. This is because the waterproofing skin can only span over a limited surface, and whenever an opening is above this threshold, intermediary support is required (Figure 8).



**Figure 8:** Elevation view of the structural skeleton. The initial solution space volume is reduced to the 15 % containing the nodes with the highest stress values (grey). Depending on these stress values, the resulting smooth bones have three different diameters: 35 mm (blue), 25 mm (green) and 15 mm (orange). Additional inlet and outlet tubes (red) are strategically added.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

This network of axes lines is then converted into the final formwork geometry of connected tubes by a custom volumetric modelling tool (Bernhard et al., 2018). Representing the bones as signed distance functions (FRep) is a very robust method. Complex topologies with different bone diameters meeting at acute angles are less prone to failure with FRep than with other methods based on explicit boundary representation (BRep) geometry. Depending on the amount of stress the bones take, they are classified in three different groups of 15, 25 and 35 mm diameter (Figure 8). After creating the entire skeleton of bones, a 3D Gaussian convolution kernel is applied to smoothen the sharp creases at the bone intersections and thereby improving both the concrete and the force flow (Figure 9).



**Figure 9:** The intricate network of bones of the structural skeleton featuring complex spatial 3D nodes, with three to six bone edges coming together smoothly in order to create the thwarts of the canoe.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

### FDM 3D Printing

For the fabrication of the skeleton, FDM 3D printing was used first to produce the formwork. FDM is a widely available 3D printing technology in which molten material is extruded and hardens immediately after the deposition. The deposition progresses in consecutive horizontal layers which are generated as slices through a digital model of the part to be fabricated.

In particular, for *skeLETHon*, FDM was chosen because among the different 3D printing technologies, it is unique for its capability of producing large-scale and stable shells with thicknesses below 0.5 mm. Other 3D printing technologies are either capable of producing precise thin shells (such as selective laser sintering, stereolithography and certain metal 3D printing technologies) or have large printing volumes (like binder jetting),

but no other 3D printing method combines both large scale build volumes and the capacity to produce sub-millimetre shells. Moreover, the advantage of FDM is its accessibility, low cost and compatibility with a wide range of cheap plastics.

Out of this wide variety of plastics (biodegradable, water soluble, fibre-reinforced, flexible, conductive, low-shrinkage, bioplastics etc), translucent polylactic acid (PLA) was selected for the canoe. The choice was due to its versatility, low shrinkage factor, relatively good mechanical properties and environmentally-friendly pedigree (PLA is compostable, recyclable and based on renewable raw materials). Furthermore, PLA is relatively stable when exposed to environmental factors (humidity and temperature variations) and it can be 3D-printed in a wide domain of parameters, at temperatures between 180 and 240°C, with feed-rates of up to 300 mm/s.

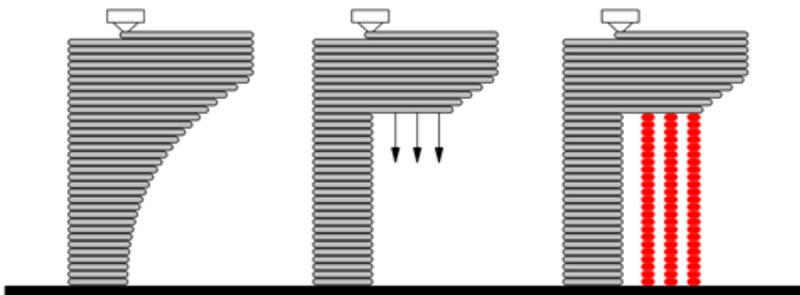
FDM can resolve details with a precision of a tenth of a millimetre. This made possible the integration of a very fine functional surface texture on the formwork, in the range of 0.5 to 2 mm. This texture was introduced to increase the contact area and improve adherence between the skeleton and the waterproofing concrete layer (Figure 22).

Despite all its advantages however, FDM 3D printing also has a number of inherent limitations which are addressed by this research separately:

a) FDM is regarded as a slow fabrication process, usually able to produce volumetric flow-rates of 15 cm<sup>3</sup>/hour and resolve 0.1mm features. With well-tuned machines, flow-rates as high as 100 cm<sup>3</sup>/hour can be reached, but resolving power increases to 0.2 mm (i.e. less precision). The relatively slow speed of the 3D printing process is discussed in 2.4. Submillimetre Formwork for Concrete.

b) The limited amount of cantilever layers can reach in relation to each other (Figure 10). This is further discussed in 2.5. Formwork Fabrication.

c) The limited build volume of the 3D printers required a discretisation of the whole canoe in smaller parts which have to be assembled prior to casting. This limitation is further discussed in 2.6. Discretisation.



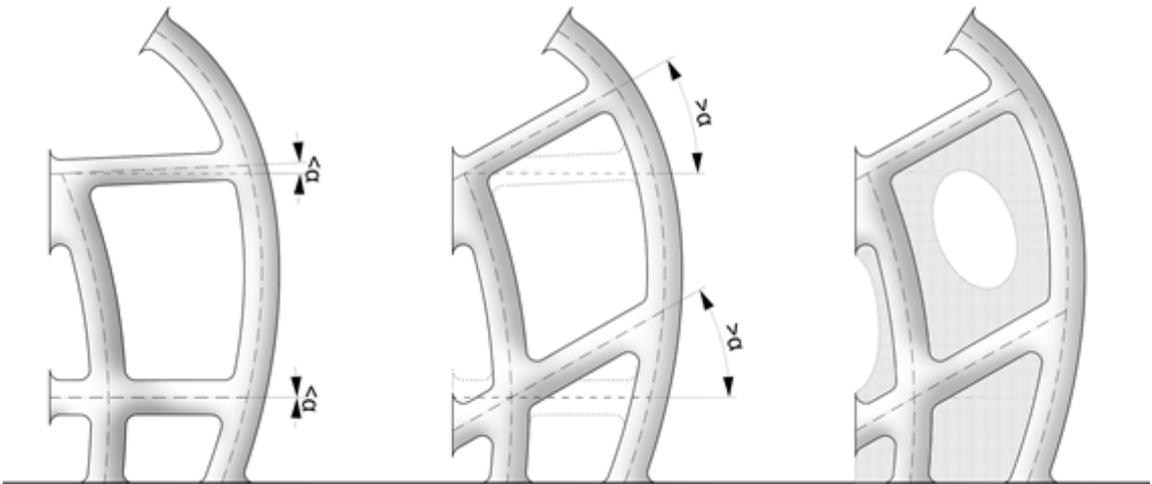
**Figure 10:** Fabrication limitations of FDM 3D printing. Below a certain threshold, horizontal layers can cantilever freely (left); Beyond this threshold, gravity would cause deformations and artefacts (middle); this can be resolved by introducing auxiliary support structures (in red, right). These support structures are mechanically removed or chemically dissolved at the end of the process

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

In order to address the slow fabrication speeds, the unique capabilities of the FDM process were exploited to radically reduce the thickness of the formwork shell to submillimetre dimensions. For FDM technology, fabrication time is roughly directly proportional with the volume of the part. Therefore, by producing a very thin shell which is only 0.8 mm in thickness, the overall 3D printing volume was reduced to a minimum and this had a considerable impact on the overall printing time. By comparison, even the thinnest binder-jetted formworks are roughly ten times thicker (Jipa et al., 2016).

## Formwork Fabrication

Early fabrication tests have shown that in order to prevent 3D printing artefacts such as disconnected layers, over- or under-extrusion and local material deposits, the spatial orientation of the hollow formwork tubes had to be at least  $35^\circ$  as measured from a horizontal plane. This prevented the need to 3D print auxiliary support structures as described in Figure 10, which would have increased printing time unnecessarily. In order to suit this constraint, a shape optimisation step was performed following the topology optimisation, in which the angles of the tubes were adjusted to avoid very low inclinations (Figure 11).



**Figure 11:** Diagrammatic section through a 3D printed part. In order to avoid auxiliary supports, the tubes are adjusted to achieve a minimal angle above an empirically determined threshold ( $\alpha > 35^\circ$ ). Lastly, membrane-like support structures are introduced to stabilise free-standing tubular structures (right).

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

Another early empirical observation was that for taller parts, the movement of the gantry of the 3D printer caused vibrations which had a negative effect on the quality of tall and thin free-standing tubular parts. In order to prevent this, an auxiliary membrane-like support structure was parametrically introduced. This temporary support interconnects all the tubes in order to increase the stiffness of the part and reduce vibrations while printing (Figures 11, 12). Unlike a more conventional solid support system (Figure 10), these membranes did not bear the loads of the cantilevering layers, but only stiffened the free-standing geometric features in order to limit mechanically-induced vibrations. For reference, the membrane-like structures used for the *skeLETHon* formwork represent only about 6% of the volume of a conventional solid support system.



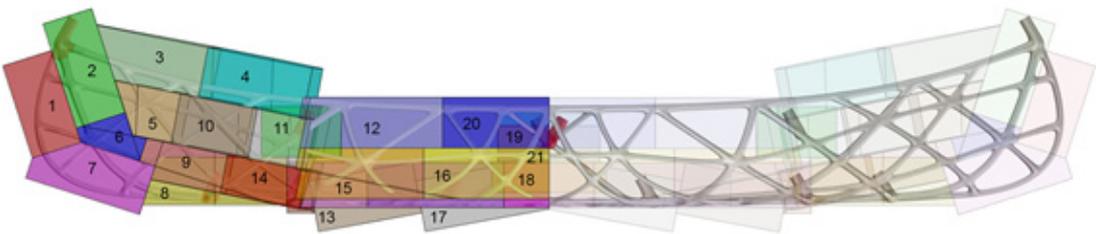
**Figure 12:** A 700-mm tall sample 3D printed part of the *skeleTHon* formwork. In order to prevent quality issues for taller parts, a membrane-like auxiliary support structure is introduced.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

## Discretisation

Very large industrial FDM 3D printers exist, such as BigRep One, with a build volume above 1 m<sup>3</sup> and Big Area Additive Manufacturing with a volume of 5.8 m<sup>3</sup> (Post et al., 2016). However, for the canoe, only five basic entry-level consumer 3D printers were used. Four of them were Ultimaker Original+ 3D printers with build volumes of 210 × 210 × 205 mm. Two of these were modified with an extended vertical gantry, Z-Unlimited, commercialised by Rooieforis, to reach heights of up to 1 200 mm, for a total volume of 52.9 L each. The fifth 3D printer used was marginally larger, the Raise3D N2+, which has a build volume of 56.3 L (305 × 305 × 605 mm). While more robust 3D printing facilities would certainly benefit this method especially for larger scale architectural applications, the basic machines used for this project demonstrated the undemanding nature of the process and offered a good setup for investigating discretisation.

In order to address the limited volume of the 3D printers, the whole geometry was discretised in order to fit the print volume of the largest available printer. Thus, the formwork was split into 84 parts fitting 305 × 305 × 605 mm (Figure 13). Due to the two planes of symmetry of the boat, there were only 21 unique parts, plus their mirrored transformations.

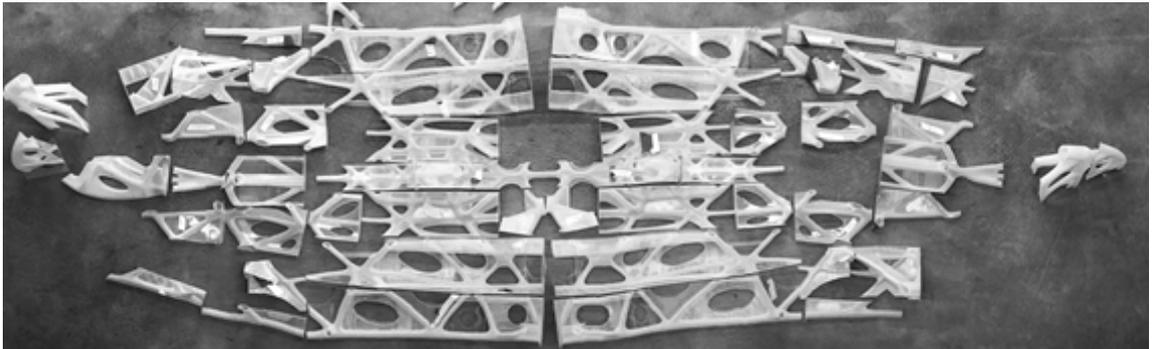


**Figure 13:** The 21 unique parts of the formwork which had to fit the maximum volume of the 3D printers.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

Due to the intricate differentiated geometry, the size of the parts varied considerably, with bounding box volumes between 3.1 L and 25.9 L. This opened the opportunity to use the smaller 3D printers for the smaller parts in order to distribute the fabrication time. Each part took between 4.5 hours for the smallest and 56 hours for the largest pieces, with an overall printing time of just under 1`000 hours.

Before casting the skeleton, the independent pieces had to be joined together (Figure 14). This was done through chemical welding with dichloromethane, which is an organic solvent for PLA. A 2 mm wide flange was integrated at each of the connections to provide a wider welding area. This detail is visible at the top of the component in Figure 12. The solvent is applied locally with a brush and dissolves the PLA on both sides of the connection. The dichloromethane is highly volatile and it evaporates in a few seconds, leaving a solid connection purely made out of PLA.



**Figure 14:** The 84 3D printed pieces before assembly.

**Source:** Moritz Studer, ETH Zürich, 2017

Finally, once the skeleton was assembled, a layer of transparent Polyester resin was applied on the surface in order to increase its stability for casting (Figure 15).



**Figure 15:** The 84 3D printed pieces assembled and ready for casting.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

### Concrete casting

For the casting process, ultra-high-performance concrete reinforced with ten-millimetre-long steel fibres (UHPFRC) was used (Ruffray et al., 2017). This satisfied the necessary rheological requirements for the concrete to flow through the very thin tubular geometric features of the canoe.

One of the critical issues related to concrete casting in submillimetre formwork is the build-up of hydrostatic pressure. The hydrostatic pressure ( $p_h$ ) is the maximum stress that is exerted uniformly by the fluid concrete on the formwork. Given a constant gravitational acceleration ( $g$ ), hydrostatic pressure is only dependent on the density ( $\rho$ ) of UHPFRC and the height ( $H$ ) of the fluid being cast, and it is independent of the diameter of the formwork tubes.

$$p_h = \rho g H \quad (1)$$

The very thin PLA formwork is unable to withstand the hydrostatic pressure of the dense UHPFRC used ( $\rho \sim 2 \cdot 400 \text{ Kg/m}^3$ ) for depths larger than  $\sim 100 \text{ mm}$ . The breaks in the formwork generally happen along the contact surface between consecutive 3D printed layers, where the tensile strength is lower due to the weak layer-to-layer interface.

In order to prevent the potential damages to the formwork caused by hydrostatic pressure, an auxiliary material was used to exert a counter-pressure on the formwork from the outside. To this effect, the canoe formwork was placed in a simple box (Figure 16) which was simultaneously being filled with sand while concrete was being cast inside the formwork (Figure 17). The level of concrete inside the formwork was synchronised with the level of the sand surrounding the formwork. Nevertheless, the density of sand ( $\rho \sim 1 \cdot 600 \text{ Kg/m}^3$ ) is lower than the density of UHPFRC, and therefore the sand counter-pressure does not entirely cancel the hydrostatic pressure of concrete out. However, it reduces it by about 70%, to a level where the thin plastic shell is stable enough.

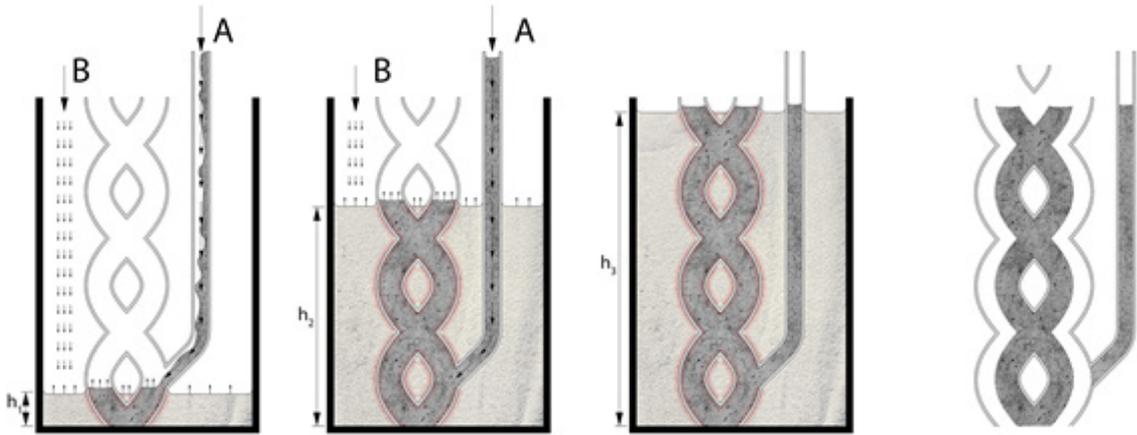
Furthermore, the sand bed surrounding the formwork can also neutralise any potential breaks of the thin shell, by consolidating the formwork locally and preventing extensive concrete leaks.



**Figure 16:** The canoe formwork was placed in a simple box which was simultaneously being filled with sand while concrete was being cast inside the formwork

**Source:** DBT, PCBM, ETH Zürich, 2017

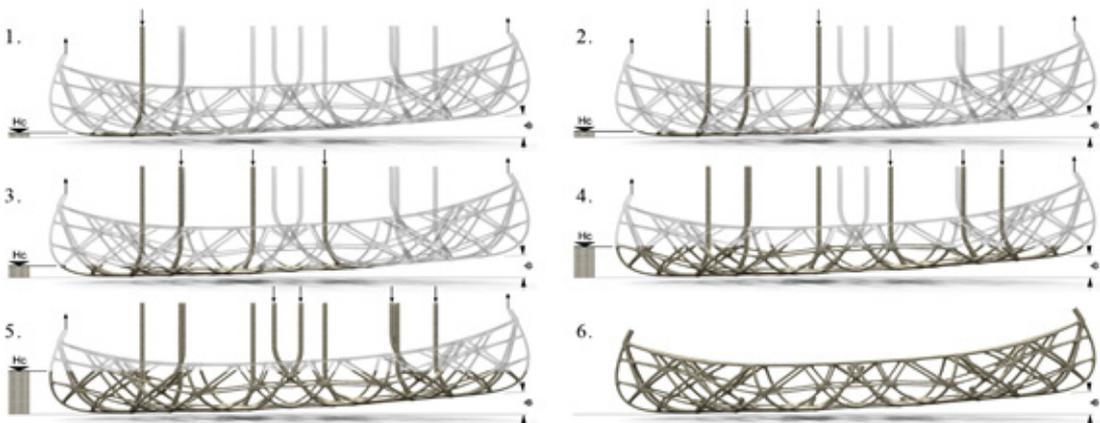
The casting was initiated through inlets at the bottom of the formwork. This implies that the level of the concrete inside the shell rises uniformly. The transparent PLA formwork permits a visual inspection of the filling process to prevent air bubbles being trapped in complex nodes. As the concrete level reaches higher points, the sand bed on the outside is gradually filled to provide the necessary counter-pressure (Figure 17).



**Figure 17:** Step-by-step diagram showing the simultaneous infill of concrete through the bottom of the formwork (A) and of counter-pressure material (B). The final step consists of the removal of the formwork and casting inlet.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

One inlet point was however not enough for the entire canoe. The friction with the formwork walls accumulates and eventually overcomes the laminar flow of concrete once it travels a certain distance through the tubular network. In order to overcome this, ten inlet tubes were evenly distributed throughout the lower part of the canoe. At the highest points of the canoe, two further outlet points were provided in order to permit the air to evacuate the formwork. Air getting trapped inside the formwork is a significant risk, especially in horizontal tubes, where concrete flows in from both ends. Therefore, the canoe was tilted at an angle of 5° to the horizontal plane. This ensured that none of the tubes were perfectly horizontal and the concrete infill could be done progressively. Thus, the ten inlets were not used simultaneously from the beginning, but rather in a sequence, whenever the concrete level would reach their corresponding infill point (Figure 18).



**Figure 18:** The casting sequence of the concrete canoe. The ten inlet points are situated at different heights in the lower part of the formwork. Casting starts through the lowest inlet point (1). The level of concrete inside the formwork ( $H_c$ ) raises gradually. Higher inlet points are used progressively as  $H_c$  increases (2-5). Once the entire canoe is filled, the inlet tubes are removed mechanically (6).

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

Following the concrete casting, the PLA formwork provides the perfect enclosure for concrete curing, preventing cracking due to water loss. After curing for seven days, a heat-gun was used to supply moderate heat (~200°C) and the formwork can be peeled off (Figure 19).



**Figure 19:** UHPFRC prototype (left) after the removal of the submillimetre formwork (right).

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

## Discussion

At the 16th Concrete Canoe Regatta (Figure 20), *skelETHon* received the first prize for design innovation, being commended for the ingenious use of digital fabrication to indirectly produce the intricate concrete skeleton structure. The design and fabrication process of this canoe highlighted the harmonious compatibility between the additive digital fabrication process and the topology optimisation used for form-finding purposes.



**Figure 20:** *skelETHon* at the 16th Concrete Canoe Regatta in Cologne, Germany

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

The key achievement was to keep the thickness of the formwork in the 0.6 to 1 mm range in order to minimise material use and keep fabrication time to a minimum. This was made possible by the unique properties of FDM 3D printing. The relatively expensive and time-consuming 3D printing process is only used for the very thin shell which defines the shape. This is possible because most of the structural stability of the formwork during casting is provided by the sand bed surrounding the formwork.

Such an extreme reduction in the thickness of the formwork has further implications:

a) It minimises tolerances and maximises dimensional accuracy due to reduced thermal shrinkage. For a given temperature variation, the linear and volumetric thermal shrinkage are a fixed percentage of the initial length and volume respectively. For PLA cooling down to room temperature after 3D printing, the linear shrinkage is ~0.25 to 0.3 %. Thus, a 0.8 mm shell will only shrink ~2  $\mu\text{m}$ .

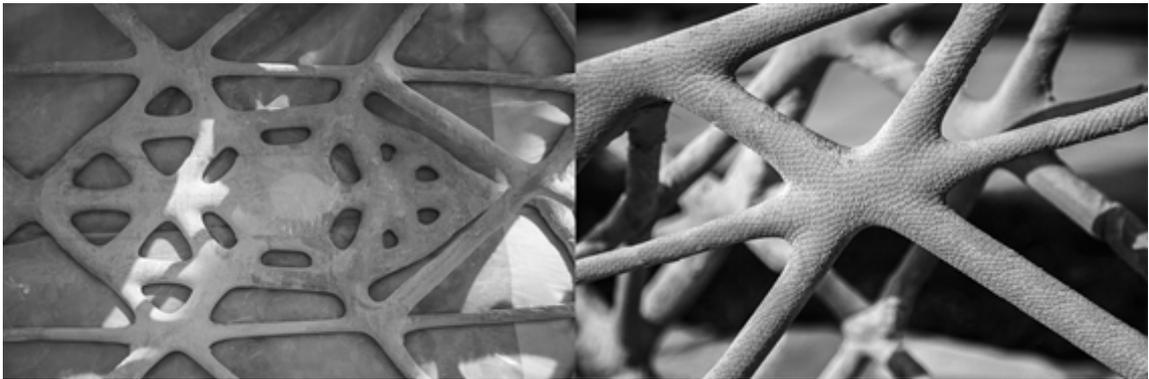
b) Without any release agents and postprocessing steps, the plastic formwork is easily removable.

c) Reduced labour and stream-lined construction process: faster off-site fabrication time for the formwork, reduced cost of transportation to site and easier on-site manipulation and assembly.

d) Considerable formwork material reduction and lower embodied energy for concrete construction overall, given the significant proportion of resources that the formwork represents in conventional concrete constructions. For reference, a commercial lightweight formwork system needs around 30 Kg of formwork / 1 m<sup>2</sup> of concrete, while for the canoe, only 1 Kg / m<sup>2</sup> were necessary (5.5 Kg of PLA formwork for 5.5 m<sup>2</sup> of concrete). The robustness of the proposed system is naturally very low by comparison, but this is addressed in the next chapter, *2.5 Formwork Fabrication*.

Reducing the amount of formwork to a minimum also keeps the costs of the formwork low. For the canoe, the formwork represented roughly twice the cost of the concrete. This is twice as much as the cost of standard formwork in a conventional concrete component. Nevertheless, the canoe had a much larger specific formwork surface area (157 m<sup>2</sup> of formwork / m<sup>3</sup> of concrete) compared to a standard project (2-5 m<sup>2</sup> of formwork / m<sup>3</sup> of concrete). Moreover, compared to the cost of the 3D printed formwork for the canoe, a bespoke commercial formwork system costs roughly 50 times more per m<sup>2</sup>. At this point, there is insufficient data to draw a conclusive direct comparison between 3D printed formwork and a standard system. Nevertheless, the numbers suggest that for bespoke, one-of-a-kind geometries, 3D-printed formwork can offer significantly lower costs, despite the early development stages of the technology.

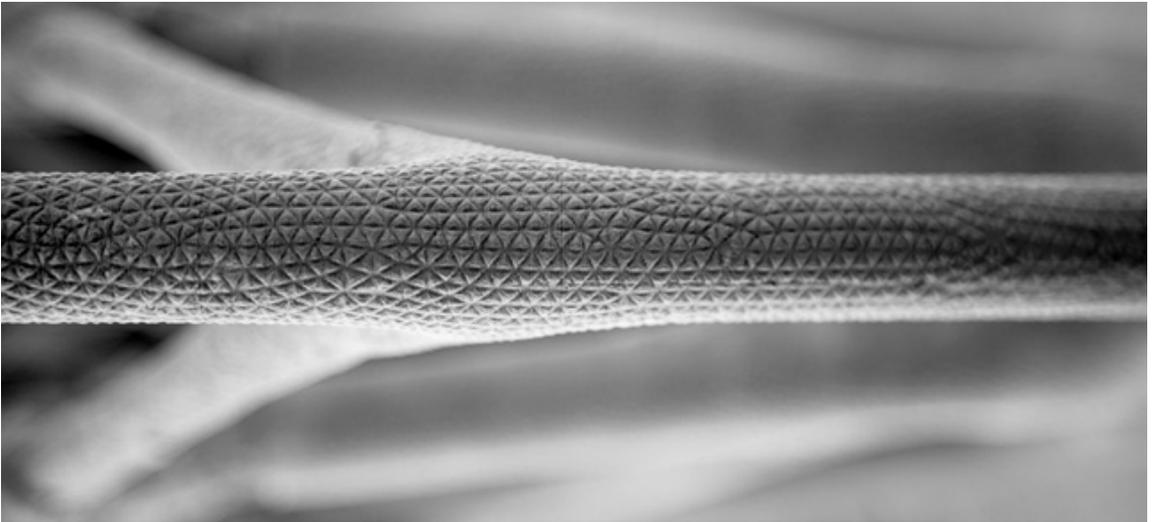
Freeing the 3D printed shell from the need to provide stability, also allowed an unprecedented geometric freedom to be possible with concrete. Due to the topology optimisation algorithm used in the design, concrete was used in a very efficient way, with bones of various thicknesses being optimally distributed to provide maximum stiffness for the frame (Figure 21). The skeleton weighed just under 80 Kg, while the final weight, including the waterproofing layer was 114 Kg. Such an intricate topology, with unique spatial nodes where between three and six linear elements meet at custom angles (Figure 9), with various degrees of smoothness, would be otherwise impossible to fabricate with any other production process.



**Figure 21:** A wide range of geometric features resulted from the topology optimisation algorithm, with denser areas occurring on the keel, where the point loads from the canoeists are concentrated (left); and more open nodes on the hull, where only distributed loads are present (right)

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

Another key achievement was to transfer faithfully a sub-millimetre surface texture from the 3D printed formwork to the concrete (Figure 22). This texture maximises the contact area with the waterproofing skin. Extrapolating this capability to architecture, these fine and precise surface treatments could fulfil other roles, such as acoustic diffusion, haptics or ornamentation for structural building elements.



**Figure 22:** High resolution texture on the surface of stern and inwale of the *skelETHon*. This texture maximises the contact area with the waterproofing concrete skin.

**Source:** DBT, ETH Zürich, 2017

Such a high-resolution texture would otherwise be challenging and time-consuming to achieve with subtractive processes like milling or hot wire cutting. While not unlimited, the geometric freedom offered by FDM certainly complements the other digital fabrication processes available for making formwork. A single fabrication process able to produce any geometry in large scale is not available at the moment, but FDM can be a very efficient tool in producing highly specialised geometries, such as networks of tubes and thin shells, impossible to fabricate otherwise.

## Outlook

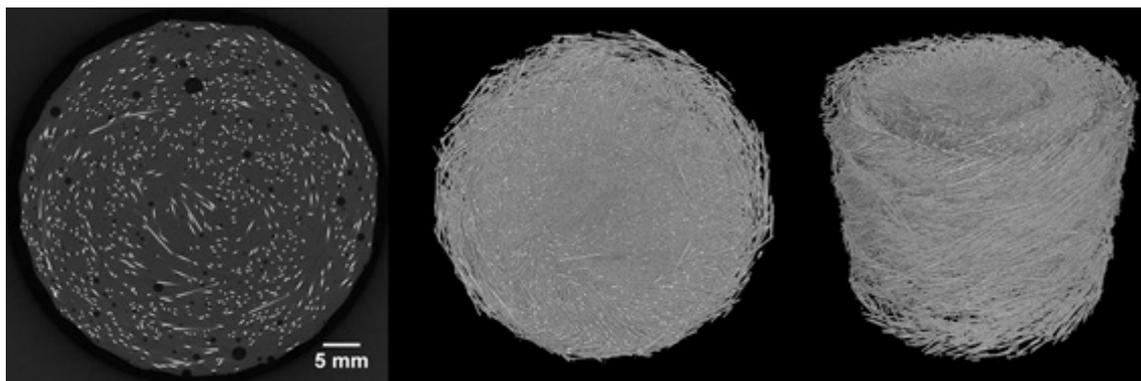
The canoe also highlighted a number of areas which can be addressed by future research in order to make this method suitable for streamlined large scale production:

a) The speed and reliability of the 3D printing process often caused issues, mostly related to the specific type of hardware used. An FDM machine with multiple hot ends, optimised for sustained printing in large volumes would greatly benefit this research.

b) The stability of the formwork can still be problematic at welding points. This is partly due to the large number of parts in which the formwork had to be discretised as a consequence of the small 3D printers used. 3D printing tolerances accumulate in the welding process and cause weaknesses. These weaknesses can lead to leaks of concrete during the casting process. While the sand bed quickly neutralises the leaks, the consistency of the formwork fabrication has to be addressed.

c) Partly due to these inconsistencies, the current process is fundamentally suitable for off-site prefabrication of construction elements. The nature of the casting process where the concrete infilling has to be correlated with the sand-bed counter-pressure is only suitable in a controlled environment. This is because the concrete infill does not happen uniformly as initially predicted. Due to the variable friction with the formwork, wider tubes get filled up faster than narrow ones, which causes different concrete levels at different areas of the formwork. In order to overcome this issue, computational fluid dynamics simulations could be used to design a strategy for positioning inlets as well as adjust the diameters of the formwork tubes in order to ensure a predictable level of concrete throughout the casting process.

d) Another type of simulation that could potentially give valuable insight into this process would be the analysis of the behaviour of the steel fibre reinforcement in such a tubular structure, especially around complex nodes. The consistent orientation of the fibres is critical in ensuring the bending strength of concrete, but the behaviour of the fibres throughout the casting process is difficult to anticipate intuitively. Combined with an empirical method such as X-ray computed tomography (CT) scanning of physical prototypes this could inform the geometry of such skeletons in a meaningful way (Figure 23).



**Figure 23:** Preliminary CT scan of a concrete tube, showing the distribution and orientation of the steel fibre reinforcement, as well as air bubble inclusions.

**Source:** Michele Griffa, EMPA, Dübendorf, Switzerland

## Conclusion

The fabrication process tested with the canoe shows how a cutting-edge digital fabrication technology can be used minimally to fabricate a thin shell formwork which accurately defines the shape, while the stability of the formwork is transferred to a common secondary material, such as sand. The gradual sand filling process, combined with the transparency of the formwork allow live feedback on the casting process, which is critical for intricate geometries.

This novel process can be extrapolated and directly adapted for the design and prefabrication of large, load-bearing, concrete architectural components. The size of the canoe, approximately  $4 \times 0.7 \times 0.7$  m is representative for a building component such as a column, a beam or a façade element and the infrastructure necessary for the casting (i.e. containers for sand) is easily available. The key achievements demonstrated with the canoe can make a big difference on the way concrete is used in architecture: almost unconstrained geometric freedom, significant weight reduction, lightweight formwork and high precision for on-site assembly.

The complexity of the formworks possible, combined with the excellent rheological properties of UHPFRC open up an entirely new family of shapes for concrete building elements: microstructures, free form surfaces, highly detailed textures, precise articulations and convoluted topologies.

With 3D printing, each fabricated part can be unique, since the manufacturing process does not involve the use of expensive moulds which need to be re-used to make them cost-effective. 3D printing one-of-a-kind pieces of formwork, for customised concrete elements specifically tailored for their individual purpose is therefore possible, with no cost or time penalties. These are the first steps towards the mass-customisation of buildings through non-standard, prefabricated concrete components which integrate structural, functional and aesthetic solutions, as well as additional features such as weight reduction and a smart assembly logic.

## Acknowledgments

The authors would like to thank a number of partners and collaborators whose dedication was essential for this research:

- Heinz Richner and Andi Reusser (Concrete Lab, D-BAUG, ETH Zürich);
- Moritz Studer, Oliver Wach, Kathrin Ziegler (Civil Engineering bachelor students, ETH Zürich);
- Matthias Leschok, Ioannis Fousekis (DBT, Student Assistants);
- Lex Reiter (PCBM, IfB, D-Baug, ETH Zürich);
- The Concrete Canoe Club Zürich (Pirmin Scherer, Lukas Fuhrimann, Hannes Heller, Patrick Felder, Jonas Wydler, Jonas Henken, Andreas Näsibom, Anna Menasce, Caterina Rovati, Roman Wüst, Pascal Sutter, Thomas Rupper, Jonathan Hacker);
- Sika AG, Holcim, Allplan, RooieJoris, Specht-Technik, German RepRap (Concrete canoe sponsors);

This research was supported by the NCCR Digital Fabrication, funded by the Swiss National Science Foundation (NCCR Digital Fabrication Agreement #51NF40-141853).

## REFERENCES

- Aghaei-Meibodi, M., Bernhard, M., Jipa, A., & Dillenburger, B. (2017). The Smart Takes from the Strong. *Fabricate 2017: Rethinking Design and Construction*.
- Amir, O. (2013). A topology optimization procedure for reinforced concrete structures. *Computers & Structures*, 114, 46–58. Elsevier.
- Bernhard, Mathias, Michael Hansmeyer, & Benjamin Dillenburger. (2018). Volumetric Modelling for 3D Printed Architecture. *AAG 2018, Advances in Architectural Geometry 2018*, 392–415. Klein Publishing GmbH.
- Crow, J. M. (2008). The concrete conundrum. *Chemistry World*, 5(3), 62–66.
- Fontana, M., Flatt, R., Marchon, D., & Lex, R. (2014). Switzerland Patent No. EP 2 902 183 A1. E. P. Office.
- Hack, N., Lauer, W., Langenberg, S., Gramazio, F., & Kohler, M. (2013). Overcoming Repetition: Robotic fabrication processes at a large scale. *International Journal of Architectural Computing*, 11(3), 285–299. SAGE journals.
- Hack, N., & Lauer, W. V. (2014). Mesh-Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork. *Architectural Design*, 84(3), 44–53. John Wiley & Sons Ltd.
- Gardiner, J. B., & Janssen, S. R. (2014). FreeFAB - Development of a Construction-Scale Robotic Formwork 3D Printer. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp. 131–146). Springer.
- Jipa, A., Bernhard, M., Dillenburger, B., & Aghaei-Meibodi, M. (2016). 3D-Printed Stay-in-Place Formwork for Topologically Optimised Concrete Slabs. *TxA Emerging Design + Technology*. Kory Bieg.
- Jipa, A., Bernhard, M., & Dillenburger, B. (2017). Submillimeter Formwork. 3D Printed Plastic Formwork for Concrete Elements. *TxA Emerging Design + Technology* (p. 9). Kory Bieg.
- Kaczynski, M. P. (2013). Crease, Fold, Pour: Rethinking flexible formwork with digital fabrication and origami folding. *ACADIA 2013: Adaptive Architecture*.
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*, 60, 40–49. Elsevier.
- Morel P., Schwartz T. (2015). Automated Casting Systems for Spatial Concrete Lattices. *Modelling Behaviour*. Springer, Cham.

Nervi, P. L. (1956). Structures. FW Dodge Corp.

Oesterle, S., Vansteenkiste, A., & Mirjan, A. (2012). Zero waste free-form formwork. International Conference on Flexible Formwork, ICFE.

Peters, B. (2014). Additive Formwork: 3D Printed Flexible Formwork. ACADIA 14: Design Agency.

Popescu, M., Reiter, L., Liew, A., Van Mele, T., Flatt, R. J., & Block, P. (2018). Building in Concrete with an Ultra-lightweight Knitted Stay-in-place Formwork: Prototype of a Concrete Shell Bridge. Structures, 14, 322-332. Elsevier.

Post, B., Lloyd, P. D., Lindahl, J., Lind, R. F., Love, L. J., & Kunc, V. (2016). The Economics of Big Area Additive Manufacturing: Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Manufacturing Demonstration Facility (MDF). Oak Ridge.

Robert, H. (2007). Think formwork—reduce cost. Structures, 14. Elsevier.

Ruffray, N., Bernhard, M., Jipa, A., Aghaei-Meibodi, M., Taisne, N. M. d., Stutz, F., Wangler, T., Flatt, R., & Dillenburger, B. (2017). Complex architectural elements from HPFRC and 3D printed sandstone. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. RILEM.

Rust, R., Jenny, D., Gramazio, F., & Kohler, M. (2016). Spatial Wire Cutting: Cooperative robotic cutting of non-ruled surface geometries for bespoke building components. CAADRIA: Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing.

Søndergaard, A., & Dombernowsky, P. (2011). Unikabeton prototype. Fabricate 2011: Making Digital Architecture.

Veenendaal, D., West, M., & Block, P. (2011). History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. Structural Concrete, 12(3), 164-177. John Wiley & Sons Ltd.

**Andrei Jipa**

jipa@arch.ethz.ch

**Mathias Bernhard**

bernhard@arch.ethz.ch

**Nicolas Ruffray**

nicolas.ruffray@ifb.baug.ethz.ch

**Dr. Timothy Wangler**

wangler@ifb.baug.ethz.ch

**Prof. Dr. Robert Flatt**

flattr@ethz.ch

**Prof. Dr. Benjamin Dillenburger**

dillenburger@arch.ethz.ch

# PARAMETRICAL DESIGN TOOL AND THE PRODUCTION OF TECHNICAL DATA FOR SUPERADOBE DOMES

ARTIGO

Ferramenta de desenho paramétrico e a produção de dados técnicos para domos de superadobe

Deborah Macêdo dos Santos<sup>1</sup>, José Nuno Beirão<sup>2</sup>

**RESUMO:** O interesse em construir domos de superadobe (também conhecido como sacos de terra compactada) tem aumentado desde que se tem desenvolvido uma consciência mundial em prol de uma sobrevivência sustentável para o equilíbrio do planeta. O objetivo principal desta pesquisa é desenvolver uma ferramenta paramétrica que ajude os arquitetos a criar modelos virtuais de domos de superadobe, na fase de estudos de criação e construção. Este desafio foi abordado pela adoção de uma metodologia experimental que explora o desenho gerativo paramétrico, com o uso de uma linguagem de programação visual (VPL). Neste artigo apresentamos o desenvolvimento de uma ferramenta para a fase de idealização que é capaz de antecipar os quantitativos da obra. Embora a ferramenta não funcione em ambiente BIM, o modelo gerativo produz informações técnicas de saída destinadas a informar a obra relativamente a condições técnicas e quantidades de material. A usabilidade da ferramenta foi validada com uma amostra aleatória internacional de especialistas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Construção em terra; Modelagem geométrica; Building Information Modelling (BIM); Linguagem de programação visual (VPL); Arquitetura sustentável.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Cariri, IISCA. Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade de Lisboa, Faculdade de Arquitetura, CIAUD. Lisboa, Portugal.

**ABSTRACT:** The interest in earthbag dome construction (also known as earthbag or superadobe) has been increasing as world consciousness develops to achieve the planet's equilibrium for sustainable living. The main objective of this research is to develop a parametric tool to help architects modeling virtual earthbag domes from ideation to construction phase. This challenge has been addressed by adopting an experimental methodology that explores parametric generative design with the use of a visual programming language (VPL). In this paper we present the development of a tool for the ideation level including features that allow for the calculation of material quantification. Even though, the tool does not work in a Building Information Modeling environment, the generative model outputs technical information to support construction, namely material quantities. The usability of the tool was validated by a random international sample of experts.

**KEYWORDS:** Earth construction; 3D modelling; Building Information Modelling (BIM); Visual programming language (VPL); Sustainable Architecture.

## How to cite this article:

SANTOS, D. M.; BEIRÃO, J. N. Parametrical design tool and the production of technical data for superadobe domes. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.14, n.1, p.45-60, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148182>

**Fonte de financiamento:** CNPQ

**Conflito de interesse:**

Declara não haver

**Submetido em:** 16/07/2018

**Aceito em:** 07/02/2019



## INTRODUCTION

This research aims at facilitating the virtual modeling of superadobe domes by architects and also the calculation of the quantitative resources to build up the dome. It is also an indirect way to encourage the adoption of ecological materials used in ancient construction techniques into our current construction practices

In face of the finitude of natural resources and accelerated environmental degradation, recently many researchers (SALGUEIRO; FERRIES, 2015; FATHI; SALEH; HEGAZY, 2016; KENSEK; DING; LONGCORE, 2016; RAHIMIAN; IULO; DUARTE, 2018) have explored the use of digital technologies in various phases of design and planning to improve the development of resilient, sustainable, and environmental-friendly architecture.

Some other researchers have also published work regarding the combination of earth architecture and digital technologies (FUJII et al., 2009; DI MASCIO, 2013; VARELA; PAIO; RATO, 2013; MUÑOZ; JOVE, 2014). It is pertinent to associate the use of digital technologies with the development of these kind of projects because they cause less damage to the environment and should therefore be facilitated. Inside the universe of earth architecture, research merging digital technologies and earthbag techniques is hardly found.

Superadobe is also known as earthbag, sandbag or superblock. It is the construction technique where the walls are built out of stacked bags filled with earth, interspersed with barbed wire to improve clamping between layers (HUNTER; KIFFMEYER, 2004; MINKE, 2006; HART, 2015; SANTOS; BEIRÃO, 2016). These constructions are durable, strong, climatically efficient, and formally flexible (HUNTER; KIFFMEYER, 2004). They are low cost and quick to build. They are composed with renewable and reusable resources, hence promoting sustainable development (BARNES; KANG; CAO, 2006).

Regarding formal composition, the superadobe buildings assume shapes like domes, arches or conventional linear designs (SANTOS; BEIRÃO, 2016). Only with dome composition, the construction can be build up almost exclusively with superadobe, including roofing and foundations.

Because of all those advantages, the earthbag dome have been widely applied for different purposes. One of them is answer to social housing crisis, like the temporary village to receive Iraqi refugees made in 1995 by The United Nations Refugee Agency - UNHCR (ALBADRA; COLEY; HART, 2018). Besides the social housing solution, the earthbag dome has also been adopted in contemporary constructions, like “casa Vergara” (VALLEJO, 2011), built in Bogotá in 2011, a project that integrates the earthbag dome in a contemporary design, creating an innovative project. Many eco-communities and ecovillages have also adopted de earthbag dome because of its ecological potential of resilient design. During the year 2017 we have cataloged a generous amount of earthbag dome figures in social media (Instagram) with the hashtags #earthbag and #superadobe, there were more than 6.000 figures of each descriptor. Some of them have their location identified by the authors, which refers to different locations of the world, such as: Japan, Russia, Venezuela, United States, Australia, India, Brazil, and others.

Although earth construction is recognized as a low environmental impact solution, the existing software tools are still limiting factors in this specific type of project and especially for dome composition which requires to follow more specific design rules. Considering this, we formulated the hypothesis that the virtual modeling of the domes could be aided by a parametric tool specifically developed for the purpose.

This paper offers an overview of the superadobe dome constructive rules and a practical contribution through an application in a computational tool named “CICERO” (Creative Interface for Constructing Earthbag Resource Objects). It is a parametric generative dome design tool developed with the use of a visual programming language (VPL) that generates earthbag designs considering the geometric limitations of the construction

technology guiding the designers towards consistent solutions. It also presents some BIM (Building information modeling) characteristics, since it provides automatically technical data while the model is being generated parametrically.

## METHODS

The research adopted an experimental methodology exploring the advantages of parametric generative design with the use of a visual programming language (VPL systems), through a computational thinking approach.

### Computational thinking

Computational thinking is an analytical way of thinking that can solve any solvable problem (WING, 2008). The use of computational thinking has to follow three key aspects: abstraction, automation and analysis (WING, 2008; LEE et al., 2011). This paper is structured according to this approach and the methodological procedures are:

a) Abstraction: After collecting from existing literature an extensive set of earthbag building technical characteristics, the task is generalized, and the unnecessary details are removed to design a general problem comprehension in the form of a generic diagram. It presents the main parameters for the generation of earthbag domes;

b) Automation: This action corresponds to the design of the code. In this case, to the development of a parametric model able to generate the earthbag domes and associations of various apses. For better formatting purpose, we present the pertinent data collection, together with the automation section, in this paper.

c) Analysis: Checking if the results match the expectations. This was done via online testing with a sample of specialists from different parts of the world.

### Research validation

Visual programming languages may be argued to have begun in the sixties, when a computer graphic experiment named GRAIL (Graphical input language) was presented as computer programming via flowcharts (ELLIS; HEAFNER; SIBLEY, 1969a)(ELLIS; HEAFNER; SIBLEY, 1969b). Nowadays, the most successful VPLs work as plug-ins in a CAD or BIM modeling system, such as Dynamo for Revit and Grasshopper for Rhinoceros (Grasshopper also connect to Archicad and VisualArq). In this research, the adopted set is the second one.

The methodological procedures used to validate CICERO were:

- a) Insert CICERO in a web-based platform to implement tests online.
- b) Submit the tool to architects with experience in earthbag construction to experiment the tool and request answer to an inquiry.
- c) Evaluate the survey and their results. Conclude regarding tool validation.

### Abstraction

Aiming to solve the challenge of designing a parametric system for earthbag domes, a generic code diagram was designed (Figure 1) identifying the changing variables, the kind of shapes that can be generated and the expected associated technical data outputs.

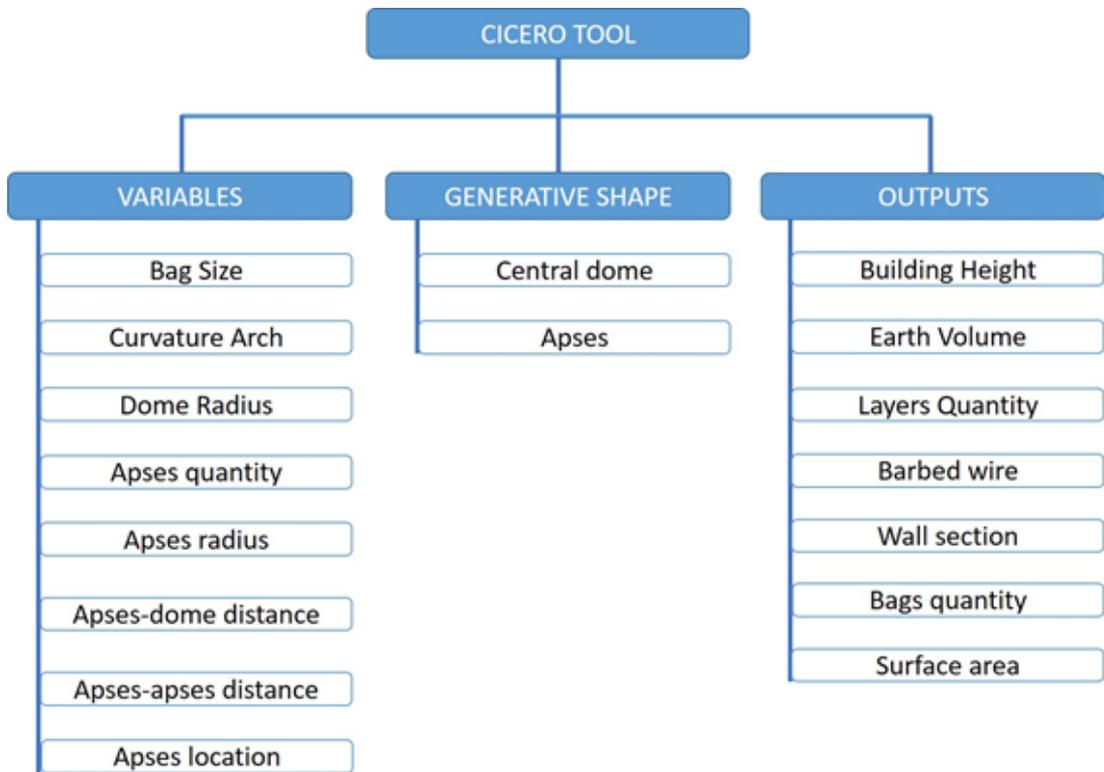


Figure 1: Generic code diagram.

Source: Authors.

### Data collection and code implementation (Automation)

Finding the data collection needed as input is one of the main problems of computer architectural design when used for graphic output (RYBNIKAR, 1985). To develop the VPL code for the earthbag dome construction, two general steps were necessary.

Firstly, an overview of research on earthbag construction was done to identify technical rules, constructive constraints and general characteristics of earthbag domes.

Secondly, we devised a way to insert all technical variables into the code parameters. The goal was to provide a tool where the user could provide inputs and receive an interactive response from the model. The identified inputs refer to: bag size, curvature arch, radius of the dome, quantity of apses (smaller domes) to assemble around the first one, distance of the apses to the center, the angle to locate the apses and finally their radius (Figure 2).

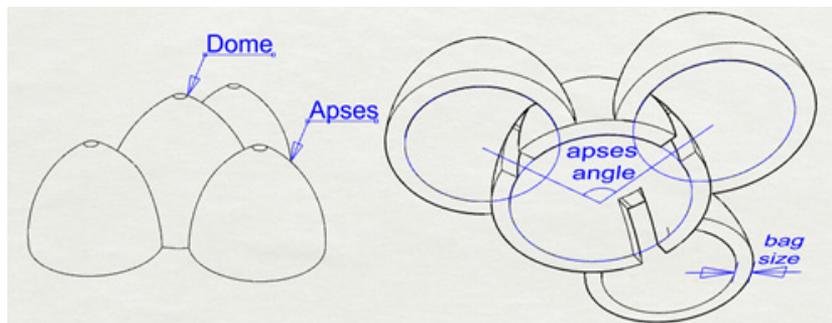
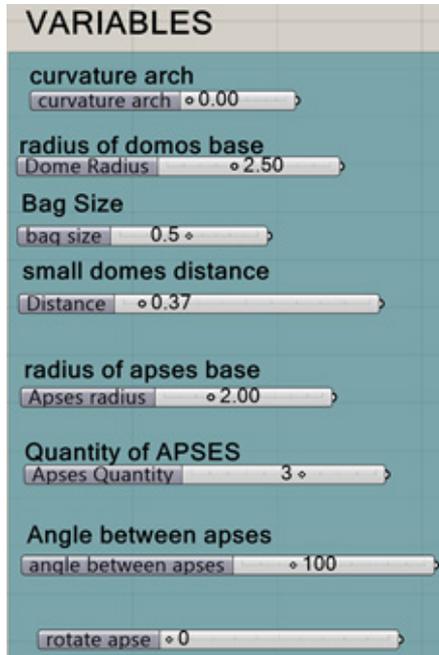


Figure 2: Schematic design of dome and apses.

Source: Authors.

## Variable Inputs and their relations

The tool inputs are inserted resorting to number slider interfaces (Figure 3). These sliders were predefined, constrained to specific limitations resulting from the survey on the structural constraints of the constructive technique.



**Figure 3:** CICERO inputs.

**Source:** Authors.

## Dome design

### BAGS

The purpose of the bag is to retain the earth during the construction process. They can be acquired in tubes as continuous bags or individual bags. Polypropylene bags are more recurrently used; however other kinds can be used like burlap which has the advantage of being made also of natural and environment friendly material. Polypropylene is the cheaper alternative and is not as environmentally toxic as the polyvinyl chloride (PVC) (WOJCIECHOWSKA, 2001); besides, it can be recycled. For construction, the disadvantages are related with fragility resulting from direct ultraviolet sunlight. There are some polypropylene bags with ultra violet protection, but it only delays the degradation process a few weeks, in case the bags are left exposed to sunlight. The indication then is that they must be protected as much as possible, for instance by plastering. However, after plastering, the polypropylene bags are the stronger option and do not deteriorate (HART, 2015).

The wall width is the variable with greatest influence on structural safety (CANADELL; BLANCO; CAVALARO, 2016), then the bags chosen must be bigger than 12 inches (30,48cm) wide, when flattened in each layer (HUNTER; KIFFMEYER, 2004; HART, 2015). Khalili suggests a roll of 14 to 16 inches (35,56 to 40,64cm) wide Superadobe tubing (KHALILI, 2008). For individual bags, Hart suggests bags around 18 inches (45,72cm) wide when flat and 32 inches (81,28cm) long (HART, 2015). After the survey about available bag sizes we considered the sizes that match the structural constraints: 40, 50 and 60 centimeters wide bags after compaction.

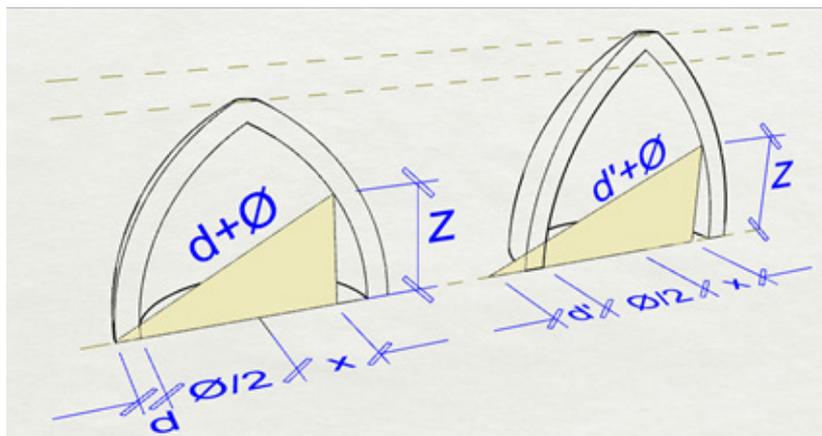
**RADIUS**

For a self-supporting single dome, the ideal interior diameter suggested by Khalili is: 2,5 to 3,5 meters (KHALILI, 2008). However, new studies simulated a diameter of 6,0 meters (HUNTER; KIFFMEYER, 2004; CANADELL; BLANCO; CAVALARO, 2016).

**ARCH CURVATURE**

Earthbag domes are supposed to work with the force of gravity, rather than against it; they are structurally made by the revolution of the most stable design: the dome. The design of self-supporting dome section was created by the observation studies of a hanging chain under tension, once it is reversed is under maximum compression (WOJCIECHOWSKA, 2001; KHALILI, 2008) and becomes a catenary arch (KHALILI, 1986). Even though the catenary arch is the strongest and most stable arch in gravity, it is hard to reproduce it on site in real scale. Because of the structure and method of building a self-supporting earthbag dome has a taller “Lancet” or “Ogival” profile design (GONZÁLEZ, 2006; KHALILI, 2008).

Two kinds of arches were already studied and validated by theoretical studies as the better structural designs for earthbag domes: The pointed arch, originally proposed by Khalili, and the variable arch, proposed by recent structural studies, see figure 4 (CANADELL; BLANCO; CAVALARO, 2016). The variable arch is more steepen aiding extra stability to structure (HUNTER; KIFFMEYER, 2004).



**Figure 4:** relations for dome design. Pointed arch and variable arch.

**Source:** Adapted from Canadell et al., 2016.

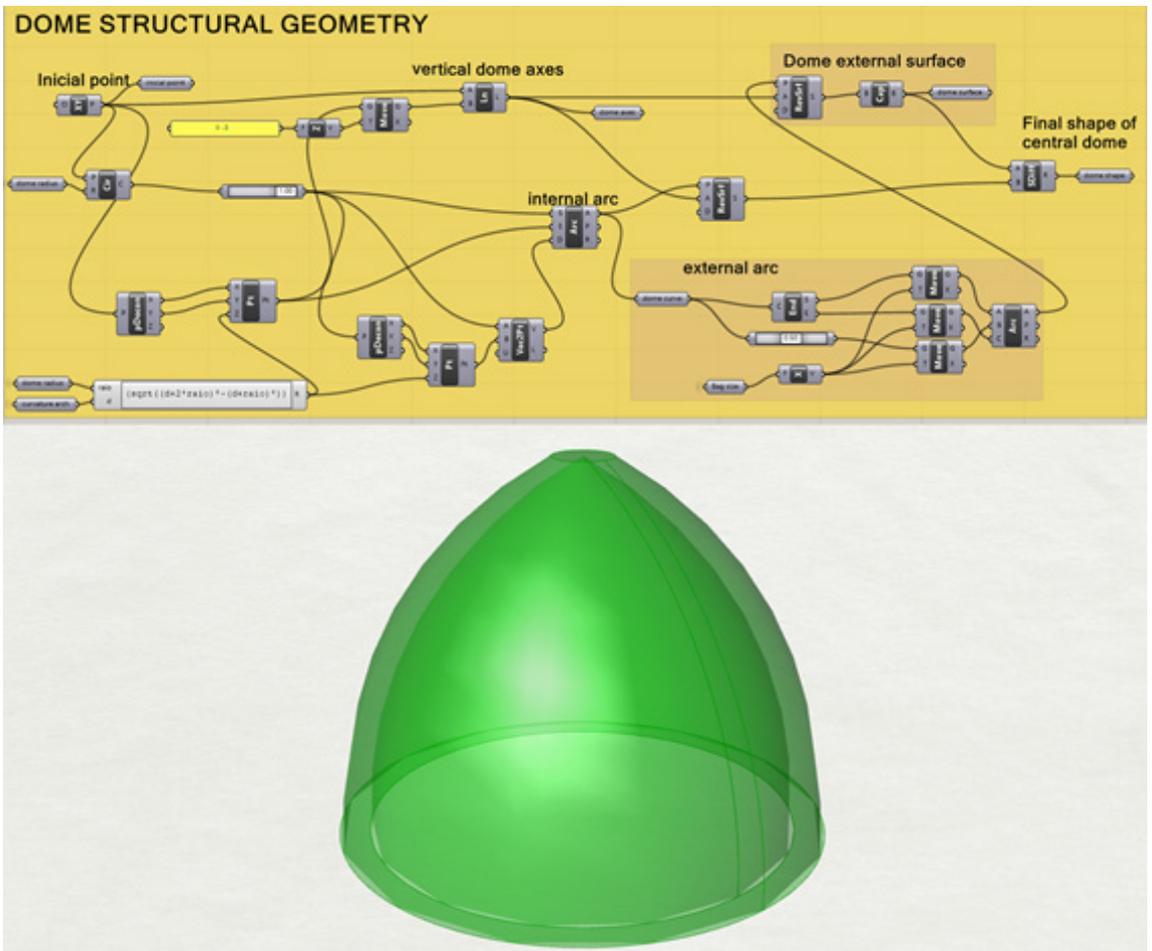
During the construction, it is required the use of two cords as a compass to define the geometry, the center compass to adjust each layer and the height compass to design the arch curvature.

For the pointed arch, the compass must be stacked touching the entrance door covering a cord equivalent to the internal diameter plus bag size. For the variable arch (Figure 4), according to literature, the distance (d') to stack the cord to the dome entrance can be increased up to 1,50m (CANADELL; BLANCO; CAVALARO, 2016).

Based on the arches' curvature equations, it is possible to find the dome height and design the dome section.

**DOMES CODE DESIGN**

Based on the previous collected data, the volumetric dome geometry was codified in grasshopper (Figure 5).



**Figure 5:** Parametric dome design.  
**Source:** Authors.

### Apses design (Clustering)

To achieve designs with a bigger living area, it is recommended to build several interconnected domes instead of a bigger one (HUNTER; KIFFMEYER, 2004).

It is also a good structural strategy, building additional semi-domes (apses), assembled around a big central one acting as buttresses, like in the historical Byzantine constructions (COWAN, 1977).

These associations are build interlocking bags by overlapping alternate rows. The apses will work as a buttress, for the larger dome adding stability to the overall design (COWAN, 1977; KHALILI, 1986). Together they will counterbalance each other permanently.

It is a praxis recommendation to insert at least one third of the apses projection inside the cluster to work as a buttress.

Based on the previous collected data, the volumetric apses geometry was codified in grasshopper (Figure 6).

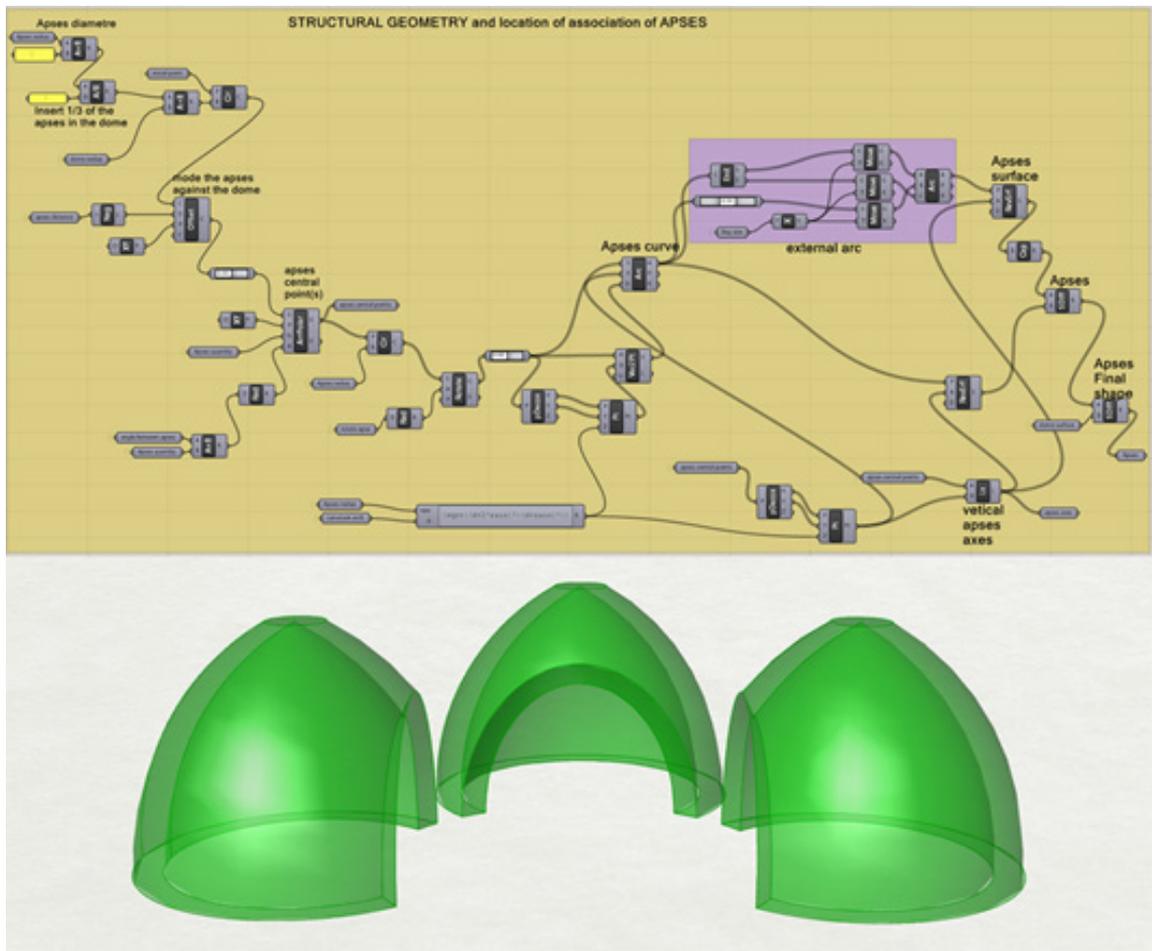


Figure 6: Parametric apses design.

Source: Authors.

### Summary Inputs Board

Table 1 shows a summary of all inputs needed for the generation of the central dome and apses.

Variables	Numerical values	Unity
Bag Size (compacted)	0.4 - 0.5 - 0.6	Meters
Curvature Arch	1 to 1.5	Meters
Dome Radius	0.75 to 5.00	Meters
Quantity of apses	0 to 5	Integers
Radius of apses	0.75 to 5.00	Meters
Distance (apses to center)	≥0	Meters
Angle location (apses)	0 to 360	Degrees
Rotate apses	0 to 360	Degrees

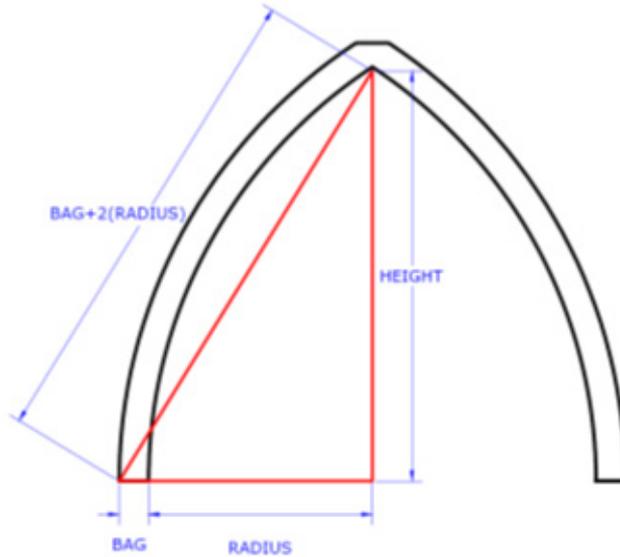
Table 1: Summary Inputs Board.

Source: Authors.

## Outputs

### *BUILDING HEIGHT*

If the radius is known, the height of the building can be extracted by resorting to basic trigonometry, with rectangle triangle proportions (Figure 7). Then the height is given by the equation  $\text{height} = \sqrt{(\text{bag} + 2 \cdot \text{radius})^2 - (\text{bag} + \text{radius})^2}$ .



**Figure 7:** Diagram of equation to find building height.

**Source:** Authors.

### *VOLUME OF EARTH*

The volume of earth consumed in the construction is extracted from the 3D model. However, it is necessary to calculate two variables: the relation between the compacted and uncompact soil and the composition plus percentage of soil mixture. As the conditions can change according to each site, the final user has to do this calculus.

The volume extracted from the model refers to the compacted mixture when the soil particles are pressed together. Therefore, for calculating the earth amount needed in the construction process it is necessary to calculate the uncompact mixture quantity when the soil is loose and mixed with air.

The trivial praxis in quantification engineering calculus is to add 40% to discover the uncompact soil volume  $V_e$ . So, we developed the equation that multiplies the earth compacted volume ( $V_c$ ) per a compression factor ( $f$ ) to obtain the needed earth volume ( $V_e$ ).  $V_e = V_c + (V_c \times f)$ . When the factor ( $f$ ) is unknown one adopts the 40% addition as standard value,  $V_e = 1,4V_c$ .

As bags contain soil, any soil type can be used, except highly organic soil, increasing the chance to use on-site material (CALKINS, 2009). However the ideal mix for earthbag construction is approximately 30% of clayed soil and 70% sandy soil (HUNTER; KIFFMEYER, 2004; CALKINS, 2009; GEIGER, 2011; HART, 2015). Most of the world's oldest remaining earth constructions were built with this soil mix ratio. Sometimes it is not possible to achieve the ideal ratio depending on the site soil; in such a case the builder needs to insert different proportions of natural hydraulic lime.

### *LAYERS QUANTITY*

After the tamping process, the layers lose height up to 12 cm (GEIGER, 2011). After the conclusion of higher layers, the underlying rows can flatten down also. They can variate a little between themselves.

For empirical studies, it was defined that, considering representations

necessities, the height of each earthbag layer must represent by the rate of ten centimeters (HUNTER; KIFFMEYER, 2004). Then, to identify the number of layers the equation is given by dividing the total height by 0,10 meters.

**BARBED WIRE**

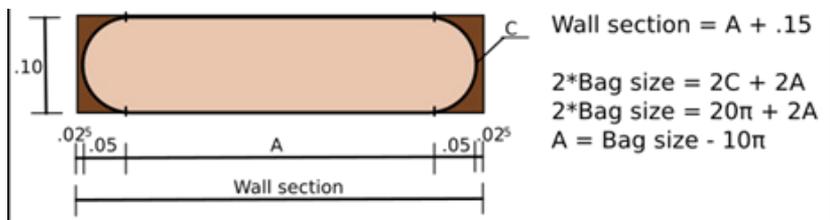
Ideally two threads of 4-point barbed wire are applied, parallel to each other, between the layers along the entire length of the wall to increase bag to bag friction and overall stability (WOJCIECHOWSKA, 2001; HUNTER; KIFFMEYER, 2004; GEIGER, 2011; HART, 2015). The wire combined with the woven polypropylene fabric add a high tensile strength to the structure. Therefore, the total length of barbed wire is twice the length of all bag layers, except the last one.

**BAGS QUANTITY**

The bags quantity is extracted from the model. The total of bags in linear meters is the length of all bag layers, plus at least 20cm of loose material, for each cut, to tie off the ends (HUNTER; KIFFMEYER, 2004; HART, 2018).

**WALL SECTION**

The wall section is derived from calculating the bag width plus inner and outer covering material (2,5cm thick plastering). When the bags are full and tamped, the wall presents layers of 10 cm of height. A 2,5cm thick layer of plaster regularizes the wall surface, both inside and outside. The mathematical expression for the wall section is presented in Figure 8. The bag diameter corresponds to twice the bag size.



**Figure 8:** Wall section expression.

**Source:** Authors.

**SURFACE AREA**

The quantity of external surface is extracted directly from the model. Knowing the total external surface is important to calculate the quantities of coating material to protect the structure. The covering materials can variate according to each project. However, it is often used chicken wire or synthetic mesh to wrap the entire dome surface providing adhesion more adherent surface for usual covering materials, including stucco and earthen plaster (HUNTER; KIFFMEYER, 2004; HART, 2015, 2018).

The chicken wire or synthetic mesh quantity is calculated depending on the way selected to attach it into a bag wall. One way to do it is install lengths of tie wires into the barbed wire between layers, to project beyond the wall more than 5 cm, during the construction (HUNTER; KIFFMEYER, 2004). When the walls are built, the chicken wire is stretched over the walls, including doors and windows, then it is cinched tight and tacked down. The chicken wire consolidates the plaster coating and its surface corresponds the 1,1 times the wall surface (inside surface plus outside surface). This values considers chicken wire overlaps needed to guarantee a continuous consolidation of the plaster coating.

Outdoor plasters need stabilization to avoid erosion or degradation by weather. Some examples that can be added to the mixture are Portland cement, lime, flour, and cactus juice (HART, 2018). The ratio of lime mixture is 1 part of hydrate lime to 3 parts of sand.

The quantity of plaster used to cover inside and outside wall surfaces is taken from the geometric model (inside plus outside surfaces) and multiplied by the 2,5cm thickness. The additional grooves generated by the bag layers correspond to four times ( $r^2 - \pi r^2/4$ ) multiplied by the sum of all layers' perimeters. In this equation  $r$  corresponds to half the bag layer thickness, in other words to 5cm.

Therefore, the geometric model outputs an accurate list of all material parts and their quantities, including bags, barbed wire, earth divided in its constituent parts, chicken wire and plaster. Any additional outside surface finishing like painting or lime whitewash can be also taken directly from the geometric model.

## RESULTS AND DISCUSSIONS (ANALYSIS)

The code structure provides a generative design interface, based on changing the input variables bounded by the known structural constraints and generate a volumetric model together with the necessary constructive information outputs, namely those informing material quantities which enable the calculation of construction costs.

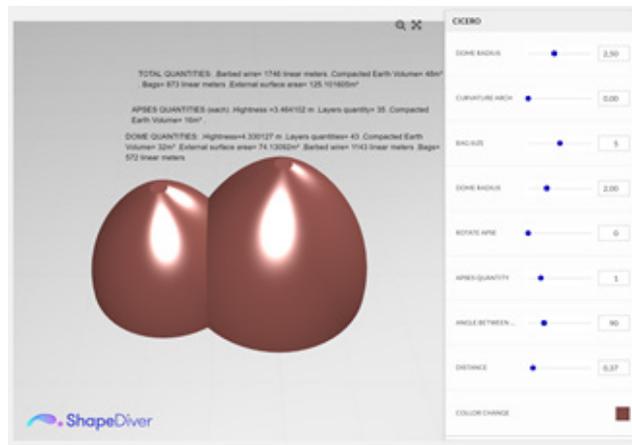
The CICERO tool was designed after some preliminary code prototypes based on a systematic literature review process and several trial implementations until an idealized usability was eventually achieved. There is a rectangle box interface on the right side of the interface providing the variables, or the inputs to be changed per project by the user. On the left side, there is the generated simplified 3D model providing the constructive information as outputs. They are given in real time to help decision making while the creative process is under development.

At first, we tried to design the model revealing the detailed design of walls, including the layers, barbed wire and covering, but the algorithm became slow and the tool used to crash depending on the computer. Then we decided to provide a schematic visualization to have the benefit of an algorithm that runs faster. However, the tool still informs the number of layers as output. Only geometry is simplified. This method of simplification and high simplification - the use of only primitive forms - of buildings representation, to the detriment of better user experience by algorithmic design, have been indicated and adopted by well-known researchers (SHAVIV; GAVISH; AMIR, 1990).

We had the same crash problem when applying windows and doors parametrically, then we decided to include fixed internal doors between rooms. Windows and doors can be added later on when a design is fixed, in the algorithm, and then the calculations of material quantities are updated.

## VALIDATION

Later on, an evaluation was made resorting to online users, using the 'shapediver' ([www.shapediver.com](http://www.shapediver.com)) platform to host the tool (Figure. 9). In this way, the users did not need to download anything, and they could do the entire procedure online.



**Figure 9:** CICERO tool.  
**Source:** Authors.

The tool was embedded in a website ([www.cicero.earth](http://www.cicero.earth)) with a video-tutorial and an inquiry to answer after its use. The inquiry was available in English and Portuguese and was divided into three larger categories: user characterization, user interaction and subjective suggestions for improvements.

The website was disclosed aiming at experts in earthbag construction and planning for validating the technical data, the tool usage and establish a general profile of the target audience for the final tool.

It was also necessary to collect data from lay people (not just from experts) to evaluate the tool user experience.

### User Characterization

There were seventeen people, with different working nationalities (Brazil, United States, Guatemala, Turkey, Portugal and Italy), recruited for the research sample. The age variations were: 47% between 26 to 35 years, 35% between 36 to 45 years, 6% between 46 to 55 years and 12% over 66 years old.

Five of them were specialists in planning, had constructive experience in earthbag buildings and still work in this field. One works in Europe, two in Brazil, and two in the United States. One with less than five years of experience, two with five to seven years, and two with more than ten years. Two usually plan by hand, and three use CAD software. When it was asked how much time they usually need to design a virtual volumetric model, most of them answered differently: two never did, one needs minutes, one needs hours and one needs days.

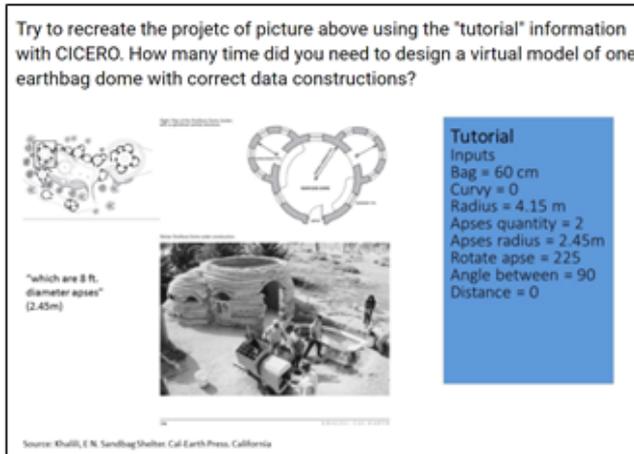
There was one retired (did not specified the career), and only one student in the sample, all the other persons were architects, designers or professors in these fields. Two of them did not know about earthbag construction before this research, the others learned it in University, books, workshops, conferences, websites, video programs and manuals.

### User Interaction

There were three exercises to evaluate the tool performance for time and comprehension of the tool, and ten objective questions based on the 10 Nielsen's heuristics (NIELSEN, 1995).

The exercises were designed to recreate three different known volumetric dome models, extracted from the literature (Figure. 10). Technical images and respective information to feed the tool were given. After finishing the experiment, users were requested to sign how much time they took to design the virtual model.

The exercises were given in an ascendant difficulty scale, where they needed to change progressively more variables to generate more complex dome clusters. Eighty-eight percent, did the exercises in less than ten minutes using CICERO. Only two people took more time to do them. The first because he was doing other things during the exercise, the second was a Brazilian and said that he had difficulties to understand the parameters in English and had to check their translation first.



**Figure 10:** Example of the exercise given to validate the tool.

**Source:** Authors.

The questions are based on Nielsen’s heuristics; these are guidelines to evaluate the user interaction. They regard: visibility of system status; match between system and real world; user control and freedom; consistency and standards; error prevention; recognition rather than recall; flexibility and efficiency of use; aesthetic and minimalist design; help users and documentation.

All fourteen people answered this part. All heuristics parameters were well ranked in evaluation (more than 85%). The only parameter that took less was about the help documentation, where just 71% said it was enough for their CICERO understanding.

### Suggestions

The last comments and suggestions given by the participants were: insert in Cicero additional data regarding buttressing (besides the included apses), openings and safety factors; improve the explanation on the parameters with auxiliary documentation; insert the measurement units in the parameters and finally translate the tool for other idioms.

### IS CICERO A BIM TOOL?

During presentations in conferences and research groups, it was discussed that CICERO could be seen as a BIM tool, due to the technical outputs that it gives. That statement makes sense considering that Building Information Modeling (BIM) are not an exclusive set of software programs, it is a process. To be specific, a modeling technology and a set of processes associated to produce, communicate and analyze constructive models (EASTMAN et al., 2011) and we would add, whilst providing associated technical data.

After a deep review of the meaning of acronyms BIM, Gaspar and Ruschel understood as a first reference that to be a BIM, this technological process must fill three items: a) object-based design; b) parametric manipulation; c) relational database (GASPAR; RUSCHEL, 2017). To put in another way, the Building Information Model is a three dimensional geometric and

parametric model with embedded data (KENSEK, 2014; TURK, 2016; LIMA et al., 2017).

As CICERO offers an object-based design, with parametric manipulation and some relational database, their utilities match with the presented definitions of BIM (Figure 11). However, CICERO can still be improved with additional technical documentation for construction management.

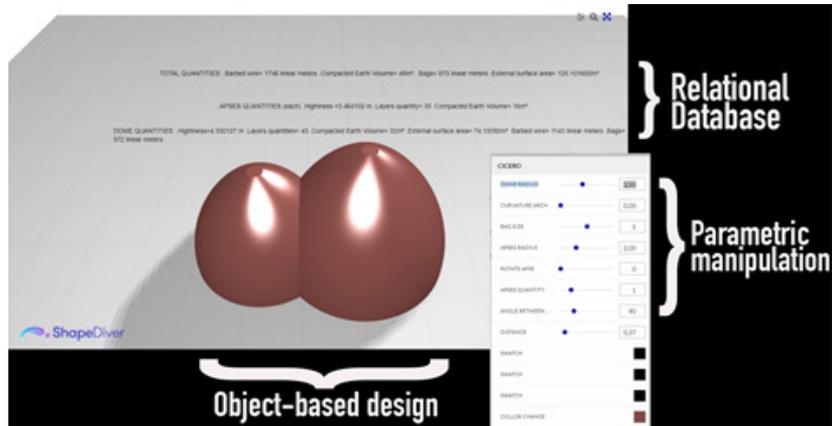


Figure 11: Correlations between CICERO and BIM

Source: Authors.

## CONCLUSION

The results of the validation process confirmed the hypothesis that the use of a parametric modeling tool can improve and aid the design of earthbag domes providing new useful tools to designers. The user can create complex models, with one or more domes associated by just changing a few numeric variables, receiving the construction specification outputs, in a short period, with high efficiency. As a practical contribution, this tool is expected to help architects to design earthbag building domes, in an easier and faster way while generating automatically the necessary documentation for construction. Additionally, the generated model provides also 3D models that can be used together with digital fabrication tools to fabricate 3D scaled models that are otherwise difficult to fabricate. Finally, we also expect that the use of this tool may increase the promotion of this form of sustainable building. Future work includes improving the tool by embedding it in a BIM environment and combining dome solutions with other constructive techniques creating hybrid architectural solutions.

## FUNDING

This work was supported by the CNPQ (Brazilian National Council for Scientific and Technological Development) under grant 201904/2015-2.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank CNPQ for granting Deborah Santos a PhD abroad scholarship (grant 201904/2015-2); To Federal University of Cariri, for allow the professional qualification abroad; To The Research Centre for Architecture, Urbanism and Design (CIAUD) at University of Lisbon; To Arqas office for kind support and information regarding earthbag structures; To specialists and permacultors Kelly Hart, Neimar Marcos Silva, Samuel, George Belisario and Davidde for their precious feedbacks.

## REFERENCES

- ALBADRA, D.; COLEY, D.; HART, J. Toward healthy housing for the displaced. **Journal of Architecture**, v. 23, n. 1, p. 115–136, 2018.
- BARNES, B.; KANG, M.; CAO, H. Sustainable characteristics of earthbag housing. **Housing and Society**, v. 33, n. 2, p. 21–32, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/08882746.2006.11430534>>. Acesso em: 20 jul. 2018.
- CALKINS, M. **Materials for Sustainable Sites Defined**. New Jersey: John Wiley and Sons, 2009.
- CANADELL, S.; BLANCO, A.; CAVALARO, S. H. P. Comprehensive design method for earthbag and superadobe structures. **Materials and Design**, v. 96, p. 270–282, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.028>>. Acesso em: 12 jul. 2018.
- COWAN, H. J. A history of masonry and concrete domes in building construction. **Building and Environment**, v. 12, n. 1, p. 1–24, 1977.
- DI MASCIO, D. Understanding and Managing the Constructive Characteristics of Vernacular Architecture Two raw earth dwellings. **eCAADe 2013: Computation and Performance – Proceedings of the 31st International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe**, v. 2, p. 435–444, 2013.
- EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modelling For Owners, Managers, Designers, Engineers, Contractors and Facility Managers**. 3. ed. New Jersey: Wiley, 2011. v. 1
- ELLIS, T. O.; HEAFNER, J. F.; SIBLEY, W. L. **The Grail Project: An experiment in Man-machine communications**. Santa Monica: Rand corporation, 1969a.
- ELLIS, T. O.; HEAFNER, J. F.; SIBLEY, W. L. **The Grail Project: An experiment in Man-machine communications**. Santa Monica: Rand corporation, 1969b.
- FATHI, A.; SALEH, A.; HEGAZY, M. Computational Design as an Approach to Sustainable Regional Architecture in the Arab World. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **Anais...** Elsevier, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042816307030>>. Acesso em: 12 jul. 2018.
- FUJII, Y.; FODDE, E.; WATANABE, K.; MURAKAMI, K. Digital photogrammetry for the documentation of structural damage in earthen archaeological sites: The case of Ajina Tapa, Tajikistan. **Engineering Geology**, v. 105, n. 1–2, p. 124–133, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.11.012>>. Acesso em: 12 jul. 2018.
- GASPAR, J. A. da M.; RUSCHEL, R. C. A evolução do significado atribuído ao acrônimo BIM: Uma perspectiva no tempo. **Blucher Design Proceedings**, p. 423–430, 2017. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/27662>>. Acesso em: 12 fev. 2018.
- GEIGER, O. **Earthbag building guide**. [s.l.] Excellence in natural building series, 2011.
- GONZÁLEZ, F. D. **Geometrias da arquitetura de terra: A sustentabilidade geométrica da terra crua**. Lisbon: Universidade Lusíada, 2006. v. 1
- HART, K. **Earthbag architecture**. Lexington: Hartworks, 2015.
- HART, K. **EARTHBAG the complete step-by-step guide**. 1. ed. Canada: New society publishers, 2018.
- HUNTER, K.; KIFFMEYER, D. **Earthbag Building: The Tools, Tricks and Techniques**. Gabriola Island, Canada: New society publishers, 2004.
- KENSEK, K.; DING, Y.; LONGCORE, T. Green building and biodiversity: Facilitating bird friendly design with building information models. **Journal of Green Building**, v. 11, n. 2, p. 116–130, 2016.
- KENSEK, K. M. **Building information modeling**. New York: Routledge, 2014.
- KHALILI, E. N. **Ceramic houses and earth architecture**. 7. ed. California: Cal-Earth Press, 1986.
- KHALILI, E. N. **Emergency sandbag shelter and eco-village**. Hesperia, CA: Cal-Earth Press, 2008.
- LEE, I.; MARTIN, F.; DENNER, J.; COULTER, B.; ALLAN, W.; ERICKSON, J.; MALYN-SMITH, J.; WERNER, L. Computational thinking for youth in

practice. **ACM Inroads**, v. 2, n. 1, p. 32, 2011. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1929887.1929902>>.

LIMA, R. H. F.; ARAÚJO, B. G.; PAZ, G.; OLIVEIRA, I. M. Mapa de danos de edificações históricas utilizando a metodologia BIM. (S. Scheer, E. T. Santos, M. M. X. Lima, Eds.) In: Anais do 1o Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, Fortaleza. **Anais... Fortaleza: Marketing aumentado**, 2017. Disponível em: <[http://marketingaumentado.com.br/sbtic/sbtic2017\\_artigos.html](http://marketingaumentado.com.br/sbtic/sbtic2017_artigos.html)>. Acesso em: 15 mar. 2018.

MINKE, G. **Building with Earth**. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2006.

MUÑOZ, M. del R.; JOVÉ, F. From refined to popular architecture. Mixed rammed earth walls with adobe reinforcements. (C. Mileto, F. Vegas, L. Gracia, V. Cristina, Eds.) In: proceedings of the international conference on vernacular heritage, sustainability and earth architecture, Valencia, Spain. **Anais... Valencia, Spain: CRC press**, 2014.

NIELSEN, J. 10 Heuristics for User Interface Design: Article by Jakob Nielsen. **Jakob Nielsen's Alertbox**, p. 1-2, 1995. Disponível em: <<http://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

RAHIMIAN, M.; IULO, L. D.; DUARTE, J. M. P. A Review of Predictive Software for the Design of Community Microgrids. **Journal of Engineering (United States)**, v. 2018, 2018.

RYBNIKAR, O. Computer-Aided Architectural Design. **Batiment International, Building Research and Practice**, v. 13, n. 1, p. 31-36, 6 jan. 1985. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09613218508551239>>. Acesso em: 17 maio. 2018.

SALGUEIRO, I. B.; FERRIES, B. An "environmental BIM" approach for the architectural schematic design stage. **International Journal of Architectural Computing**, v. 13, n. 3-4, p. 299-312, 2015. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84957658646&partnerID=tZOtx3y1>>.

SANTOS, D. M.; BEIRÃO, J. N. D. C. Data collection and constructive classification of superadobe buildings. **Revista Ciência e Sustentabilidade**, v. 2, n. 2, p. 208-226, 2016.

SHAVIV, E.; GAVISH, O.; AMIR, U. Implementation of Solid Modeling in High Hierarchy Architectural Language. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 17, n. 2, p. 205-220, 1990. Disponível em: <<http://www.envplan.com/abstract.cgi?id=b170205%0Ahttp://epb.sagepub.com/lookup/doi/10.1068/b170205>>.

TURK, Z. Ten questions concerning building information modelling. **Building and Environment**, v. 107, p. 1-11, 2016.

VALLEJO, J. A. Casa Vergara: Un proyecto de exploración de materiales. **Exkema**, v. 3, n. 3, p. 38-41, 2011.

VARELA, B.; PAIO, A.; RATO, V. Digital tectonic: Rethinking building with earth in architecture. In: CORREIA, M.; CARLOS, G.; ROCHA, S. (Ed.). **Vernacular Heritage and Earthen Architecture**. The Netherlands: CRC press, 2013. p. 809-813.

WING, J. M. Computational thinking and thinking about computing. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 366, n. 1881, p. 3717-3725, 2008. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.2008.0118>>.

WOJCIECHOWSKA, P. **Building with earth: a guide to flexible-form earthbag construction**. White River Junction, United States: Chelsea Green Publishing Co, 2001.

Deborah Macêdo dos Santos  
deborah.santos@ufca.edu.br

José Nuno Beirão  
jnb@fa.ulisboa.pt

# ARQUITECTURAS EN RELACIÓN CON EL CONTEXTO: COMPORTAMIENTOS SENSIBLES COMO FORMAS DE COMUNICACIÓN

ARTIGO

**Architectures in relationship with the context: sensitive behaviours as a kind of communication**

**Daniela Frogheri<sup>1</sup>, Fernando Meneses-Carlos<sup>2</sup>, Alberto T. Estévez<sup>3</sup>**

**RESUMO:** Este escrito presenta una investigación sobre la relación entre arquitectura y contexto aplicada al desarrollo de un pabellón sensible que recibe datos a través de sensores en vivo, a los cuales responde y se adapta en tiempo real, generando una resiliencia biunívoca entre el objeto arquitectónico y el contexto. La investigación se desarrolla a través de la integración entre procesos de morfogénesis digital, el diseño algorítmico, la plataforma de Arduino, sensores y dispositivos de entrada y salida que conectan datos y materia; gracias a la programación y la fabricación digital. El resultado es un pabellón diseñado y fabricado digitalmente, cuya morfología surge de la relación entre sus reglas internas de conformación y la materia, que le proporciona capacidades autopoieticas; además de la interacción con el exterior, esta última basada en comportamientos de seres vivos como proximidad y mimesis. El pabellón, mediante sensores de color y de proximidad, recibe datos del entorno y reacciona con cambios de color y forma, que le permite trascender desde el concepto de objeto arquitectónico como entidad fija y cerrada hacia la idea de proyecto como sistema.

**PALABRAS CLAVE:** Arquitectura Sensible; Comunicación; Comportamientos; Fabricación Digital; Resiliencia.

<sup>1</sup>Universidad de Monterrey, UDEM

<sup>2</sup>Escuela Radical, México

<sup>3</sup> iBAG/UIIC Barcelona - Universitat Internacional de Catalunya

**ABSTRACT:** This paper presents a research of the relationship between architecture and context applied to the development of a sensitive pavilion that receives data from live sensors, responds and adapts in real time, generating a biunivocal resilience between the architectural object and the context. The research is developed through the integration between processes of digital morphogenesis, parametric-generative design, Arduino, sensors, input and output devices that connect data and matter, programming and digital fabrication. The result is a pavilion designed and manufactured digitally, whose morphology comes from the relationship between its internal rules of conformation, generated with algorithms and the matter, that makes it autopoietic, in addition to the relationship with the outside; all based on the behaviors of proximity and mimesis. The pavilion, through sensors, receives data from the environment and reacts with changes of colors and form; which allows it to transcend from the concept of the architectural object as a static and closed entity, developing and fully expressing the idea of the project as a system.

**KEYWORDS:** Sensitive Architecture; Communication; Behaviours; Digital Fabrication; Resilience.

## How to cite this article:

FROGHERI, D.; MENESES-CARLOS, F.; ESTÉVEZ, A. T. Arquitecturas en relación con el contexto: comportamientos sensibles como formas de comunicación. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.14, n.1, p.61-75, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148429>

## Fonte de financiamento:

Declaro não haver

## Conflito de interesse:

Declaro não haver

Submetido em: 24/07/2018

Aceito em: 07/02/2019



## INTRODUCTION

### Las bases: “Bichos y otras morfologías” como línea de investigación

El trabajo aquí presente surge desde una línea de investigación previa, llamada “Bichos y otras morfologías” que estudia y experimenta procesos de generación de la forma y su materialización a través del diseño computacional y la fabricación digital, con aplicaciones vinculadas a la docencia.

La investigación, realizada en la modalidad de *research by design*, se basa en el *feedback* entre el desarrollo de conceptos y su aplicación práctica; de donde se definen tanto sus fundamentos teóricos como las posibilidades de aplicación.

El trabajo, iniciado en el 2013, se concreta en una familia de pabellones a escala real denominados “Bichos”, diseñados y realizados en colaboración entre el Estudio de “Elementos de la Arquitectura”<sup>1</sup> de la Universidad de Monterrey (UDEM, México) y el FabLab Monterrey; la investigación incluye además la generación de otras entidades formales que proceden de estudios de *form finding* analógico y digital, algoritmos, sistemas de sustitución y de re-escritura, sistemas formales figurativos y no figurativos, todos con sus respectivos mapeos, desarrolladas en los cursos de Morfología y Geometrías Generativas.

La línea de investigación “Bichos y otras morfologías” se desarrolla a raíz de los principios del *Pensar y el Hacer Avanzados* (Frogheri, 2018), donde por *Pensar Avanzado* se entiende la experimentación de procesos de diseño fundamentados en el proyecto como sistema, a través del pensar paramétrico-generativo-asociativo y el desarrollo de algoritmos geométricos para la comprensión y el dominio de los criterios de organización y generación de las formas, incluyendo tanto etapas analógicas como el diseño digital; mientras que el *Hacer Avanzado* consiste en la comprensión de la relación entre el diseño del objeto arquitectónico y su materialización física, explorando las propiedades intrínsecas de la materia con estudios analógicos y digitales, experimentando de manera directa las posibilidades y el potencial de la fabricación digital.

La presente investigación es una evolución del proyecto “Bichos” que surge desde la necesidad de integrar la relación entre el objeto y el contexto en los procesos de morfogénesis, al fin de concebir tal relación como parte integrante del sistema; en las etapas precedentes (Frogheri y Estévez, 2016a), las lógicas de generación de la forma, aun si estudiadas a través de sistemas, se mantuvieron a un nivel interno gracias a reglas de organización prevalentemente intrínsecas, donde el exterior se consideraba más como un escenario donde ubicar el objeto arquitectónico o un conjunto de factores externos de los cuales protegerse, que como parte activa del proyecto.

### El pabellón “Bicho VII”: una nueva rama de la investigación

Lo que se presenta en este escrito, por lo tanto, es una investigación sobre la relación entre arquitectura y contexto, aplicada al desarrollo de un pabellón denominado “Bicho VII”, donde tal relación se integra con la morfología del objeto arquitectónico. Dicha relación se manifiesta a través de la capacidad del pabellón de relacionarse con “lo demás” de manera sensible, gracias a la recepción de datos de sensores en vivo y la adaptación a los mismos, generando una forma de resiliencia biunívoca entre entidades en comunicación; donde tal capacidad no es una propiedad añadida al objeto terminado, sino más bien parte de su naturaleza.

La relación entre el objeto arquitectónico y el contexto, se concibe como elemento de la arquitectura en continua retroalimentación con su morfología; su diseño y su programación son parte del sistema, donde el

<sup>1</sup> El estudio de “Elementos de la Arquitectura” pertenece a los cursos de grado de la carrera de Arquitectura de la Universidad de Monterrey, y se imparte en el semestre dos del primer año.

intercambio con el exterior participa en la conformación tanto en fase de proyecto como de materialización.

Otro motor de la investigación, más general, surge desde una mirada al presente, donde una de las características que definen nuestra época es la elevada capacidad de conectar entidades similares o de naturaleza diferente, sean estas personas, otros seres vivos, cosas, datos inmateriales o elementos tangibles. Dichas posibilidades de comunicación, debidas a los avances de la tecnología y su difusión masiva, han revolucionado el concepto de objeto, desde el momento en que se concibe hasta su materialización física, considerado tanto como elemento en sí como en relación con “lo demás”.

Sí es verdad que desde hace varias décadas, antes la electricidad y luego lo digital, conectan elementos distintos con un único lenguaje (De Kerckhove, 1997), también es verdad que en estos últimos años se están desarrollando tecnologías y dispositivos que convierten datos en materia, materia en datos, y que los comunican entre ellos.

La fabricación digital, que en sí es comunicación, transforma bits en átomos (Gershenfeld, 1999); dispositivos como Arduino y su plataforma, proporcionan los medios y el lenguaje para hacer hablar directamente datos digitales y analógicos con elementos físicos. La difusión masiva de esta tecnología, invita cada vez más al entendimiento de su funcionamiento, transformando al usuario en desarrollador. Este acercamiento hacia el “hacer”, que con la fabricación digital ha acortado la distancia entre el diseñador y el objeto, reanudando el diseño del mismo con su materialización física, gracias a la familiarización con plataformas de entrada-salida de datos y materia, permite no sólo fabricar objetos, sino también diseñar interacciones entre ellos y con otras entidades, a través de la programación de estas relaciones que se vuelven parte del proyecto, introduciendo el concepto de conexión como elemento de la arquitectura.

En este panorama, donde las capacidades singulares de las personas y de las cosas adquieren más valor y potencial al conectarse con lo y los demás, la comunicación se ha vuelto uno de los bienes más apreciados y más buscados, convirtiéndose en una de nuestras principales necesidades. Lo cual afecta no sólo a la vida de los seres humanos a nivel de relaciones interpersonales, sino también a la manera de percibir y concebir los objetos en relación con el espacio y su capacidad de interacción, ya que este potencial de conexión es parte de su naturaleza, de su esencia y por lo tanto de su arquitectura.

Si para quien usa las cosas y habita los edificios esta conexión es un valor o un requisito que se busca, para quien los diseña tiene que ser parte del proyecto como el sistema que lo define: la arquitectura cada vez más necesita hacer uso de dicha capacidad de comunicación para trascender. El objeto en sí es sensible, capaz de recibir datos, elaborarlos, reaccionar, comunicar. Al comunicarse, ya no se puede considerar singular y aislado, sino como componente de algo más complejo que nace de dicha comunicación. En cuanto componente, ya no se puede pensar como fijo o cerrado, sino más bien como un sistema capaz de variar y adaptarse.

Al crecer las conexiones, crecen también las dependencias entre las partes. Gracias a herramientas digitales de cálculo, visualización, materialización y al manejo de elevadas cantidades de datos en tiempo real, se incrementa el dominio de los sistemas complejos generados por interrelaciones que, a pesar de existir desde siempre, sin dichas tecnologías ni siquiera se podrían concebir. Lo cual evidencia otro punto clave de nuestra época: la relevancia de la interdependencia entre entidades, también similares o diferentes, que se introduce en nuestra *forma mentis* a la hora de comprender lo existente y elaborar artefactos. El objeto arquitectónico y “lo demás” se cruzan estableciendo interacciones que afectan a todos los integrantes, que se adaptan el uno al otro en una forma de resiliencia recíproca y continua.

El diseñador, hoy más que en las décadas pasadas, es consciente de esta capacidad de conexión y empieza a introducirla en sus proyectos, o por lo menos en algunas partes de los mismos. Pero, ¿es realmente consciente de

todo su potencial? ¿Hasta qué punto lo está explorando y usando para sus proyectos e investigaciones?

Hoy, a diario, se desarrollan e implementan dispositivos que permiten conectar edificios con el entorno o con factores externos; no es una novedad encontrar sensores de presencia que provocan la abertura o el cierre de puertas o ventanas, detectores de sustancias que activan alarmas o que encienden luces, etc.; hoy las tecnologías cada vez más avanzadas permiten leer, medir, recibir datos, al fin de optimizar, mejorar y economizar tiempo, dinero, energía, acciones. Los edificios contienen cada vez más elementos de sensibilidad al contexto y comunicación; no obstante, están pensados casi siempre para cumplir determinadas funciones, manteniéndose en el campo de la utilitas.

Sin embargo la fabricación digital, acercando al diseñador al “hacer” gracias a las posibilidades de materialización avanzadas, más que convertirlo en un constructor, fomenta la ideación y realización de conformaciones antes inimaginables, que además de ser estructuras firmes que cumplen con funciones, generan interacciones totalmente nuevas con lo demás, que se parecen cada vez más a comportamientos y que se extienden a campos como las sensaciones, las emociones, los estados de ánimo, concebidos en general únicamente como propios de los seres vivos.

Asimismo la familiarización con dispositivos electrónicos de entrada y salida y su programación, más que convertir al arquitecto en un técnico informático o electrónico que sabe enchufar cosas, lo obliga a cuestionar la naturaleza de estas conexiones, que ya no pueden ser consideradas sólo bajo el punto de vista técnico, sino más bien como elementos de su arquitectura y parte integrante de su sistema. Lo cual abre un mundo de posibilidades en donde la comunicación es parte de la arquitectura en todas sus formas y la conformación del objeto contiene en sí la programación de su manera de relacionarse.

A la luz de estas consideraciones, nació la idea de estudiar un objeto arquitectónico sensible a “lo demás”, cuya relación con el contexto se pudiera plantear o como factor del mismo sistema que lo define, o como comunicación entre sistemas que hablan entre ellos, participando en sus procesos de morfogénesis y en el desarrollo de su morfología, siendo dicha relación parte integrante de su arquitectura. Al plantear el objeto arquitectónico de esta manera, las investigaciones sobre las posibilidades de relación entre el objeto arquitectónico con el contexto, empezaron a dirigirse más hacia el comportamiento de los seres vivos que al estudio de edificios ubicados en un entorno.

De aquí la investigación se consolidó en el estudio de un objeto arquitectónico cuya relación con “lo demás”, basada en las interacciones entre seres vivos, le permitiera manejar datos en tiempo real, siendo parte de su naturaleza.

Hoy en día existe un gran interés en el estudio de elementos sensibles, aplicados a la arquitectura y en especial a la tipología del pabellón, que reaccionan directamente al entorno mediante sensores, elementos robóticos, o con materiales *performativos*, y que manifiestan cambios de estado parecidos a comportamientos; basta con dar una mirada a las últimas investigaciones en desarrollo en escuelas o institutos como la Architectural Association School of Architecture (AA) de Londres, el Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH) de Zurich, el Southern California Institute of Architecture (SCI-arc) de Los Angeles, el Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IaaC) de Barcelona, el Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) de Stuttgart, el MediaLab del MIT en Boston, sólo por citar algunos, además de los FabLabs de todo el mundo; sin embargo la mayoría de tales estudios relacionan al objeto arquitectónico con datos de factores medioambientales a fin de cumplir con funciones puntuales.

Si en vez de eso buscamos arquitecturas sensibles a “lo demás”, capaces de generar comportamientos que trascienden hacia las emociones, estados

de ánimo, sentimientos o informaciones que vayan más allá de la mera función, los ejemplos son escasos o incompletos; entre los más cercanos, y sólo para citar algunos, se evidencian el edificio D-Tower de Nox, realizado en el 2004 que, usando bases de datos, lanzaba informaciones sobre estados de ánimo de las personas y datos similares traducidos en cambios de color, pero que más que un espacio habitable se presentaba como una instalación artística; o el más reciente Furl, un modelo de pabellón interactivo cinético ideado en el 2013 por los investigadores Bijing Zhang y François Mangion dentro del Interactive Architecture Lab, un programa de máster de la Bartlett School of Architecture de Londres, donde se planteaba un edificio que cambiara de forma respondiendo directamente a datos de ondas cerebrales, pero que nunca llegó a realizarse a escala real. Lo cual por un lado evidencia la actualidad del tema aquí tratado, pero por otro lado habla también de la necesidad de generar espacios habitables capaces de aquella trascendencia antes mencionada, que surge del potencial de comunicación, lo cual es lo que se pretende lograr con esta investigación.

El resultado de esta nueva fase es el Bicho VII, un pabellón diseñado y fabricado digitalmente, que recibe datos del entorno en tiempo real a través de sensores y reacciona con cambios de color y movimientos.

El estudio de la comunicación entre el objeto arquitectónico y el contexto está basada en interacciones entre seres vivos y se enfoca en especial en la mimesis y en la proxémica, estableciendo una relación entre el pabellón y los seres humanos que se acercan o lo habitan. A través de sensores de color y de proximidad se reciben datos que, gracias a Arduino, se conectan con la estructura física del pabellón, que incluye en su morfología piezas móviles y leds RGB; con la programación de varios códigos, se han podido simular manifestaciones de empatía, acuerdo o desacuerdo, miedo, confianza entre el pabellón y las personas.

En este documento se presentarán el proyecto y los resultados obtenidos hasta la fecha, evidenciando los puntos fuertes y débiles del trabajo.

## METODOLOGIA

La modalidad de realización de la presente investigación se basa en la metodología desarrollada para y durante el proyecto “Bichos”, de la cual representa, como mencionado anteriormente, una evolución que se encamina hacia convertirse en una nueva rama. Tal metodología consiste principalmente en un trabajo de *research by design*, que retroalimenta los fundamentos teóricos del *Fenómeno del Pensar y del Hacer Avanzados* con su aplicación, a través de un proyecto puntual vinculado a la docencia a lo largo de un semestre, dentro de un estudio de arquitectura (Frogheri y Estévez, 2016a).

Los fundamentos teóricos, en este caso, además de arraigarse en los conceptos del proyecto como sistema y en el estudio de procesos de generación de las formas entendidos como diseño y como materialización, se completan a través del enfoque hacia la relación entre las reglas de conformación interna de tales sistemas y factores externos.

El objetivo general de tal investigación es generar consciencia hacia el carácter relacional de los factores que componen un sistema y sobre como este carácter afecta a la definición de su naturaleza y a sus criterios de relación; sea que se conciba como un sistema formal no figurativo, sea que llegue a ser figurativo, para convertirse finalmente en una arquitectura.

Desde esto se evidencia la posibilidad y la necesidad de hacer que la relación con “lo demás” no se considere como una etapa posterior o ajena al objeto arquitectónico, sino que se desarrolle en conjunto con el mismo, siendo por lo tanto contenida e integrada en su naturaleza.

En concreto, prestándose tal objetivo por su carácter general a varias facetas e interpretaciones, se definieron unos objetivos más específicos:

primero el estudio de un objeto arquitectónico capaz de relacionarse con lo demás en tiempo real y de manera directa, donde tal relación fuese integrada en la naturaleza misma del objeto; segundo el estudio y la experimentación de tipos de relaciones entre tal objeto arquitectónico y “lo demás” que trascendieran la pura función, que se acercaran más a las interacciones entre seres vivos y a sus comportamientos.

### Definiciones y delimitaciones

El primer paso hacia el cumplimiento de tales objetivos fue un proceso de definición y delimitación de las entidades a relacionar, entendidas en cuanto objeto arquitectónico y su interlocutor; además de la elección del tipo de relaciones a establecer y las modalidades a través de las cuales expresarlas.

El objeto arquitectónico, por la pertenencia del proyecto a la línea de investigación “Bichos”, se definió como un pabellón, ideado dentro del concepto del proyecto como sistema, con estudios previos de *form finding* analógico (Fig. 1) en modalidad *bottom-up*, para después generarse en *top-down* a través algoritmos geométricos y sistemas digitales paramétrico-asociativos y generativos realizados en Rhinoceros, Grasshopper y Phyton (Fig. 2), materializándose finalmente con la fabricación digital. Su morfología nace desde criterios de organización entre una familia de componentes paramétricos que adaptándose los unos a los otros generan un sistema de cáscara auto-portante, que forma un espacio acogedor para sentarse y descansar.

Tal objeto se obtuvo con la retroalimentación entre el desarrollo de sistemas analógicos y digitales, prototipos a escala real, la exploración del potencial de la fabricación digital y del uso de dispositivos electrónicos.

La primera evolución con respecto a los pabellones precedentes de la

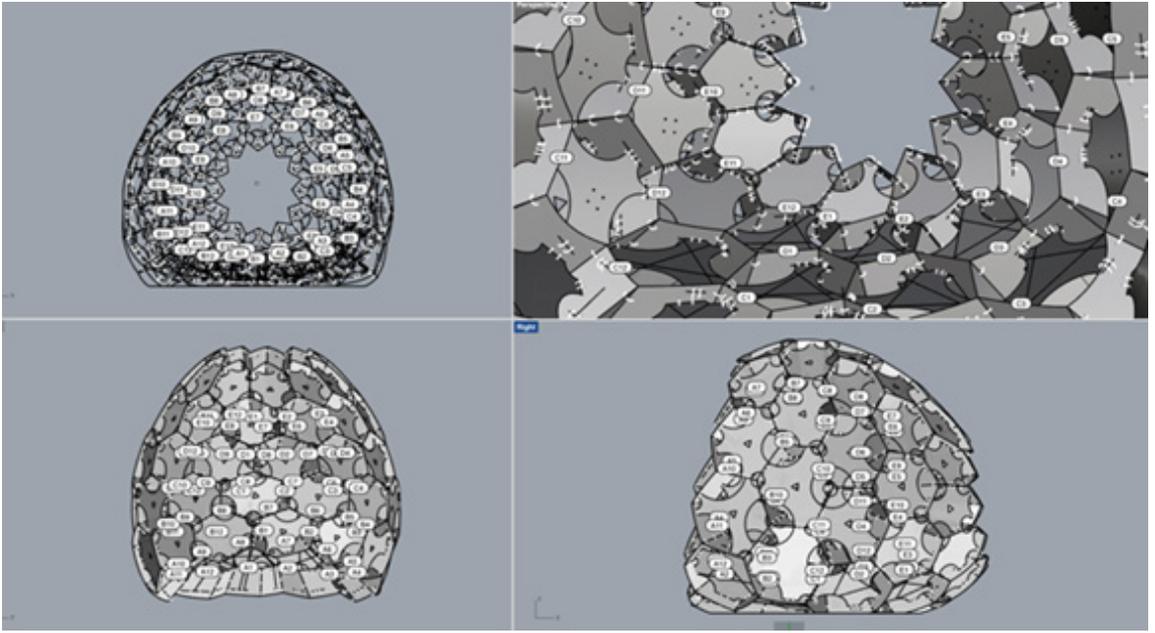


**Figura 1:** Bicho VII: estudios de form finding analógico.  
**Fuente:** Daniela Frogheri.

familia “Bichos” fue que, mientras en los proyectos previos las lógicas de generación de los componentes y de sus agregaciones fueron determinadas por criterios de organización internos, inspirados generalmente en sistemas naturales y enfocados a la estabilidad y al uso, en este caso, la morfología se pensó considerando también la relación con el exterior.

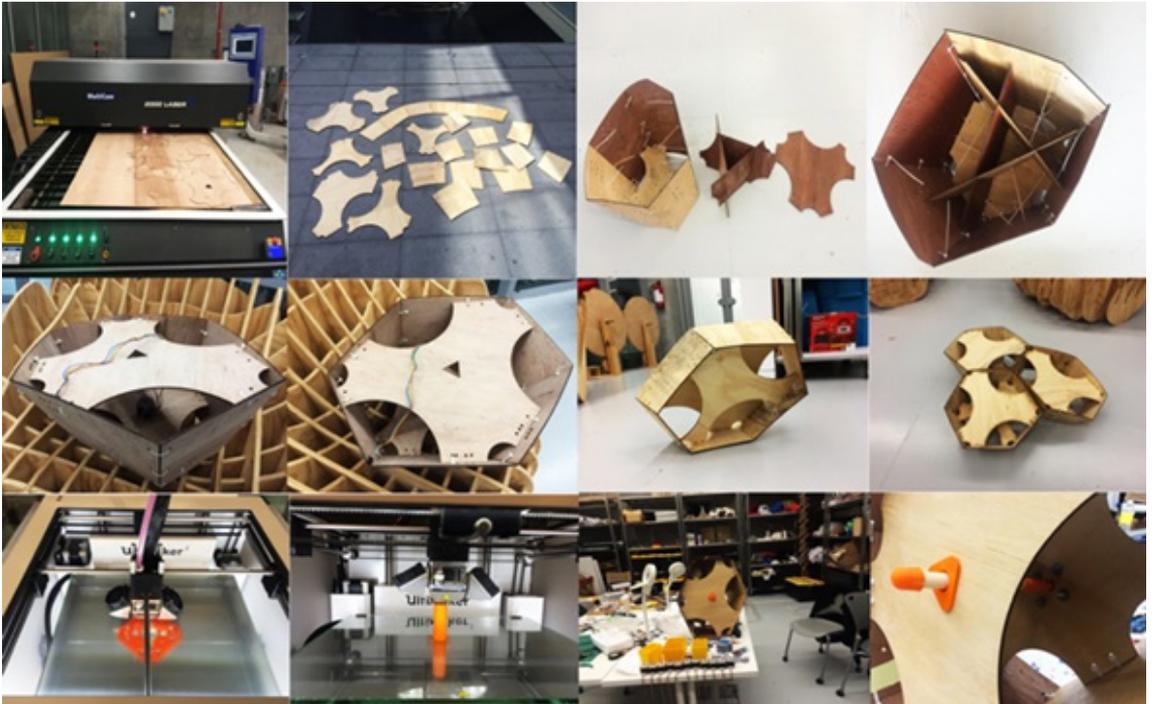
Así que en el Bicho VII, la forma de los componentes, su posición, su manera de agregarse y hasta su número, depende de lógicas de configuración internas y de dicha relación con el exterior. Lo cual hizo que los componentes, en relación a los de los pabellones antecedentes, tuvieran una mayor complejidad geométrico-formal, además de ampliar la gama de materiales utilizados y las técnicas de fabricación.

Las piezas, 60 en total, conforman una piel estructural de tipo *close packing*, incluyendo elementos de lycra, partes impresas en 3D, cables, sensores de color y de proximidad, Arduinos, motores y leds RGB (Fig. 3), que en conjunto forman un sistema.



**Figura 2:** Bicho VII: sistema digital generado con Grasshopper.

**Fuente:** Daniela Frogheri.



**Figura 3:** Bicho VII: materialización de componentes de fabricación digital y dispositivos electrónicos.

**Fuente:** Daniela Frogheri.

### Comunicación: sensibilidad y respuesta

Desde el inicio se pensó en hacer que la relación entre el pabellón y el contexto se basara en un esquema de tipo input/output, donde el objeto arquitectónico fuera capaz de recibir datos, elaborarlos y adaptarse o responder a los mismos con movimientos, luz y cambios de color. En esta parte el rol del equipo del FabLab Monterrey fue fundamental, sea para el planteamiento conceptual del proyecto como para el desarrollo de los códigos ideados para la programación de los comportamientos.

### El interlocutor y tipos de relaciones: trascendencia

La delimitación del contexto a relacionar con el pabellón y el tipo de comunicación a establecer no fue tan inmediata. Las primeras propuestas de los alumnos, aun conteniendo todos los puntos mencionados arriba, se dirigían hacia lo funcional como por ejemplo hacer que el pabellón cerrara o abriera unas partes según luz, agua o humedad. Sin embargo, la intención de trascender llevó a buscar algo más radical, por lo cual se decidió dirigir la sensibilidad del pabellón hacia las personas, intentando instaurar con ellas una nueva relación que fuera más allá del uso y de la función.

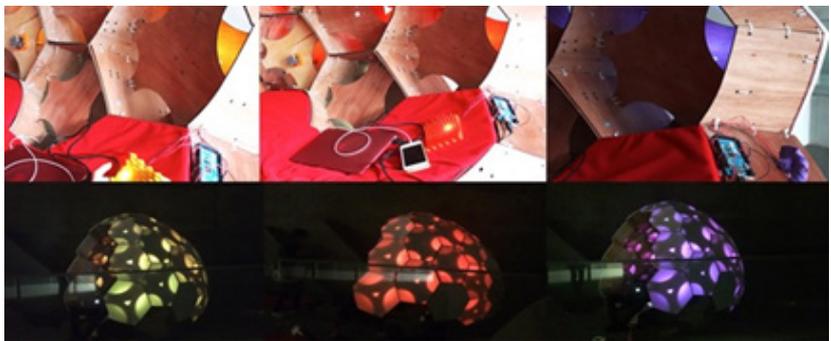
Fue bajo esta vertiente que se empezó a estudiar cómo hacer que el pabellón recibiera datos de acciones de las personas y cómo programar sus respuestas; lo cual llevó a considerar dichas respuestas como comportamientos, basados en las interacciones entre seres vivos.

Finalmente, dentro de una vasta gama de posibilidades, sea por algunas circunstancias espaciales debidas a la ubicación del pabellón, sea por la existencia de estudios previos realizados en el FabLab Monterrey sobre la aplicación de la sinestesia al diseño -véase la investigación Trans-Synaesthesia (Frogheri y Estévez, 2016b)- se desarrollaron dos comportamientos del pabellón, el primero basado en la proxémica y el segundo en la mimesis.

El primer comportamiento se realizó a través de un sensor de proximidad (de tipo PIR) y 13 motores de paso a paso; el pabellón reacciona al acercarse las personas a través de un cambio de forma basado en los estudios sobre la sinestesia y el “efecto Bouba/Kiki” (Ramachandran y Hubbard, 2001), y manifiesta sensaciones de miedo o tranquilidad, variando entre un estado puntiagudo y uno más redondeado de los componentes.

En el segundo caso, gracias a la instalación de un sensor de color (Adafruit TCS34725 RGB) y leds RGB en tiras, se ilumina imitando el color de las prendas de las personas que lo habitan o de objetos que se le acercan, mostrando sintonía y empatía (Fig.4).

En ambos casos, se usó Arduino como dispositivo físico y como plataforma de lenguaje para los códigos con los cuales se programaron las interacciones o “comportamientos”.



**Figura 4:** Bicho VII: comportamiento mimético (sensor de color y leds RGB).

**Fuente:** Daniela Frogheri.

## RESULTADOS

### Sistema y cuerpo

Así como los pabellones que lo preceden, el “BichoVII” (Fig. 5), se conforma como un exoesqueleto constituido por una piel estructural auto-portante, en este caso compuesta por 60 elementos, generados de manera algorítmica según el criterio de organización del *close packing*, que se sostienen entre ellos y sostienen a quien lo habita. Los componentes conforman una cáscara ovoidal, con dos aberturas que forman espacio para sentarse y acostarse, quedando abierto pero a la vez protegido del exterior. La geometría de los elementos, generada con Grasshopper, se estudió con superficies planas desarrollables, lo cual permitió la fabricación digital a través del corte láser. La estabilidad del sistema, aprendiendo de los pabellones precedentes, se logró casi totalmente gracias a la morfología de los componentes y de sus uniones, con lo cual se optimizaron tiempos y costos usando materiales muy delgados, en este caso *plywood* de madera caobilla de 4,5 mm de grosor (Fig.6).



**Figura 5:** El pabellón BichoVII ubicado en el CRGS de la Universidad de Monterrey.

**Fuente:** Daniela Frogheri.

Los componentes hexagonales, constituyen una familia con tres variantes: la primera, usada para los elementos laterales, consiste en seis piezas de madera que forman el hexágono externo y dos elementos internos, siempre de madera, que fortalecen la conexión; las uniones entre las partes de estas piezas se obtienen a través de encajes y *plastic straps*; la segunda variante es similar a la primera, pero con otros tres elementos cruzados con encajes, siempre de madera, que forman un triángulo y fortalecen aún más la estructura; este tipo de piezas se utilizaron para la base que es el espacio para sentarse; la tercera variante es la más compleja ya que comprende un motor y un pistón, soportados y completados por unas piezas diseñadas a medida e impresas en 3D, una piel de lycra que recubre la parte superior del hexágono, y una tira de cinco leds RGB; estas últimas piezas son la mayoría, y forman la parte ovoidal de la cáscara.

Todos los elementos tienen un espacio para los cables que conectan los sensores y los Arduinos a los motores y a los leds RGB; las piezas se unen entre ellos de manera muy sencilla, con *plastic straps* y tornillos, lo cual garantizó la rápida construcción y el armado (Fig. 7, Fig. 8 y Fig. 9).

Los componentes, así como las hojas de un árbol o las células de cualquier tejido, o cualquier conformación compuesta presente en la naturaleza, constituyen una familia de elementos similares pero no idénticos entre ellos; todos tienen en común la misma regla de generación, diferenciándose según la posición o el rol que cumplen como parte de la misma estructura. Por lo cual, los elementos de la base son más espesos, resistentes y redondeados

para poder generar el asiento, mientras los laterales y superiores se aligeran y rigidizan de manera gradual, para cerrar la forma de manera continua y proporcionar estabilidad.

El resultado es una proliferación que trabaja en conjunto gracias a la relación entre forma, material y posición que, en cuanto sistema, cumple con las exigencias espaciales del proyecto entendido como objeto arquitectónico.

Gracias a su forma envolvente, el “Bicho VII” es un espacio pensado para la lectura y momentos de relajación; las dimensiones, aptas para la colocación en espacios tanto internos como exteriores, permiten acoger dos o tres personas, o ser utilizado cómodamente de manera individual.



**Figura 6:** Bicho VII: el sistema (materia, organización y motores).

**Fuente:** Daniela Frogheri.



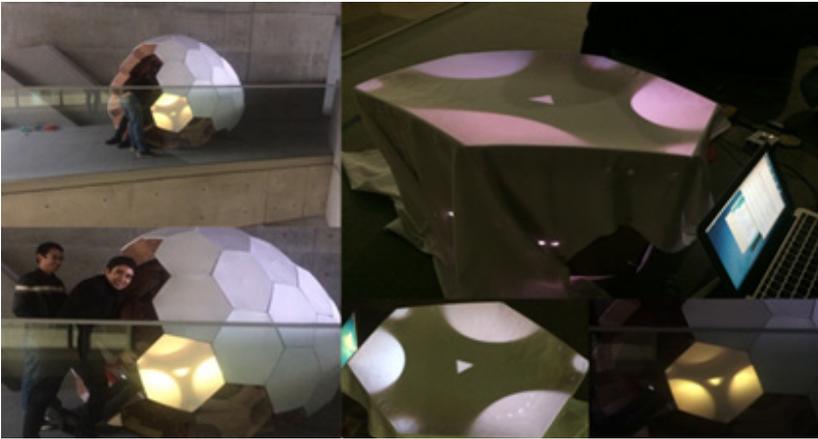
**Figura 7:** Bicho VII: fabricación y armado.

**Fuente:** Daniela Frogheri.



**Figura 8:** Bicho VII: instalación de los dispositivos electrónicos (el movimiento).

**Fuente:** Daniela Frogheri.



**Figura 9:** Bicho VII: instalación de los dispositivos electrónicos (el color).

**Fuente:** Daniela Frogheri.

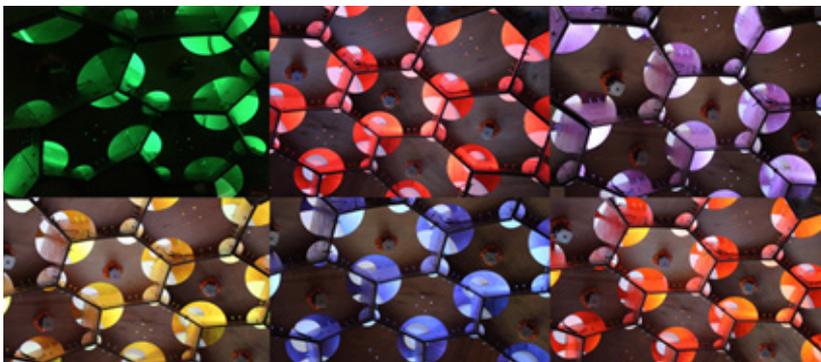
### Sistema, comportamiento y forma

El reto principal del trabajo fue desarrollar un objeto arquitectónico que por un lado perteneciera a la familia de los pabellones “Bichos”, manteniéndose dentro de las líneas básicas de la investigación, y que por otro evolucionara con respecto a sus predecesores, introduciendo el tema de la relación con el contexto como parte del sistema mismo, y por lo tanto como elemento de su arquitectura.

Para lograr dicho objetivo, la conformación general y los componentes fueron pensados en base a los siguientes requisitos: 1. Cumplir con las funciones del pabellón como objeto arquitectónico en cuanto tal y a su función de espacio para estar y descansar, que por lo tanto tenía que sostenerse, aguantar el peso de dos o tres personas, ser cómodo, acogedor y generar privacidad; 2. Relacionarse con objetos y personas, iluminándose y cambiando de color, simulando empatía y acuerdo; 3. Relacionarse con las personas que se acercan, recibiendo los datos de dicha cercanía y reaccionando con cambios de forma que simularan estados de ánimo tales como miedo y tranquilidad. La estabilidad y el confort se lograron fácilmente a través de la geometría de base de los componentes, la firmeza de las uniones, la conformación general de ovoide alargado en la base y el tipo de porosidad de las piezas. A su vez, para manifestar los comportamientos, fue necesario programarlos en cuanto tales y estudiar como relacionarlos con la forma.

Para expresar el cambio de color (Fig.10), todas las piezas tenían que contener elementos capaces de iluminarse, conectados con el sensor, con un Arduino y, por supuesto, entre ellos; este sistema, aparentemente sencillo, se mostró más complicado de lo previsto debido a la gran cantidad de componentes a iluminar, o sea, todas las piezas del pabellón menos las de la base, y las largas distancias entre los elementos; además cada led, por ser RGB y por tenerse que conectar con los datos del sensor y con la electricidad, requería cinco cables diferentes, lo cual generó una gran cantidad de conexiones que necesitaban un espacio adecuado donde poderse colocar.

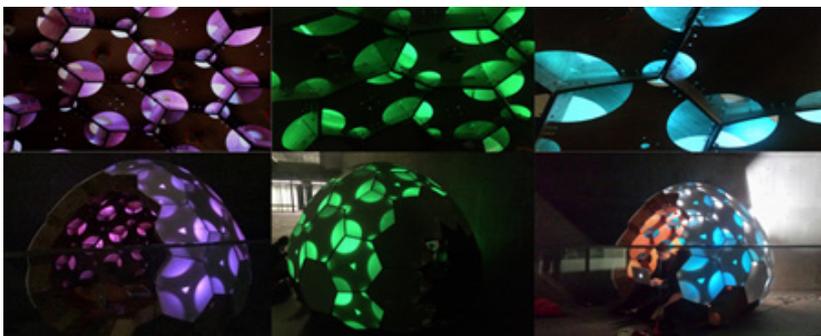
Otro tema fue la programación del sensor de color, ya que estando el pabellón en un espacio semi-abierto, para poder lograr el efecto mimético, se tuvieron que calibrar los parámetros de cada color varias veces antes de lograr el efecto mimético buscado. La luz llega a las piezas de manera indirecta y se percibe tanto dentro del pabellón como fuera, gracias a la lycra que recubre los componentes en la parte exterior y a la conformación de las piezas internas de los mismos.



**Figura 10:** Bicho VII: comportamientos, mimetismo.

**Fuente:** Daniela Frogheri.

Cabe decir que en este caso la conexión entre el comportamiento y la morfología no está estrictamente limitado al mimetismo, sino más bien a la posibilidad de iluminar las piezas y hacer que cambien de color; lo cual permite la posibilidad de programar otros comportamientos, adaptándose a otras situaciones o circunstancias, enviando mensajes que se pueden expresar a través de la luz, con sólo cambiar el código, evidenciando aún más el gran potencial de comunicación del sistema (Fig.11).

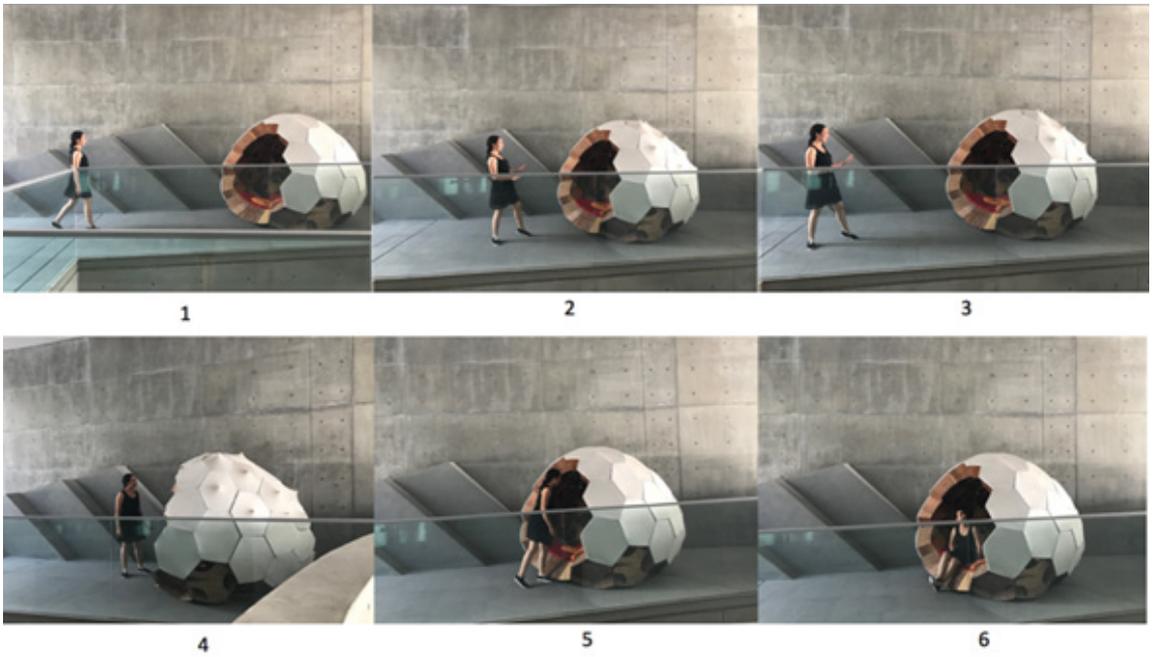


**Figura 11:** Bicho VII: comportamientos, mimetismo.

**Fuente:** Daniela Frogheri.

En cuanto al comportamiento vinculado al acercarse de las personas (Fig. 12 y Fig. 13), se pensó en la sinestesia y en las reacciones de ciertos animales (Hall, 1971), cuya piel puede pasar de una condición lisa o redondeada a un estado puntiagudo; se pensó por lo tanto en generar estas dos condiciones en los componentes del pabellón, que en estado neutro o normal se muestran como lisos y generan en conjunto una forma redondeada, que simula un estado de tranquilidad, mientras que al acercarse las personas, detectadas con un sensor de proximidad, activan los motores colocados en algunos de los componentes, y generan el desplazamiento de los pistones, formando una punta en cada uno de ellos; dando al pabellón un aspecto de “asustado”, o “defensivo”, o “sorprendido”, al acercarse las personas, simulando una primera reacción, para después volver al estado “relajado” cuando la persona se acerca más para sentarse.

El diseño y la programación de esta parte fueron a la vez muy interesantes y complejos, empezando desde el diseño del movimiento en sí y de los componentes físicos para lograrlos, pasando por la calibración de los sensores, hasta la complejidad de las relaciones entre los motores, su cableado y la distribución de la energía; lo cual hizo que esta parte del sistema funcionara de la manera deseada sólo en algunas partes del pabellón, encontrándose todavía en fase de ajuste.



**Figura 12:** Bicho VII: comportamientos, proximidad.

**Fuente:** Daniela Frogheri.

Sin embargo, no obstante los inconvenientes mencionados, el sistema en general funciona muy bien y el pabellón, sensible a los colores y a las personas, manifiesta sus comportamientos a través de su misma forma, siendo estos mismos parte de su naturaleza, como fue planteado desde el inicio. Lo cual se considera un gran éxito, determinando un primer paso hacia aquella trascendencia de la relación entre el objeto arquitectónico y “lo demás” dictada por las actuales posibilidades de comunicación, buscada desde el inicio de la investigación.



**Figura 13:** Bicho VII: comportamientos, proximidad.

**Fuente:** Daniela Frogheri.

## CONCLUSIONES

Uno de los puntos fundamentales de este trabajo fue lograr establecer una relación entre el objeto arquitectónico y “lo demás” trascendiendo desde el concepto de edificio tradicional hacia los comportamientos de los seres vivos, pero a la vez sin dejar de ser espacio habitable y por lo tanto de funcionar también como tal (Costa, 2009). Dicha consideración es muy importante ya que en general las investigaciones sobre objetos que se “comportan”, según lo antes mencionado, o son meramente la satisfacción de funciones, o se realizan como instalaciones artísticas, o se concretan como objetos que reciben y actúan, pero que en general dejan de ser espacios habitables. Sin embargo, en un mundo donde todo se conecta o tiene el potencial de hacerlo, y donde las cosas se definen por su capacidad de relación y de interactuar con “lo demás”, los espacios necesitan también ser pensados como sistemas cuyas conformaciones contienen en sí dicha capacidad de comunicación.

Los comportamientos elegidos para este estudio, aunque seleccionados con toda la intención de generar cierto tipo de relación entre el pabellón y las personas, al fin de enviar determinados mensajes, en realidad se pueden considerar también como un primer pretexto para evidenciar el poder de la comunicación y abrir las puertas hacia el estudio de otras posibilidades de relación; lo cual es uno de los objetivos futuros de la línea de investigación “Bichos”.

El trabajo presenta algunos puntos débiles, entre los cuales figurarían la necesidad de encontrar una manera más sencilla y elegante de mover las piezas que producen variaciones de forma; así como las conexiones entre los datos de entrada y las acciones consecuentes, de momento realizadas con una elevada cantidad de cables, que se podrían estudiar de otra manera; aun así, se logró plantear la relación con el contexto como un elemento de diseño que participa en la morfología, lo cual da una nueva dimensión al concepto de proceso de generación de la forma fortaleciendo la idea del proyecto como sistema y la voluntad de trascender.

Otro tema que se evidenció, y que determinó realmente un gran aprendizaje para los estudiantes, fue la comprensión de las posibilidades de extensión del campo de acción del arquitecto y del diseñador en general: además de tener su primer acercamiento con el mundo del diseño computacional y de la fabricación digital, los alumnos, al relacionarse de manera directa con el equipo del FabLab Monterrey, pudieron entrar en contacto con otra capa del *Hacer Avanzado*, que comprende el desarrollo de códigos, el uso de dispositivos electrónicos, la capacidad de leer y devolver datos y acciones en tiempo real; lo cual les proporcionó todo un mundo de posibilidades para sus futuros proyectos.

Así como mencionado en varias ocasiones en este escrito, el trabajo aquí presente surge desde una investigación más amplia, donde esta etapa, además de ser una evolución, se puede considerar como un nuevo recorrido que mira hacia el estudio de las posibles relaciones entre arquitectura y contexto que llevan los avances de la tecnología y el potencial de su difusión masiva hacia el mundo de los espacios habitables. Por lo cual la investigación no se cierra con este pabellón, sino más bien es material para nuevos avances, donde se ven claramente dos ramas que se podrían desarrollar tanto por separado como juntas.

La primera, dirigida hacia el estudio de objetos sensibles, donde el interés está no sólo en la definición de la lógica de las formas, es decir en el “cómo son” y en el “cómo se hacen”, sino también en “lo que hacen” y en “cómo se comportan”. La segunda, siempre basada en el comportamiento, subraya la necesidad cada vez más relevante de relacionarse con los seres vivos a la hora de desarrollar arquitecturas a cualquier escala. La capacidad de los sistemas de variar en base a las relaciones entre elementos internos y factores externos, ya sea tanto en su forma digital como en su forma material, nos lleva a los conceptos de adaptación propia de la vida (Wagensberg, 1999),

de autopoiesis (Maturana y Varela, 1973), de homeostasis (Gere, 2002), y de resiliencia, todo propio de los seres vivos y de los sistemas que los componen. Así, las cosas vistas de tal manera se parecen mucho más a seres vivos que a pedazos de materiales inertes.

El control y la programación de la relación de tales objetos con otros sistemas, junto con la universalidad del lenguaje digital, permiten varias formas y maneras, en algunos casos simbólicas y superficiales y en otros realmente muy profundas, de comunicación e interacción directa con los seres vivos que también entran a formar parte del sistema, generando otras formas de pensar y de hacer. Quizá las más avanzadas entre todas, que ya se aplican en varios campos, como la bioingeniería y la medicina por citar sólo los ejemplos más relevantes, y que ya se están acercando cada vez más al mundo de la arquitectura y del diseño, hasta hacerse realidad. Hasta ahora en el proyecto Bichos la introducción de la vida ha sido experimentada a través de la comprensión de criterios de organización, procesos de generación de las formas y la simulación de comportamientos de seres vivos en relación entre ellos. El paso siguiente es la integración de tales elementos vivos como parte activa de los sistemas, que se convierte en el reto principal de las investigaciones futuras.

## AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al equipo del FabLab Monterrey, a los alumnos del estudio de Elementos de la Arquitectura de la generación de otoño 2016, y a Guillermo I. López Domínguez, por sus preciosos consejos para la explicación del trabajo.

## REFERENCIAS

- Costa, M. (2009). *Psicología ambiental e architettonica*. Milán: copyright 2009 by Franco Angeli s.r.l., Milán, Italia.
- De Kerckhove, D. (1999). *Inteligencias en conexión: hacia una sociedad de la web*. Barcelona: Editorial Gedisa. (Obra original publicada en 1997).
- Froggeri, D. (2018). *Entre el pensar y el hacer avanzados* (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Internacional de Catalunya.
- Froggeri, D.; Estévez, A. T. (2016a). "Entre el pensar y el hacer avanzados". En AA.VV., XX Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, Blucher Design Proceedings, v. 3, n. 1. São Paulo: Blucher, pp. 219-226.
- Froggeri, D.; Estévez, A. T. (2016b). "Transynaesthesia: Mapping, visualizing and materializing human synaesthesia to think and make multisensorial things". En AA.VV., XX Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, Blucher Design Proceedings, v. 3, n. 1. São Paulo: Blucher, pp. 824-830.
- Gere, C. (2002). *Digital Culture*. Londres: Reaktion Books Ltd.
- Gershenfeld, N. (1999). *When Things Start to Think*. Nueva York: Henry Holt and Company Inc.
- Hall, E. (1971). *La dimension cachée*. París: Éditions du seuil.
- Maturana, H.; Varela, F. (1973). *De Máquinas y Seres Vivos*. Santiago de Chile: Universitaria Santiago de Chile.
- Ramachandran, V. S.; Hubbard, E. M. (2001b). "Synaesthesia: a window into perception, thought and language". *J. Consciousness Stud.*, 8, pp. 3-34.
- Wagensberg, J. (1999). "Complejidad e Incertidumbre". *Mundo Científico*, 201, Mayo 1999.

**Daniela Froggeri**  
daniela.froggeri@udem.edu

**Fernando Meneses-Carlos**  
fernandomeneses@nodolab.com

**Alberto T. Estévez**  
estevez@uic.es

# PAVILHÃO FAB!t: PROPOSTA PORTÁTIL PARA INSERÇÃO DA CULTURA MAKER NO ENSINO TRADICIONAL

ARTIGO

**FAB!t Pavilion: a portable proposal to include the maker culture in traditional education**

**Giordana Dileta Pacini<sup>1</sup>, Andrés Martín Passaro<sup>1</sup>, Gonçalo Castro Henriques<sup>1</sup>**

**RESUMO:** O Pavilhão FAB!t é um pavilhão portátil que pretende promover a inclusão da cultura maker na educação tradicional, introduzindo o conceito de indústria 4.0 nos programas da escola elementar, justificados pela mudança dos sistemas produtivos, especialmente relativamente à manufatura e à nova relação produto-consumidor. Neste contexto, dissemina através da cultura maker os avanços tecnológicos e democratiza o seu acesso na educação tradicional. Esta pesquisa contribui para atualizar o ensino de tecnologia nas escolas, introduzindo fundamentos da cultura maker, de maneira rápida, barata e igualitária. Como metodologia analisamos vários laboratórios existentes, designados como Fab Labs, identificando as atividades e ferramentas utilizadas em seus espaços. Com base neste estudo, desenvolvemos um sistema modular que permite criar espaços personalizados adaptáveis aos requisitos funcionais dos equipamentos e às atividades com eles associadas. Propomos uma plataforma de construção montável e desmontável com base num sistema que permita a expansão e retração da estrutura, que assim se adapta aos futuros desejos e necessidades da comunidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cultura Maker; Fabricação Digital; Desenho Paramétrico; Arquitetura Temporária; Educação Maker.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro - PROURB - FAU - UFRJ

**ABSTRACT:** Fab!t Pavilion is a portable pavilion to foster the inclusion of the maker culture in traditional education, introducing in the elementary school's programs the concept of industry 4.0, approaching the shift in the productive systems, especially regarding the manufacture and its implication on the new relationship consumer-product. In this scenario, the so-called maker culture intends to disseminate these technological advances and democratizing its access in traditional education. This work intends to update the teaching of technology in schools by introducing the fundamentals of the maker culture, it in a fast, cheap and egalitarian way. As methodology, we studied and analysed several existing laboratories known as Fab Labs to identify their activities and the tools used in their spaces. Based on the study we developed a modular system to enable customized spaces that comply with the equipment's functional requirement and related activities. For that, we propose a mountable and demountable construction platform and a system to enable the expansion and retraction of the structure, to adapt for future reuse of the community.

**KEYWORDS:** Maker culture; Digital fabrication; Parametric design; Temporary architecture; Maker education.

## How to cite this article:

PACINI, G. D.; PASSARO, A. M.; HENRIQUES, G. C. Pavilhão FAB!t: proposta portátil para inserção da cultura maker no ensino tradicional. **Gestão e Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v.14, n.1, p.76-89, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148143>

## Fonte de financiamento:

Declaro não haver

## Conflito de interesse:

Declaro não haver

**Submetido em:** 13/07/2018

**Aceito em:** 21/02/2019



## PROBLEMÁTICA E OBJETIVOS

No século XXI, com a introdução do conceito de “indústria 4.0”, o consumidor deixa de ser um ator passivo na produção de objetos e passa a ser um participante ativo no processo de design e da personalização em massa (*mass customization*), até a fabricação digital (GERSHENFELD, 2005). A indústria 4.0 propõe uma automação intensiva da produção, introduzindo maior customização e flexibilizando as tecnologias produtivas. Essas alterações estão relacionadas com o desenvolvimento tecnológico recente, nomeadamente com os avanços da inteligência artificial, sistemas ciberfísicos, internet das coisas, comunicação máquina-a-máquina, *big data* e nuvem de dados (DIEZ, 2012).

Paralelamente, a cultura maker – uma extensão da cultura do Do-It-Yourself (DIY ou “faça você mesmo”) surgidas nos Estados Unidos nos anos 1960 – tem superado barreiras financeiras e institucionais na democratização das novas tecnologias. Essa cultura está intimamente conectada com a cultura hacker, embora tenham diferentes focos; enquanto a cultura hacker se centra na manipulação de softwares, a cultura maker parte da manipulação de materiais, sistemas e máquinas. A cultura maker também está interessada em hardware open-source, ou código aberto, que permitem a apropriação e modificação de uma técnica ou maquinário buscando sua disseminação e aperfeiçoamento. Uma ideologia que preza pelo fazer, pela experimentação e pela tentativa e erro.

Neil Gershenfeld procurou um ambiente educacional onde as potencialidades dessa indústria e dessa cultura pudessem ser testadas e exploradas, fundando em 2001 o primeiro Laboratório de Fabricação Digital, ou Fab Lab, no Center for Bits and Atoms (CBA), no Massachusetts Institute of Technology (MIT). Em 2016, o programa já contava com 680 laboratórios em 67 países. Segundo a Fab Foundation – organização ligada ao CBA que regulamenta e administra esta rede mundial de laboratórios – “um fab lab é uma plataforma técnica de prototipagem para a inovação e a invenção, estimulando o empreendedorismo local. Um fab lab é também uma plataforma de aprendizagem: um lugar para jogar, criar, aprender, orientar, inventar” (What is a Fab Lab, FAB FOUNDATION, 2016). Originários da cultura maker, os makerspaces surgem concomitantes aos fab labs, com ideais semelhantes, mas sem estarem limitados à fabricação digital e não estando vinculados ao MIT.

Na cidade do Rio de Janeiro, segundo levantamento próprio feito em 2016, existem oito makerspaces ou fab labs em atividade. Aplicando aos dados recolhidos a categorização proposta por Eychenne e Neves (2013), do total levantado, cinco possuem caráter acadêmico (servem exclusivamente a escolas ou universidades) e três possuem caráter profissional (o acesso às atividades é pago). Não existe nenhuma instituição com caráter social, onde o laboratório seja de acesso público à comunidade em geral – a exemplo do programa que acontece em São Paulo desde 2014 nas 12 unidades do Fab Lab Livre SP (ITS BRASIL, 2016), por exemplo.

Mesmo nesse contexto, as instituições de educação em geral não têm conseguido acompanhar as inovações tecnológicas. Foram analisadas escolas de diferentes realidades, a partir dos aspectos físicos e pedagógicos das instituições. De acordo com o Censo Escolar de Educação Básica de 2016 realizado pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (INEP), das escolas que oferecem os anos finais do ensino fundamental, 67,8% possuem laboratório de informática, enquanto somente 25,2% possuem laboratório de ciências (INEP, 2017). Segundo Blikstein (2013), em geral, as escolas demonstram o valor que dão a determinadas atividades através da construção de um espaço específico para que elas ocorram, como um ginásio para esportes ou um salão de música com instrumentos musicais. Esse tipo de espaço específico permite não só que as atividades relacionadas sejam desenvolvidas, mas também cria uma subcultura sobre esses assuntos no ambiente escolar. No entanto, sob a ótica do espaço físico, sabe-se que é financeiramente oneroso às escolas adquirir equipamentos voltados ao

ensino de ciência e tecnologia e, que uma vez adquiridos, não há manutenção e atualização dos mesmos. Desse modo, trabalhar um laboratório seguindo a lógica móvel e itinerante se adapta às necessidades atuais das instituições de ensino, promovendo uma solução temporária dos problemas espaciais relacionados com a prática e o ensino de ciência e tecnologia.

Pedagogicamente, a dificuldade das escolas em introduzir tecnologia em seus programas deve-se também à abordagem de ensino. Segundo Rezende (2000), no enfoque tradicional, amplamente adotado, o aluno é um receptor passivo e as disciplinas são particionadas e independentes. Em contrapartida, na abordagem construtivista (REZENDE, 2000) a aprendizagem é entendida como um processo de construção e o aluno possui controle sobre ela; o ambiente é interdisciplinar e as habilidades e conhecimentos são desenvolvidos nos contextos nos quais serão aplicados.

Dentre muitos pedagogos e inovadores conhecidos como Maria Montessori (1870-1952), Jean Piaget (1896-1980) e Paulo Freire (1921-1997), é de destacar Seymour Papert (1938-2016) que foi um matemático e educador pioneiro em unir tecnologias digitais e educação. Trabalhou diretamente com Piaget, baseando-se no construtivismo para elaborar o seu construcionismo, em que afirma que o desenvolvimento do conhecimento é melhor quando os alunos fazem com suas próprias mãos e compartilham publicamente os objetos criados (BLIKSTEIN, 2013).

Esses estudos foram postos em prática desde os anos 1990, através de ferramentas desenvolvidas especialmente para o ensino de tecnologia para crianças, como a linguagem LO-GO (1999), idealizada por Papert, os kits Lego Mindstorms, de 1998, e a plataforma Scratch, desenvolvida pelo MIT Media Lab em 2007. Baseada nessas experiências e no extenso material acadêmico disponível, conclui-se que estas perspectivas pedagógicas se mostram adequadas ao ensino através da cultura maker, já que prezam e estimulam a curiosidade e a imaginação através do fazer, propondo um ambiente “incompleto o bastante para que [a criança] se aproprie e transforme esse espaço através de sua própria ação” (BUITONI, 2009).

Esta pesquisa adotou a ideia “fab lab is the new lanhouse” – por analogia ao aparecimento das lanhouses nos anos 1990, espaços que ampliaram o acesso ao computador e à Internet e perduram até hoje, especialmente em comunidades de baixa renda – e investigou formas de introduzir a cultura maker como atividade educativa. Procuraram-se estratégias que fossem rápidas, baratas, igualitárias e adaptáveis para possibilitar a inserção da tecnologia no ensino básico, a fim de democratizar seu acesso e disseminar seu uso.

## **METODOLOGIA DE PESQUISA**

Definida como linha pedagógica do projeto o construtivismo e construcionismo, fizemos o levantamento de iniciativas existentes com abordagens similares, buscando projetos de fab labs e makerspaces voltados à educação infanto-juvenil e à integração da fabricação digital em escolas. Focou-se nas iniciativas que também partem da ideia de um laboratório móvel e/ou compacto, para assim compreender programas, áreas, máquinas e atividades compatíveis com a proposta. Nessa pesquisa foram levados em conta o levantamento da rede de Fab Labs da própria Fab Foundation (Labs Map, FAB FOUNDATION, 2016), o catálogo Homo Faber (SPERLING, 2015) e o mapeamento colaborativo The Maker Map (THE MAKER MAP, 2016), que, por sua vez, levaram a outros exemplos de relevância. A escolha dos exemplos, identificados na Tabela 1, deu-se pelos seguintes critérios: diversidade de localização, mobilidade da proposta, perfil de usuário buscado e variedade de atividades realizadas.

Nome	Aconcagua FabLab	MIT Mobile FabLab	Pronto 3D	Mobile Hackerspace	Pop-Up FabLab
<b>Localização</b>	Chile	Estados Unidos	Brasil	Canadá	Espanha
<b>Espaços</b>	Espaço para maquinário	Espaço para maquinário	Espaço para maquinário e trabalho	Espaço para maquinário e trabalho	Espaço para maquinário
<b>Mobilidade</b>	Caminhonete	1 contêiner grande	Kombi	Trailer	Caixas desmontáveis
<b>Usuários</b>	Comunidade e escolas	Comunidade	Comunidade	Escolas, bibliotecas, comunidade e eventos	Feirantes e comunidades
<b>Corte a laser</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<b>Corte de vinil</b>	Não	Sim	Não	Não	Sim
<b>Fresa grande</b>	Não	Sim	Não	Sim	Não
<b>Fresa pequena</b>	Sim	Sim	Não	Não	Não
<b>Eletrônica</b>	Não	Sim	Não	Sim	Não
<b>Impressão 3D</b>	Sim	Não	Não	Não	Sim
<b>Vacuum former</b>	Não	Não	Sim	Não	Não
<b>Scanner 3D</b>	Sim	Não	Não	Não	Não

**Tabela 1:** Estudos de caso: Fab Labs Móveis e Itinerantes

**Fonte:** Autores.

Os dados resultantes (Tabela 1) foram cruzados com o modelo ideal proposto pela Fab Foundation (Tabela 2). Comparando o modelo ao que de fato foi implementado nos casos estudados, percebeu-se que, para atender às demandas espaciais e funcionais de um dispositivo móvel, o programa deveria ser reduzido afim de ocupar um espaço pré-definido, de tamanho fixo e viável. Pelo mesmo processo, constatou-se que não há necessidade de utilizar todos os equipamentos em todas as atividades a desenvolver no laboratório, já que os exemplos estudados adaptam a escolha de seu maquinário às atividades propostas. Assim, criou-se um sistema de programa adaptável a espaços e demandas pedagógicas diversos, dividindo o programa em módulos de atividades que se combinam para atender a diferentes propósitos.

A definição desses módulos passou pela listagem tanto das atividades quanto do maquinário ideal para um ambiente itinerante. Quanto ao maquinário foram escolhidos equipamentos de pequeno porte e que

dispensam uma grande infraestrutura de operação. A relação entre custo e uso do equipamento também foi considerada, o que excluiu o scanner 3D e a máquina de silkscreen, por exemplo.

<b>Espaço</b>	<b>Dimensões (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>
<b>Cortadora a Laser</b>	6x8	48
<b>Aulas e conferências</b>	6x6	36
<b>Modelagem e fundição / Silkscreen</b>	5,2x2,5	13
<b>Área central de trabalho e depósito para projetos</b>	5x6	30
<b>Eletrônica</b>	5,2x4,3	22,36
<b>Fresadora CNC</b>	6x4,5	27
<b>Impressora 3D</b>	3,5x5	17,5
<b>Administração, estoque de material e área de exibição</b>	18x2	36
<b>Total</b>	18x20	360

**Tabela 2:** Programa ideal sugerido pelo site da Fab Foundation

**Fonte:** How to Start a Fab Lab, FAB FOUNDATION, 2016.

Quanto ao programa de atividades, foram consideradas as definições do MIT para seus fab labs. Manteve-se assim a divisão proposta na Tabela 2 entre áreas de fabricação com maquinário específico e áreas de trabalho coletivo e aulas. Áreas de estoque, depósito e administração foram suprimidas ou incorporadas às áreas de fabricação, por se entender que o projeto desfrutaria de uma base de trabalho externa às escolas onde essas atividades poderiam se concentrar. Mantiveram-se todas as demais áreas propostas: corte a laser, modelagem e fundição (transformada em área de moldagem), eletrônica (a qual foi incorporada robótica), fresadora CNC (dividida em grande e pequena) e impressora 3D. Baseado na proposta de makerspace, foram adicionadas áreas para ferramentas (manuais e de metal-marcenaria), tecidos (para trabalho com corte e costura) e biohacking (para atividades simples de laboratório).

Baseando-se em guias online de maquinário indicados para atender a essas atividades elaborados pela Fab Foundation (2016) e Makerspaces. com (MAKERSPACES, 2016), foram escolhidas as seguintes máquinas, com indicativos de referências comerciais de modelos existentes: impressora 3D (Makerbot Replicator Mini), cortadora a laser de bancada (Universal System VLS 3.50), fresadora pequena (milling CNC) (G-Weike WK 3030), fresadora grande de bancada (router CNC) (ShopBot Desktop Max), cortadora de vinil (Roland Stika SV-13), máquina de costura (Singer Stylist 7258) e vacuum former (Formech 300XQ).

Outra questão observada no estudo de caso foi o amplo uso de caminhões-contêiner e veículos de transporte, seguindo a lógica do trailer e do motorhome. As propostas são funcionais quando considerado o caráter de evento. No entanto, falham na integração com a arquitetura, na adaptabilidade ao espaço e na possibilidade de manipulação do ambiente pelos alunos, além de não deixarem legado físico que possibilite a continuidade das atividades a longo prazo.

De acordo com o tema da conferência FAB 12 – The 12th Fab Lab Conference and Symposium, Fabricating the Future, realizada em Shenzhen, China, em 2016 –, seguiu-se o conceito de Fab Lab 2.0, que privilegia “a capacidade de usar as próprias ferramentas de fabricação digital para produzir outro fab lab e para produzir as máquinas de fabricação do futuro”. Assim, para pesquisar a forma ideal para o pavilhão foram

estudados, a partir de Kolarevic (2003), os princípios de fabricação digital e suas estratégias específicas (Tabela 3), para escolher a técnica com maior aplicabilidade no cenário dado.

	Corte	Subtração	Adição	Transformação
Base	Elementos planos 2D	Volume existente	Camadas bidimensionais	Material deformável e molde
Máquinas	Cortadora a laser, a jato d'água ou a plasma	Fresadora e Roteadora CNC	Impressora 3D	Modeladora por calor ou vapor
Acessibilidade*	5	3	5	1
Precisão	5	4	4	3
Geração de resíduos	3	5	1	1
Custo*	2	3	2	4
Vantagens	Acabamento, possibilidade de gravação da superfície, além de cortar	Fabrico de grandes elementos, pode gerar formas e superfícies complexas	Máquinas silenciosas e compactas, linguagem acessível	Produção em massa, reaproveitamento de molde
Desvantagens	Limitado à espessura do material que a máquina pode cortar e ao tamanho comportado pela máquina	Alta geração de resíduos, necessita de mão-de-obra especializada para geração dos códigos CNC	Processo acumulativo de erros, limitado a objetos pequenos, longo tempo de processo	Acessibilidade, pré-requisito de molde e a precisão depende do molde

\*Dentro do contexto estudado

**Tabela 3:** Avaliação dos princípios da fabricação digital baseada nas definições de Kolarevic (2003), Iwamoto (2009) e Dunn (2012). (Escala crescente de menor-0 para maior-5)

**Fonte:** Autores.

Entre os *makerspaces* e fab labs estudados no Rio de Janeiro, as ferramentas mais comuns são as máquinas de corte a laser e as impressoras 3D, compatíveis com os princípios de corte e de adição ilustrados. A impressora 3D tem especial popularidade, dada a sua portabilidade e o resultado de produtos mais palpáveis à primeira vista. No entanto, esse maquinário não comporta a dimensão física de construção do projeto – sendo que a produção em geral se destina a protótipos de pequenas dimensões –, e não pode ser facilmente aplicado a materiais mais duradouros e ecologicamente responsáveis. Portanto, optou-se pelo uso de métodos subtrativos via fresadora CNC, que suporta maiores formatos – no caso, chapas de madeira compensada – e apresenta considerável disponibilidade no contexto estudado.

## RESULTADOS

### Forma do Pavilhão

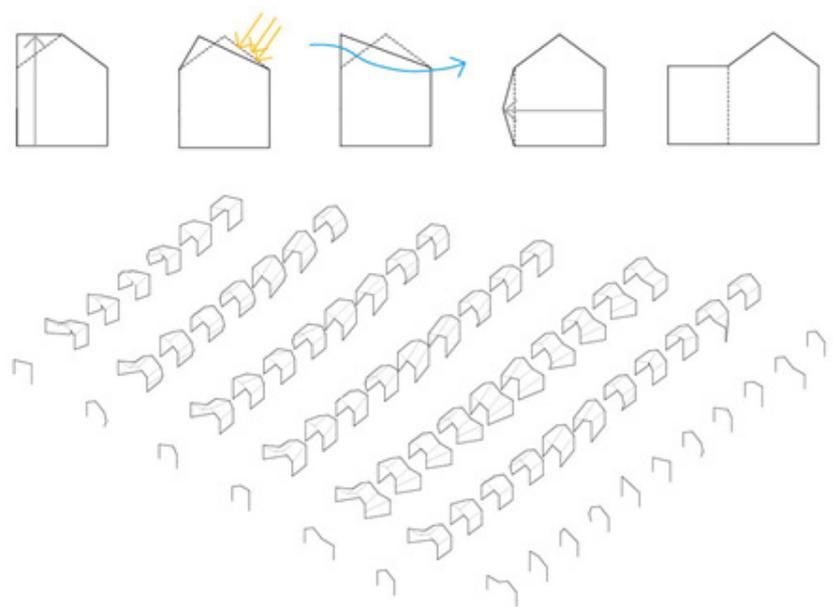
Em contraposição à forma dos casos estudados e de acordo com a abordagem pedagógica escolhida, procurou-se uma forma base em que não só fosse aplicável a fabricação digital, mas que também se aproximasse da linguagem do público alvo, facilitando a interação aluno-estrutur e despertando a curiosidade dos usuários de modo lúdico e imaginativo. Foram estudados alguns exemplos de pavilhões construídos e observou-se a recorrência do formato da casa com telhado em duas águas, arquétipo intimamente ligado ao imaginário infanto-juvenil e provavelmente funcional, como ilustrado nos projetos do Fab Pavilion (FAB LAB SEOUL,

2016) e do Clubhouse (REMY, T.; VEENHUIZEN, R, 2009). Aliado ao material e à forma, procurou-se um método de construção que se adaptasse à lógica móvel, sendo desmontável, à necessidade de personalização dos espaços e ao uso da fabricação digital, possibilitando tanto o reaproveitamento da estrutura como sua expansão ou retração, estudado nos projetos Casa Revista (PASSARO, ROHDE, 2016) realizados por estudantes da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro e TwoxTwo (2016), também realizado por estudantes da Iowa State University.

### Programa e sistema construtivo proposto

Associando a forma com o programa, foi definida uma série de parâmetros fixos e variáveis para assegurar diferentes soluções, promovendo versatilidade e adaptação rápida, que orientaram a construção do projeto utilizando o software Rhinoceros + Grasshopper. Essa abordagem de desenho possibilitou a customização em massa do projeto, já que a base algorítmica facilitou a concepção de diferentes soluções para o sistema proposto.

Para atender às diferentes demandas do programa, foram definidos cinco perfis derivados do perfil base, buscando o aumento dos espaços horizontal e vertical e da área total de piso, maior iluminação natural e ventilação cruzada (Figura 1). A partir da combinação de todos esses perfis, criou-se uma família de formas, as quais atendem todo o programa proposto e suas especificidades (Figura 1).



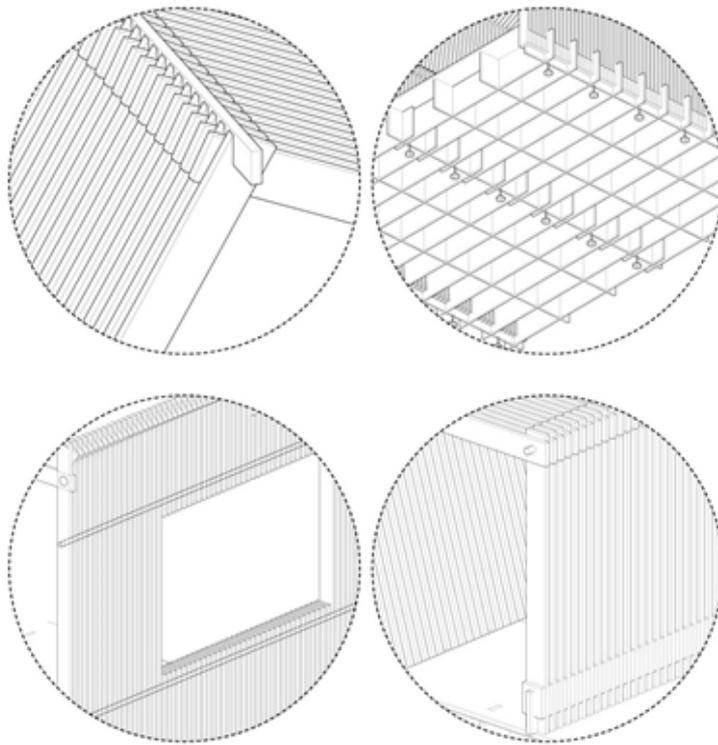
**Figura 1:** Perfis base (acima) e família de formas (abaixo)

**Fonte:** Autores.

Além da forma, o programa também foi sistematizado, dividido em dez módulos programáticos independentes, sendo um fixo (sala de aula), cinco essenciais (ferramentas, impressora 3D, cortadora a laser, fresadora pequena e fresadora grande) e quatro opcionais (eletrônica e robótica, tecidos, moldagem e biohacking). Esses módulos foram separados em três subcategorias, pequeno, médio e grande, de acordo com a área necessária para funcionamento e seguindo o tamanho da chapa de compensado padrão (1,60x2,20m). Foram atribuídos de um a três perfis por módulo, considerando a especificidade e o tamanho e buscando a melhor integração entre módulos. Também foram propostos sete variações de conjuntos desses módulos, que pretendem atender a diferentes demandas de espaço, de tempo de permanência, de público alvo e de disponibilidade financeira.

## Estrutura tipo do pavilhão proposto

O volume base do pavilhão proposto resulta da interpolação das curvas dos perfis principais (loft das curvas, em inglês), definidos a priori. Os perfis intermediários são extraídos por cortes transversais seriados (contour), que têm entre si a distância da espessura do material a ser utilizado – neste caso, sarrafos de madeira 7x2cm. As arestas dos perfis foram selecionadas alternadamente, dando origem as peças que estruturam os pórticos. Essas peças possuem furos circulares nas interseções, por onde é feito o encaixe com um tubo galvanizado rosqueável 1 1/2". Esses também serão feitos em lugares estratégicos ao longo dos perfis, para dar passagem à infraestrutura de eletricidade, iluminação e água, de acordo com a necessidade do programa, e para adição de mobiliário. Na cumeeira, é feito um encaixe sob medida para cada angulação de sarrafo (Figura 2). Por fim, horizontalmente e em espaçamentos de 1,60m, ocorrem peças horizontais que garantem o travamento da estrutura.



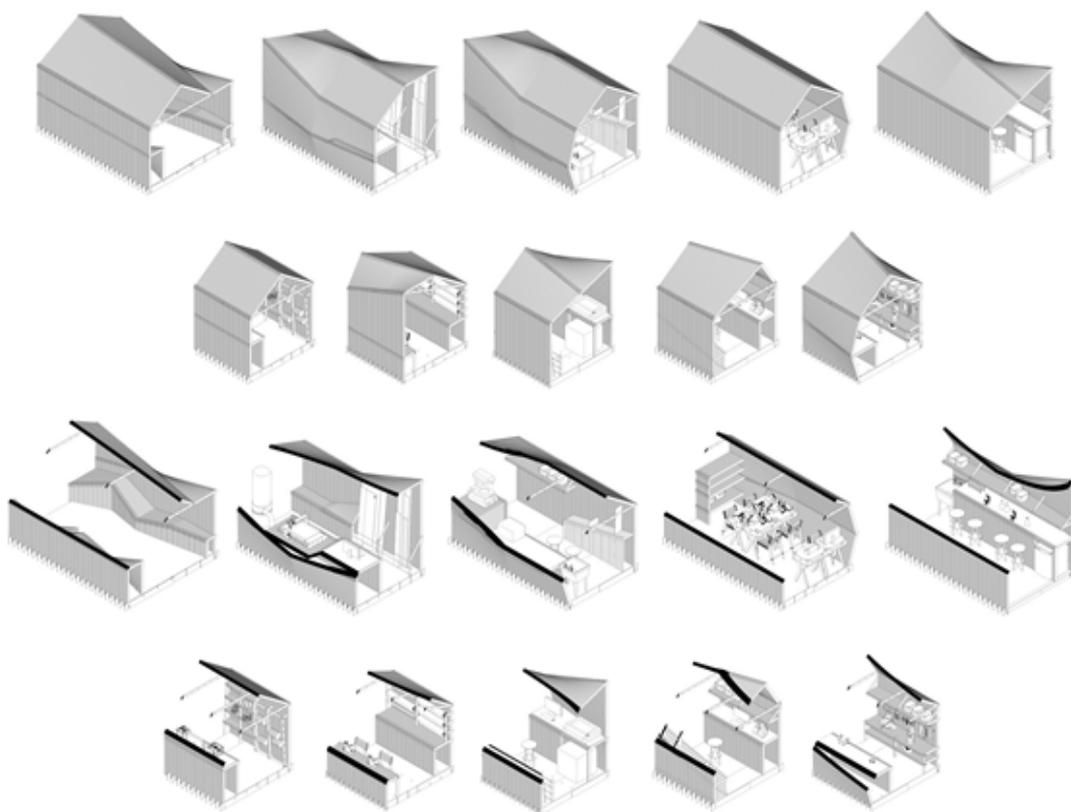
**Figura 2:** Detalhes construtivos da cumeeira e piso (acima), e aberturas laterais e mobiliário (abaixo)

**Fonte:** Autores.

O pórtico é encaixado na armação do piso, cuja estrutura foi baseada na “Casa Revista” (PASSARO, ROHDE, 2016) e utilizando o algoritmo desenvolvido no trabalho “Ferramenta Generativa para Wiki House” (MENDONÇA, 2016) ambos projetos desenvolvidos e construídos no Laboratório de Modelos e Fabricação Digital do Programa de Pós Graduação em Urbanismo da FAU UFRJ. Essa estrutura é composta por peças longitudinais e transversais que se encaixam via fêmea-e-fêmea. Nas laterais, são utilizadas peças longitudinais que recebem o pórtico, que é travado com auxílio de espaçadores. As demais peças longitudinais encaixam no piso através de encaixe macho-e-fêmea. O fechamento da cobertura é feito com telha translúcida. A princípio, não foi considerado um fechamento lateral, porém pode haver fixação de lonas ou telas por fora da estrutura. O fechamento das extremidades pode ser feito através de chapas de compensado em formato de porta camarão. Também podem ser feitas aberturas de vãos de janela seguindo os mesmos princípios do pórtico.

O mesmo processo de criação do p3rtico possibilita a anexa33o de volumes 33 a estrutura principal, em forma de mobili33rio interno ou externo. Nesse caso, s33o desenhados os perfis desejados e aplicados 33 a mesma seq33ncia algor33tmica. Uma das propostas pedag33gicas 33 que os usu33rios possam construir pe33as e partes de mobili33rios facilmente de acordo com a demanda, utilizando tanto o maquin33rio do laborat33rio como a defini333o pr33-estabelecida.

Esses princ33pios foram aplicados ao programa, a fim de simular formas poss33veis. O processo resultou na modelagem param33trica dos dez m33dulos propostos (Figura 3), a partir dos quais foi poss33vel estudar propostas de uso interno, layout, mobili33rios e infraestrutura necess33ria, como instala333o hidr33ulica e el33trica. Para o mobili33rio complementar, n33o contemplado na mesma l33gica de constru333o do p33rtico, foram utilizados designs open-source dispon33veis gratuitamente online.



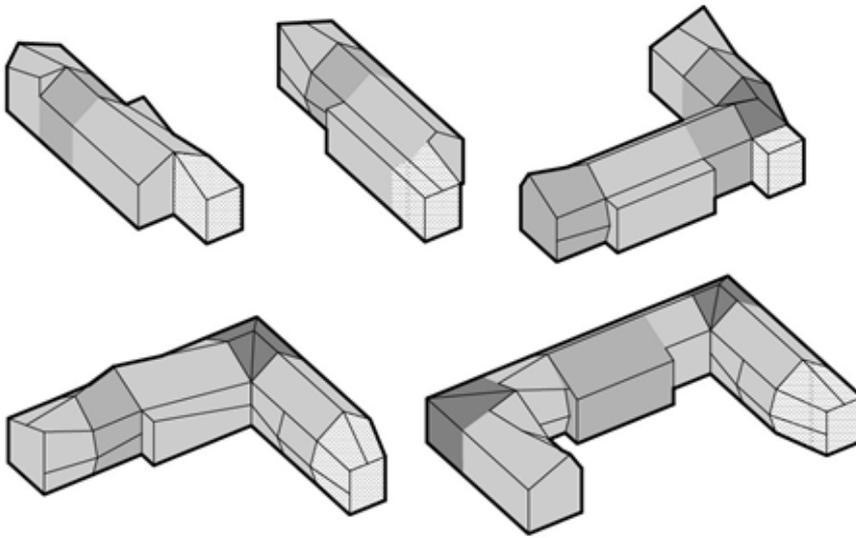
**Figura 3:** M33dulos finais em ordem crescente de tamanho, mostrando o exterior (primeira e segunda fileira) e o interior (terceira e quarta fileiras). Da esquerda para a direita: Aulas, Fresadora Grande, Moldagem, Eletr33nica, Biohacking, Impress33o 3D, Costura, Corte a Laser, Fresadora Pequena, Ferramentas

**Fonte:** Autores.

### Implanta333o

A proposta de implanta333o 33 gen33rica e pode ser montada em diferentes locais em escolas p33blicas ou privadas. A ideia de instala333o do projeto vai de encontro a de feira de ci33ncias ou estande e visa um local coberto e aberto, buscando assim evitar solu3333es complexas de impermeabiliza333o, isolamento termo-ac33stico e climatiza333o na estrutura. Neste sentido, podem ser instalados em pilotis, p33tios cobertos, quadras de esportes ou sal33es nas escolas.

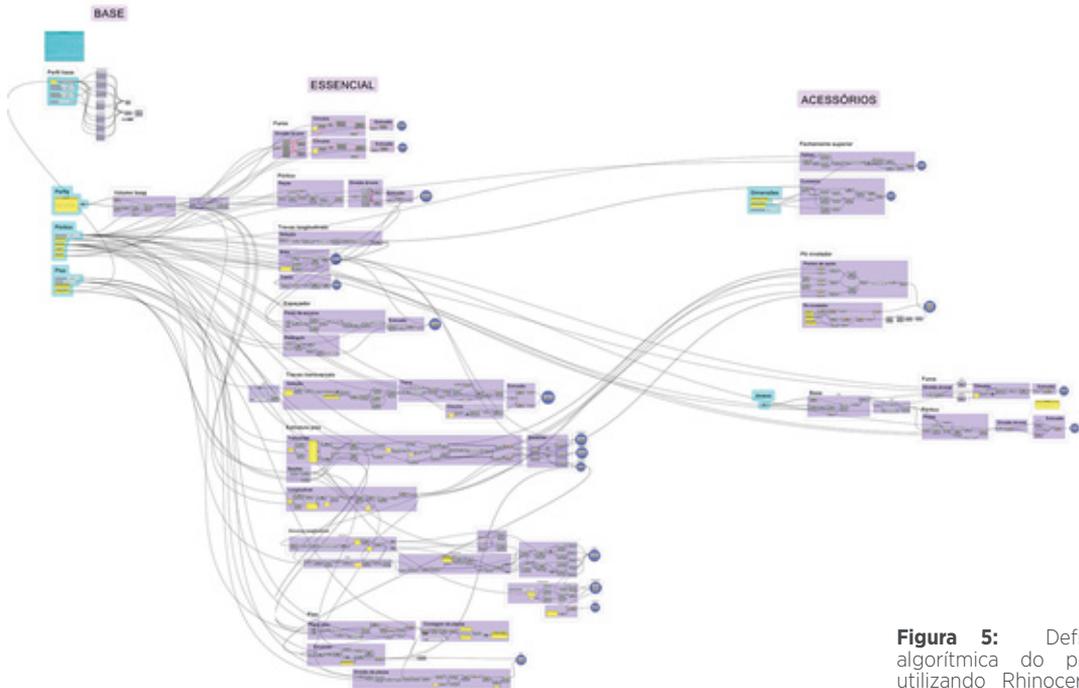
A modula333o da estrutura permite que os m33dulos se conectem facilmente entre si formando arranjos espaciais variados, desde linear, em L, em U ou fechado, gerando um p33tio interno para atividades (Figura 4).



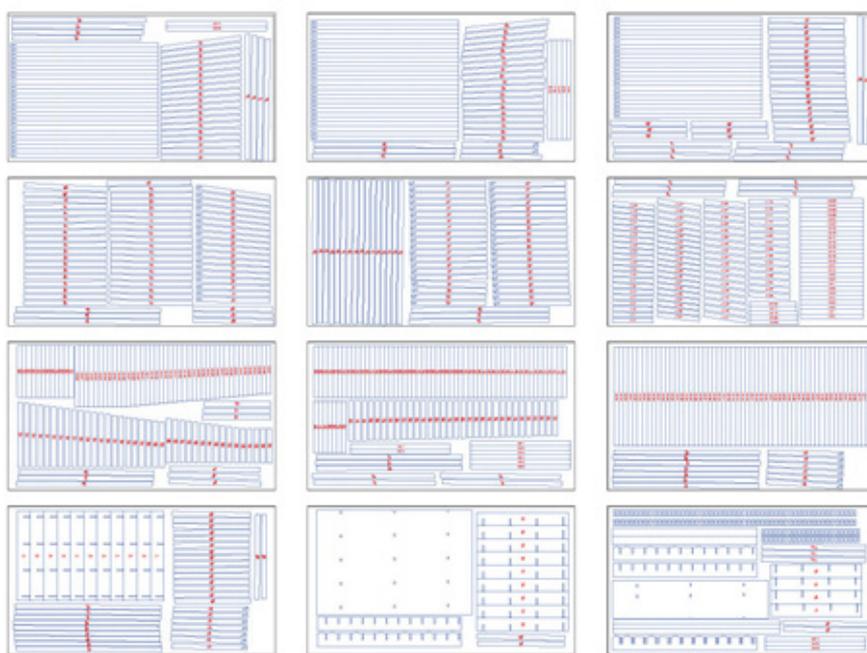
**Figura 4:** Possíveis arranjos espaciais  
**Fonte:** Autores.

## Prototipagem

O processo de criação de forma e estrutura é organizado em uma definição algorítmica utilizando o software Rhinoceros + Grasshopper (Figura 5). Essa ferramenta possibilita a customização do projeto de maneira fácil sem alterar as suas principais características. Além de gerar a forma, pode-se extrair diretamente do modelo os arquivos planificados para corte e gerar o nesting (Figura 6) das peças, que são devidamente nomeadas e numeradas para montagem. Isso permitiu a prototipagem do projeto em MDF 3mm, realizada na cortadora a laser do LAMO - PROURB. Foram feitos modelos na escala 1:10 e 1:5 (Figuras 7 e 8), que permitiram identificar problemas de encaixe e estruturação antes de um protótipo em escala 1:1.



**Figura 5:** Definição algorítmica do projeto utilizando Rhinoceros + Grasshopper  
**Fonte:** Autores.



**Figura 6:** Nesting das peças para corte

**Fonte:** Autores.



**Figura 7:** Modelo em escala 1:5

**Fonte:** Autores.



**Figura 8:** Detalhes do modelo em escala 1:5

**Fonte:** Autores.

## CONCLUSÃO

O projeto é uma proposta a ser desenvolvida e testada, preferencialmente em uma escola pública, como projeto de extensão. Dados os objetivos apresentados, ainda é preciso a construção em escala real para teste da estrutura, além de um estudo mais aprofundado sobre a implementação do projeto, como modos de transporte, custos fixos e variáveis e possíveis patrocinadores e apoiadores.

A realização do protótipo auxiliou na detecção de problemas pontuais; como a definição de fechamentos laterais e superiores, que ainda podem ser melhorados, e a otimização do uso de material para flexibilizar a viabilidade financeira. A nível de sistema construtivo, foi possível detectar problemas de encaixe, como na cumeeira e no mobiliário interno, que por isso foram posteriormente alterados nos desenhos técnicos.

No âmbito do design paramétrico, muitas barreiras foram ultrapassadas a fim de criar uma definição racionalizada, tão curta e maleável quanto possível. Esse processo foi retomado diversas vezes no desenvolvimento do objeto, sendo repetidamente reescrito e adaptado a novos obstáculos. Sabe-se, no entanto, que a mesma deverá sofrer adaptações, principalmente quanto ao nesting, quando for submetida à fabricação.

Assim como as lanhouses foram essenciais na transição para a era da comunicação digital, os fab labs, makerspaces, hackerspaces, entre outros espaços de fazer e aprender, também são imprescindíveis para a democratização do acesso à tecnologia da quarta revolução industrial. Cada vez mais iniciativas privadas e públicas têm surgido com o intuito de introduzir a população a esse novo modo de pensar e fazer. No entanto, a formação de base é tão ou mais importante. Como discutido, o acesso a essas tecnologias hoje não é amplamente difundido, da mesma forma, há 20 anos, o acesso à Internet era difícil e caro.

A fabricação digital não se limita ao uso de máquinas como a impressora 3D ou a fresadora CNC. O potencial desses ambientes é significativo no atual contexto de educação, produção e consumo. Muito além do domínio da técnica, esses espaços têm papel importante na disseminação da tecnologia de ponta e do consumo consciente, sendo uma poderosa ferramenta social

e intelectual. Sua abertura ao público fora das universidades é de extrema importância, já que “as instituições de ensino e pesquisa avançadas têm espaço para apenas alguns milhares dessas pessoas. Ao trazer ambientes acolhedores para inovadores onde quer que estejam, essa revolução digital possibilitará aproveitar uma fração maior do poder intelectual do planeta” (GERSHENFELD, 2012). O acesso à fabricação digital promove a produção, a criação e possibilita o domínio da tecnologia e das ferramentas para se construir o futuro.

## AGRADECIMENTOS

Ao LAMO - PROURB e equipe, por disponibilizar o maquinário, o ambiente e o pessoal necessários para desenvolver esse projeto.

## REFERÊNCIAS

- BLIKSTEIN, P. **Digital Fabrication and 'Making' in Education: The Democratization of Invention.** In J. Walter-Herrmann & C. Büching (Eds.), *FabLabs: Of Machines, Makers and Inventors.* Bielefeld: Transcript Publishers, 2013.
- BUITONI, C.S. **Mayumi Watanabe Souza Lima: a construção do espaço para a educação.** FAU USP: São Paulo, 2009.
- DÍEZ, T. **Personal Fabrication: Fab Labs as Platforms for Citizen-Based Innovation, from Microcontrollers to Cities.** *Digital Fabrication:* 457-68. *Nexus Network Journal.* Vol.14, No. 3, 2012.
- DUNN, N. **Digital Fabrication in Architecture.** Laurance King Publishing: Londres, 2012
- EYCHENNE, F. e NEVES, H. **Fab Lab: A Vanguarda da Nova Revolução Industrial.** São Paulo: Editorial Fab Lab Brasil, 2013.
- FAB 12 - The 12th Fab Lab Conference and Symposium. Disponível em: <<http://fab12.fabevent.org>>, 2016.
- FAB LAB SEOUL. *Fab Pavilion.* Disponível em: <<https://www.fablabs.io/projects/136>>, 2016.
- FAB FOUNDATION. **How to Start a Fab Lab: The Space.** Disponível em: <<http://fabfoundation.org/the-space/>>, 2016.
- FAB FOUNDATION. **Labs Map.** Disponível em: <<https://www.fablabs.io>>, 2016.
- FAB FOUNDATION. **What is a Fab Lab?** Disponível em: <<http://www.fabfoundation.org/index.php/what-is-a-fab-lab/>>, 2016.
- GERSHENFELD, N. **Fab: The Coming Revolution on Your Desktop – From Personal Computers to Personal Fabrication.** New York: Basic Books, 2005.
- GERSHENFELD, N. **How to Make Almost Anything: The Digital Fabrication Revolution.** Cambridge: Foreign Affairs (91), 2012, pp. 43-57.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS EDUCACIONAIS ANÍSIO TEIXEIRA - INTP (INEP). **Censo Escolar 2016.** Brasília: MEC, 2017.
- IOWA STATE UNIVERSITY. *two Xtwo* (2016). Disponível em: <<http://new.arch.iastate.edu/tag/twoxtwo/>>, 2016.
- ITSBRASIL. *Conheça o Fab Lab Livre SP.* Disponível em: <<http://fablab.itsbrasil.org.br/o-que-e>>, 2016.
- IWAMOTO, L. **Digital Fabrications: Architectural and Material Techniques.** Princeton Architectural Press: Nova Iorque, 2009.
- KOLAVERIC, B. **Designing and Manufacturing Architecture in the Digital Age.** *Architectural Information Management - 05 Design Process 3.* 2003.
- MAKERSPACES. **MakedED Resources for School Makerspaces 2nd Edition.** Disponível em: <<https://www.makerspaces.com/makerspace-resources-ebook/>>, 2016.
- MAKERSPACES. **Resources For Starting and Running a Mobile Makerspace.** Disponível em: <<https://www.makerspaces.com/resources-for-starting-and-running-a-mobile-makerspace/>>, 2016.

MENDONÇA, D.; PÁSSARO, A.; HENRIQUES, G. C. **Ferramenta Generativa para Wiki House**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - FAU UFRJ: Rio de Janeiro, 2016.

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

REZENDE, F. **As Novas Tecnologias na Prática Pedagógica Sob a Perspectiva Construtivista**. ENSAIO - Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte), Belo Horizonte: v. 2, n. 1, 2000, p. 70-87.

REMY, T.; VEENHUIZEN, R. Clubhouse (2009). Disponível em: <<http://www.remyveenhuizen.nl/work/public-space/clubhouse>>, 2016.

SPERLING, D.M.; HERRERA, P. C. **Homo faber: digital fabrication in Latin America**. CAAD futures 2015> the next city. 1. ed. São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo, 2015.

The Maker Map. Disponível em: <<http://themakermap.com>>, 2016.

**Giordana Dileta Pacini**  
pacini.giordana@gmail.com

**Andrés Martín Passaro**  
andrespasaro@gmail.com

**Gonçalo Castro Henriques**  
gch@fau.ufrj.br

# A ESTRUTURAÇÃO DO SABER RELACIONADO A GEOMETRIA COMPLEXA E A MODELAGEM PARAMÉTRICA DE ESTRUTURAS REGENERATIVAS NA ARQUITETURA

The structuring of knowledge related to complex geometry and parametric modeling of regenerative structures in architecture

Janice de Freitas Pires<sup>1</sup>, Alice Theresinha Cybis Pereira<sup>2</sup>

**RESUMO:** A arquitetura regenerativa surge com uma abordagem que vai além da sustentabilidade dos edifícios, buscando ampliar a relação com o meio ambiente, de modo a promover a regeneração dos sistemas vivos, através de uma compreensão completa do lugar no projeto de arquitetura. Neste trabalho, com objetivo didático, é realizado um estudo sobre a geometria complexa das estruturas com potencial regenerativo na arquitetura e sua modelagem paramétrica, como meio de explicitar o saber envolvido em tais superfícies. A partir de duas teorias didáticas que destacam a necessidade de se estudar a constituição de um saber com vistas a processos transpositivos, reconhecem-se os princípios da arquitetura regenerativa e explicitam-se os elementos de saber que envolvem as geometrias complexas recorrentes na natureza, a qual desenvolve suas estruturas em estrita relação com as dinâmicas que são processadas no ambiente natural. Visando estudos de transposição didática para arquitetura, a estruturação de processos de modelagem paramétrica de tais geometrias também se integra ao propósito de disponibilizar uma rede de conceitos com foco no estudo das superfícies matemáticas empregadas na arquitetura contemporânea recente.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas - UFPEL

<sup>2</sup> Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

**PALAVRAS-CHAVE:** Arquitetura regenerativa; Geometria complexa; Ensino de arquitetura; Modelagem paramétrica.

**ABSTRACT:** The regenerative architecture emerges with an approach beyond the sustainability of buildings, seeking to extend the relationship with the environment, in order to promote the regeneration of living systems, through a complete understanding of the place in architectural design. In this work, with a didactic objective, a study is carried out on the complex geometry of structures with regenerative potential in the architecture and its parametric modeling, as a means of explaining the knowledge involved in such surfaces. Based on two didactic theories that highlight the need to study the constitution of a knowledge with a view to transpositive processes, the principles of regenerative architecture are recognized and the elements of knowledge that involve the recurrent complex geometries in nature are explained, which develops its structures in strict relation with the dynamics that are processed in the natural environment. Aiming at studies of didactic transposition for architecture, the structuring of parametric modeling processes of such geometries is also integrated with the purpose of providing a network of concepts focused on the study of mathematical surfaces used in recent contemporary architecture.

**KEYWORDS:** Regenerative architecture; Complex geometry; Teaching architecture; Parametric modeling.

## How to cite this article:

PIRES, J. F.; PEREIRA, A. T. C. A estruturação do saber relacionado a geometria complexa e a modelagem paramétrica de estruturas regenerativas na arquitetura. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.14, n.1, p.90-110, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148024>

**Fonte de financiamento:**  
CNPQ

**Conflito de interesse:**

Declaro não haver

**Submetido em:** 10/07/2018

**Aceito em:** 01/03/2019



## INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas, devido a crescente preocupação com os problemas ambientais, o conceito de sustentabilidade tem sido incorporado sistematicamente na arquitetura. Segundo Gonçalves e Duarte (2006), houve um período da história da arquitetura no qual a premissa era de que a tecnologia de sistemas prediais ofereceria meios de controle total das condições ambientais de qualquer edifício, de maneira artificial, não havendo a necessidade de se considerar e utilizar os princípios naturais da arquitetura bioclimática.

De acordo com os mesmos autores, na década de 1970, devido à crise energética e as preocupações com o consumo de energia, a abordagem da arquitetura sustentável se concentrou principalmente nos aspectos de impacto ambiental da construção, com a preocupação de diminuir os danos causados pelos processos de industrialização dos materiais e oferecer sistemas prediais mais eficientes em relação ao desempenho energético.

Embora tenha havido uma evolução quanto a tais aspectos, por meio de pesquisas e desenvolvimento de produtos e tecnologias prediais, Littman (2009) aponta que a sustentabilidade na arquitetura, tal como é entendida pela sociedade hoje, não é suficiente como solução para ser incorporada no projeto de arquitetura, em projetos atuais e futuros. Isto se deve a que a entrada contínua de energia e recursos em uma estrutura não é sustentável de qualquer modo para que seu funcionamento seja saudável em relação ao meio em que se insere. O mesmo autor aponta que o modelo de construção atual na arquitetura emprega tecnologias obsoletas e implica em processos de degeneração. Na concepção regenerativa o edifício necessita ter o potencial para a integração do mundo natural como um parceiro igual.

Tal integração é possível a partir do conhecimento do lugar em um nível profundo e íntimo pelo projetista com base nos padrões, forças e energias existentes, os quais desenvolvem uma configuração única para tal lugar. A sua dinâmica revela dados tangíveis os quais podem ser utilizados como as informações generativas da arquitetura. Um destes padrões, segundo Littmann (2009), é dado pela geometria das estruturas naturais, a qual é resultado de um diagrama de forças que interagem em dado lugar (THOMPSON, 1917).

A inserção do conhecimento específico da geometria das estruturas naturais torna possível tratar ao mesmo tempo com conceitos fundamentais que estão relacionados à definição da forma e ao seu desempenho relativamente à conformação do objeto arquitetônico. A explicitação das estruturas de saber (CHEVALLARD, 1999) que envolvem tais geometrias possibilita por um lado compreendê-las e dar apoio à proposição de processos de modelagem paramétrica visando sua aplicação na concepção arquitetônica. Por outro lado, no contexto deste trabalho, foi considerada a importância de tais estruturas de saber para subsidiar estudos de transposição didática (CHEVALLARD, 1991) para arquitetura, fundamentados na análise de um saber e na sua sistematização.

A importância deste aprendizado na formação em arquitetura está em desmistificar ou até mesmo inibir o uso de superfícies curvas de modo gratuito, sem consciência de sua estrutura formal e suas qualidades arquitetônicas. Isto decorre da facilidade de 'projetar ou representar uma forma curva' por intermédio de curvas e superfícies denominadas de formas livres (tais como a da classe das NURBS). Outra relevância deste estudo é no sentido de dar subsídios para que na formação em arquitetura tais superfícies possam ser incluídas nas hipóteses de formalização geométrica do projeto de arquitetura, de maneira consciente em termos arquitetônicos, técnicos e tecnológicos. Isto somente será possível por meio do reconhecimento de seus elementos geométricos fundamentais, tais como curvas e processos de geração, as técnicas que possibilitam representar tais superfícies e as tecnologias que dão subsídios às técnicas de representação. Além disto, tais superfícies possuem qualidades de desempenho que

podem ser preponderantes em projetos direcionados a sustentabilidade ou regeneração. Arquitetos como Vincent Callebaut têm adotado estratégias formais com este propósito.

A dificuldade de modelar tais superfícies reside em que o conhecimento necessário para tal não é abordado na arquitetura e a maioria das superfícies mínimas exige um conhecimento específico e profundo da área da matemática, como de cálculo complexo. A inserção deste conhecimento matemático demandaria uma enorme reformulação nos currículos de arquitetura, que não poderia ser concretizada em curto prazo. Frente à inserção nos escritórios de arquitetura principalmente da denominada modelagem paramétrica, que possibilita a adoção de formas mais complexas, livres e muitas vezes até mesmo com superfícies mínimas, parece urgente tratar no contexto didático com o conhecimento que envolve tais geometrias, principalmente a partir de seus elementos fundamentais e processos de geração.

Nesse sentido, a explicitação da geometria das superfícies das estruturas naturais proposta neste trabalho tem o propósito de se constituir como uma ontologia de apoio para a modelagem paramétrica (ou qualquer outro tipo de representação gráfica digital) da forma arquitetônica direcionada a regeneração. Tal ontologia, além da estrutura formal, busca explicitar aspectos positivos de utilização das formas curvas complexas, os quais frequentemente não são considerados quando são propostas tais tipos de superfícies.

## **REFERENCIAIS TEÓRICOS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

O presente estudo tem um enfoque didático amparado nas teorias didáticas de Chevallard: a Teoria da Transposição Didática (1991) e a Teoria Antropológica da Didática (1999). Conforme já mencionado, este autor destaca os elementos de um saber que devem ser considerados em processos de ensino e aprendizagem, com vistas a uma transposição didática de tal saber. Tendo por base tais teorias, identificou-se que a natureza descritiva da modelagem algorítmica, que exige reconhecer elementos teóricos, técnicos e tecnológicos, pode potencializar a explicitação do saber da geometria complexa das estruturas regenerativas empregadas na arquitetura. O reconhecimento de processos de modelagem paramétrica desenvolvida em linguagem de programação visual por meio do plug-in Grasshopper junto ao software Rhinoceros, ao integrar a linguagem algorítmica em uma abordagem descritiva e visual, pode ser considerado como uma estratégia didática no ensino de arquitetura.

A modelagem paramétrica introduz também maiores possibilidades para a definição de geometrias complexas, a geração de instâncias de projeto e a avaliação destas instâncias, por ser um processo de representação baseado em um sistema que armazena todos os dados relacionados à geometria do objeto que está sendo criado e representado e permite fazer relações entre estes dados. A escolha pela modelagem com linguagem de programação visual e descritiva também se justifica pelo fato de que ainda não se conta nos cursos de arquitetura com a inserção da linguagem pura de programação, exclusivamente por meio do uso de scripts.

No contexto em que este trabalho se insere já vem sendo adotadas desde o ano de 2003 estratégias didáticas em que os processos descritivos (principalmente por meio do desenvolvimento de mapas conceituais analíticos), relativos à geometria de objetos arquitetônicos, são utilizados como suporte aos processos de representação gráfica digital (modelagem geométrica e visual). Isto está fundamentado na Teoria Antropológica da Didática de Chevallard (1999), a qual considera que o saber relativo a um objeto de estudo está constituído por quatro elementos que se relacionam dinamicamente: um problema ou uma classe de problemas que envolvem

tal objeto; as técnicas de resolução deste problema ou da classe de problemas associados; as tecnologias que justificam, explicam ou produzem técnicas relativas à resolução do problema; e as teorias, que possuem o mesmo papel em relação às tecnologias (de justificação, explicação e produção de tecnologias).

Com isto, tem-se um quadro teórico de análise do saber que se está querendo inserir em dado contexto. Devido à própria característica dos contextos educativos, Chevallard (1991) salienta a importância do saber estar constituído em sua estrutura integral. A finalidade do reconhecimento de tal estrutura de saber é dar subsídios aos próprios docentes para a estruturação de situações didáticas e aos estudantes para tornarem-se conscientes de suas escolhas e proposições projetuais, além do uso adequado da liberdade formal e não de modo gratuito.

Dessa maneira, o estudo refere-se às etapas de reconhecimento e explicitação das estruturas de saber que envolvem a geometria complexa de estruturas com potencial de regeneração e está estruturado pelas seguintes etapas: - Reconhecimento dos conceitos que envolvem aspectos de regeneração em arquitetura; - Reconhecimento das estruturas da natureza que possuem princípios de regeneração; - Explicitação da geometria (tipo de superfícies) de tais estruturas da natureza e do emprego destas na arquitetura; - Reconhecimento de processos de modelagem paramétrica de tais superfícies; - Discussão sobre a adequação dos elementos de saber reconhecidos nas etapas anteriores e sua possibilidade de inserção no ensino de arquitetura.

Para o reconhecimento do emprego de superfícies mínimas na arquitetura adotaram-se as análises e descrições dadas por Burry & Burry (2010) para duas obras de arquitetura, uma que emprega uma superfície mínima obtida matematicamente e outra conformada a partir de modelos físicos de suspensão. A adoção deste referencial teórico justifica-se por seu aprofundamento na descrição e busca pelos conceitos matemáticos que envolvem tais geometrias empregadas na arquitetura contemporânea recente, adotando-se o método de ampliação das estruturas de saber identificadas em tais descrições, a partir de autores específicos das áreas em questão (da matemática e da física). Devido ao enfoque didático, dois dos modelos geométricos selecionados para os processos de modelagem inserem-se no contexto da classe de superfícies curvas tradicionais, sistematizadas na geometria descritiva, mas que também são superfícies mínimas, e um dos modelos é uma superfície mínima mais complexa, descoberta no século XX, empregada em uma obra de arquitetura, descrita em Burry & Burry (2010). Esta possui geometria com elementos fundamentais (curvas) que se repetem nas primeiras duas superfícies estudadas, sendo de interesse didático tratar de maneira sequencial com estas três superfícies mínimas.

No enfoque da teoria didática adotada, o reconhecimento de estruturas de saber é uma etapa prévia a estruturação de situações e materiais didáticos, válida para qualquer contexto educativo. Dessa maneira, o presente trabalho será limitado à discussão sobre a explicitação do saber que envolve as estruturas com potencial de regeneração na arquitetura, não abordando as aplicações didáticas já realizadas, as quais serão descritas e discutidas em trabalhos futuros.

## **EXPLICITAÇÃO DO SABER QUE ENVOLVE A GEOMETRIA COMPLEXA DE ESTRUTURAS REGENERATIVAS NA ARQUITETURA**

### **Alguns princípios regenerativos na arquitetura**

Littmann (2009) traçou alguns princípios para projetos de regeneração na arquitetura, que estão baseados na compreensão do funcionamento do

meio natural. Esta seria uma das premissas da arquitetura regenerativa, ou seja, o meio natural seria o seu gerador, sendo necessária uma compreensão abrangente e completa dos sistemas naturais e de vida, a ser empregada no projeto de uma estrutura.

Neste contexto, a análise do local, com vistas a identificar tais padrões, exerce, segundo Littmann (2009), um papel central no desenvolvimento de um projeto de concepção regenerativa. Para o autor isso ocorre, em parte, porque os tecidos são construídos em torno do fluxo de energia e consequentemente tornam-se a expressão física ou forma de realização (personificação) desta energia. Este é um processo em que a natureza essencial do fluxo e a correspondente natureza do meio através do qual ele passa determinam a sua expressão na forma. A percepção de lugar como um conjunto de padrões e sistemas interdependentes é o primeiro passo que o projetista deve dar no processo de concepção regenerativa.

Como um dos princípios orientadores para a regeneração, o autor destaca a *integração dos sistemas inteiros de design*, que está amparada nos seguintes critérios: Todos os sistemas e entidades são contabilizados e incorporados no projeto geral do sistema; Todos os sistemas estão envolvidos em comunidades de relações de apoio mútuo; Cada uma das entidades do sistema deve desempenhar mais do que uma função ou satisfazer mais do que uma necessidade dentro do sistema (multiplicidade); cada necessidade dentro do sistema é recebida com mais de uma solução, não existindo uma única solução para o seu funcionamento (redundância). Por exemplo, a aquisição de energia utilizável por meio de mais de uma solução (energia solar, eólica ou biomassa) fortalece o sistema, em termos energéticos, pois permite solidificar a entrada de energia, tornando-o mais confiável, eficiente e benéfico.

Outro princípio apontado pelo autor é da *integração na paisagem*, em que se destacam as seguintes ideias: a análise do local, seus elementos e sistemas naturais são a base geradora do projeto; a habitação e integração paisagística criam uma nova unidade / entidade inteira; a construção da habitação é naturalmente artificial ou artificialmente natural, tendo-se, na arquitetura regenerativa, a necessidade de transpor-se a lacuna entre o artificial e o natural, fazendo-se uma síntese da relação existente entre os dois.

O princípio dos *limites inteligentes* estabelece que cada programa tenha um limite mínimo exigido, com uma máxima potencialmente infinita. O projeto reflete o equilíbrio do programa e cada material e espaço é potencialmente maximizado e integrado em todo o seu potencial de entrada líquida positiva no sistema. A noção de “Limites inteligentes” é crucial para o processo de design, pois garante que o equilíbrio possa ser cumprido dentro do sistema, sem limitar o potencial de regeneração dentro do sistema.

O princípio da *construção inteligente* refere-se à construção da arquitetura, bem como a construção de sistemas e o local; respeita a eficiência dos materiais, maximização de seu potencial e construtibilidade. O princípio da *ecologia ousada (Bold Ecology)* refere-se à implementação e proliferação de sistemas ecológicos que executam múltiplas funções, são regenerativos e fornecem uma produção líquida positiva.

A partir de tais ideias é possível afirmar que as estruturas naturais se desenvolvem em torno do fluxo de energia e sua forma é uma resposta aos princípios anteriormente apontados. Estas estruturas integram princípios regenerativos, o que aponta a importância de considera-las como referenciais para o emprego na arquitetura.

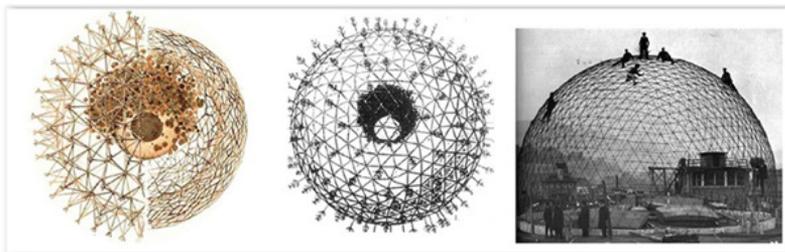
### **Estruturas da natureza que integram princípios de regeneração**

Bertol (2011) considera que a natureza é uma tendência que leva a uma abordagem interdisciplinar em projeto. Para a autora, a beleza das formas encontradas na natureza é reforçada pela sua funcionalidade, pois além da inspiração estética, oferece estratégias de projeto e eficiência estrutural.

Segundo a autora, “As ciências naturais têm um papel importante em ajudar-nos a compreender a lógica do mundo natural e oferecem muitas lições para o desenho de formas artificiais” (Bertol, 2011, p. IV). Neste contexto, a geometria possui uma estrita relação com a estrutura de tais formas, englobando uma caracterização que pode ser aplicada para a maioria dos fenômenos e objetos do mundo real.

A definição de D’Arcy Thompson (1917) da forma como ‘um diagrama de forças’ é entendida em Bertol (2011, pág. IV) como “um ponto de partida para um discurso arquitetônico contemporâneo, em que a definição das formas no ambiente construído deva ser impulsionada por intuição estrutural em um diálogo entre geometria, estética e materiais”. A autora destaca que as formas e os padrões podem oferecer um meio potente para interpretar os fenômenos que ocorrem na natureza (desde a biologia, química, física, geometria, zoologia, biofísica e ciências dos materiais). Podem assim oferecer modelos conceituais para a concepção de formas artificiais.

Um importante conceito geométrico apontado por Bertol (2011) como recorrente na natureza são os *triângulos* e *hexágonos* como formas fundamentais para o equilíbrio. Em estática, o triângulo é a figura de base para alcançar o equilíbrio estrutural. Na arquitetura, as geodésicas propostas por Buckminster Fuller (à direita da Figura 1) são um exemplo de aplicação desta abordagem. Segundo a autora, este princípio de equilíbrio pode ser alargado a processos biológicos, tais como a divisão celular e crescimento. Algumas radiolárias possuem estrutura semelhante, com padrão triangular (à esquerda e ao centro da mesma Figura).



**Figura 1:** Radiolária desenhada por E. Haeckel (1872) e forma geodésica do Planetário em Jena (C. Zeiss)

**Fonte:** Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009).

Bertol (2011) relata que Plateau ao fazer suas observações em bolhas de espuma de sabão identificou que estas no plano bidimensional se cruzam em três vértices de um ângulo que tende a ser de  $120^\circ$  e em três dimensões, via quatro vértices semelhantes aos ângulos de um tetraedro. Posteriormente aos experimentos de Plateau, D’Arcy Thompson (1917) reconheceu que os mesmos princípios geométricos se aplicam a células vivas, que seguem os princípios da tensão superficial com base na eficiência energética: células hexagonais convergindo em agregados a cerca de ângulos  $120^\circ$  são uma característica muito comum de formas na natureza.

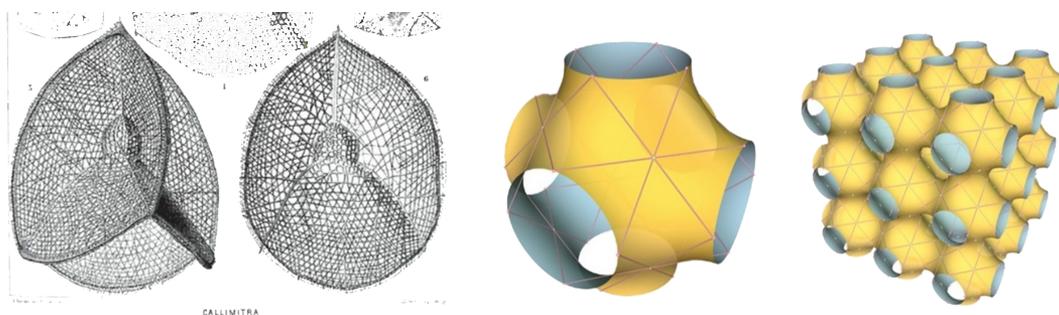
Os experimentos de Plateau com formas de bolhas de sabão e sua configuração tiveram grande influência na evolução de uma teoria de uma classe especial de superfícies recorrentes na natureza, denominadas de *superfícies mínimas*. Este teoria teve suas primeiras definições no século XVIII, em 1760 por Lagrange, e foi impulsionada a partir da metade do século XIX e principalmente no século XX, com a evolução da dinâmica de fluidos, na física, e sistemas complexos, na matemática (BERTOL, 2011). Uma *superfície mínima* é a superfície que possui menor área para um dado contorno fixo (OSSERMAN, 1986). Mas sua principal característica é possuir um equilíbrio de tensões devido à curvatura média igual à zero em todos os seus pontos (CARMO, 1987), resultando em uma forma que responde otimamente em termos estruturais sem consumir energia para isto. Ou seja, a forma responde as condições físicas a partir de sua geometria, o que faz com que se corresponda com os princípios da arquitetura regenerativa. Esta geometria que assume uma ‘forma correta’ em relação ao meio físico, segundo Kanaiya (2013), é denominada de ‘geometria funicular’, sendo esta conformada em ‘estruturas funiculares’.

Tendo propriedades de minimização de quantidades, o hexágono, por exemplo, minimiza áreas de superfícies, assim como ocorre com as superfícies mínimas conformadas por bolhas de sabão experimentadas por Plateau a partir de 1843. O padrão hexagonal é descrito como ladrilho de área de superfície mínima: com este padrão, as abelhas minimizam a quantidade de cera necessária para a construção da colmeia (BERTOL, 2011). A autora destaca que o favo de mel é um exemplo perfeito de uma forma gerada como resposta à eficiência estrutural e economia de material.

Outro exemplo apontado por Bertol (2011) de estrutura natural que integra os conceitos anteriormente citados é de uma radiolária (organismos unicelulares, caracterizados por um esqueleto mineral, que na maioria dos casos é feita de sílica - dióxido de silício). A *Callimetra Nassellaria*, desenhada por Haeckel (à esquerda da Figura 2), tem a forma de um tetraedro esférico, com as faces que se assemelham as superfícies de área mínima. A autora ainda cita outras ocorrências de padrões hexagonais que exercem princípios de equilíbrio e eficiência estrutural, tais como o das asas das libélulas e da lama rachada de formações geológicas.

Para Allgayer (2009), as configurações que são assumidas nas superfícies mínimas que se desenvolvem na natureza decorrem da busca em anular as forças externas e internas que atuam sobre os limites físicos da matéria que constitui estas superfícies. Ao buscar o equilíbrio, a superfície de área mínima é configurada, como o objetivo de alcançar o melhor aproveitamento de sua tensão superficial. Desta maneira, estas superfícies caracterizam-se pela redução de material, pela otimização das tensões de trabalho e por atuarem no equilíbrio energético.

Perez-García e Gómez-Martínez (2009) identificaram que os arranjos mais usuais na natureza são controlados por quatro fatores principais: a natureza das forças, a forma global, o design local e a qualidade do material. Segundo os autores, estes fatores determinam a geometria. No entanto, parâmetros adicionais, tais como padrão ou iluminação do material, irão influenciar outras características gerais como a flexibilidade, a integração, a continuidade ou a autotensão, envolvidos em alguns exemplos. Estes se configuram geralmente nas estruturas de pneus, conchas, árvores, teias e esqueletos. Entre estas, para os mesmos autores, as estruturas pneumáticas são as mais eficientes em termos de espaço / peso, sendo estabilizadas por si mesmas por terem um envelope dúctil tensionado, internamente pressurizado por um fluido e rodeado por um meio. Dessa maneira, são muito adaptáveis, tendo flexibilidade para mudar a sua forma com vistas a acomodar a geometria circundante (PEREZ-GARCIA e GÓMEZ-MARTÍNEZ, 2009). Para os autores, as estruturas finais da natureza, tais como ovos, ossos, esqueletos, conchas e teias, na maioria dos casos, resultam da solidificação de pneus.



**Figura 2:** À esquerda, Radiolária *Callimetra* desenhada por E. Haeckel (1872) com a forma de um tetraedro esférico e de superfície mínima e, ao centro e à direita, superfície mínima triplamente periódica

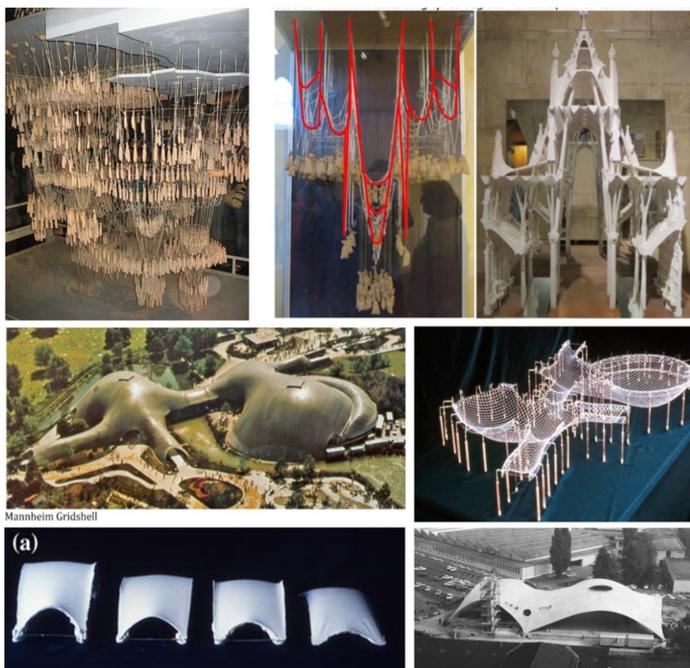
**Fonte:** à esquerda, Bertol (2011) e, à direita, <http://www.indiana.edu/~minimal/archive/Triply/genus3/PLines/web/index.html>

Estas estruturas pneumáticas se combinam para produzir grades ideais com comportamento de menos energia, sendo estruturalmente e energeticamente eficientes. Bertol (2011) destaca que se pode identificar na natureza a ocorrência de partições uniformes do espaço também associadas a alguns tipos de superfícies mínimas matemáticas, tal como a superfície de Schwarz, que é triplamente periódica. Ela se configura por translação de um elemento básico segundo uma grade regular (á direita da Figura 2). Osserman (1986) afirma que está é a única superfície mínima obtida por translação.

### A geometria de superfícies mínimas e seu emprego na arquitetura

Nos séculos XIX e XX Gaudi e Frei Otto utilizaram amplamente o princípio anteriormente descrito ao propor suas estruturas para arquitetura. Para Frei Otto, sendo o pneu o sistema responsável do crescimento, a forma definitiva é recorrente de um arranjo chamado de *funicular*, o qual é produzido pelas cargas no pneu flexível. Segundo Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009), este é um *processo tecnológico muito elevado de encontrar a forma ótima*. Tendo a propriedade de superfícies mínimas, as tensões superficiais são semelhantes em todas as direções, como foi experimentado nas tendas de tração de Frei Otto no século XX. Meio século antes de Otto, no final do século XIX, Gaudi, influenciado por tais ideias, trabalhou com modelos físicos para definir estruturas *funiculares*, com o objetivo de conceber projetos de estruturas geométricas complexas e ao mesmo tempo de alto desempenho estrutural, como na Colônia Güell e na Sagrada Família (primeira linha da Figura 3).

No século XX outros arquitetos e engenheiros fizeram uso dos modelos funiculares, como Frei Otto para o Mannheim gridshell (BURKHARDT & BÄCHER, 1978) e Heinz Isler, que desenhou suas conchas de concreto com base em modelos de pano penfurado (CHILTON, 2000; 2017). Estes modelos e obras estão ilustrados respectivamente na segunda e terceira linhas da Figura 3.



**Figura 3:** Modelos funiculares empregados na arquitetura nos séculos XIX e XX

**Fonte:** <https://www.quora.com/What-is-Funicular-geometry-What-is-its-significance-in-Structures-in-Architecture>; Beraldo e Meirelles (2016, pág. 07); <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214399815300011>; Chilton e Chuang (2017).

O Main Station de Ingenhoven Architects é uma estação de passagem que conecta várias ferrovias no centro da cidade de Stuttgart, Alemanha. Segundo Burry & Burry (2010), a superfície da estação segue o uso de superfícies que são encontradas fisicamente pela suspensão de uma rede de corrente que irá conformar, após ser submetida à deformação pela gravidade, uma superfície mínima. A superfície encontrada para o projeto da estação foi posteriormente refinada por métodos de cálculo complexo utilizando um software de elementos finitos (FEM). O objetivo foi resolver duas questões principais (Burry & Burry, 2010): a primeira é a economia estrutural e material; e a segunda é a provisão de luz e ar para o vasto espaço subterrâneo, sem criar consumo de energia significativo ou poluição de carbono. Estas superfícies podem ser formadas em torno de um orifício, chamado “olho”, no qual um funil igual a um cálice é formado, resultando em uma unidade modular protótipo. Tal módulo permite combinar telhado, suporte vertical e abertura para o céu em uma única superfície mínima (Figura 5). Ao configurar um telhado de casca contínua, neste projeto possibilita cobrir todo o espaço subterrâneo, admitindo luz natural e ventilação em todos os lugares através dos olhos cálice. Burry & Burry (2010) descrevem que, para descobrir como múltiplos suportes de cálice e paredes de calha interagiriam juntos em uma estrutura contínua de telhado, foi construído um modelo de corrente física suspensa em forma de malha quadrilateral. Este modelo corresponde com o mesmo tipo de modelo desenvolvido por Frei Otto na década de 1960. A malha quadrilateral foi ancorada nos pontos alto e baixo com o objetivo de ser deformada sob seu peso próprio para dar uma forma em pura tensão. Quando invertida e feita rígida, esta mesma forma de superfície distribui forças na compressão pura, minimizando a profundidade e a necessidade de reforço de aço na estrutura da casca. A proposta em formato de “olho” e “cálice” se baseou em modelos de superfícies mínimas experimentados por Otto no Instituto de Estruturas Leves de Stuttgart (Figura 5, à esquerda), desde o ano de 1963, sendo este arquiteto o consultor técnico para a definição da superfície mínima da estação.



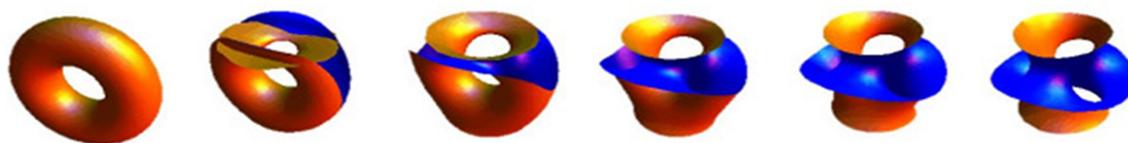
**Figura 4:** Na parte superior, o interior do Main Station Stuttgart, de Ingenhoven Architects, e uma seção da estrutura de superfície mínima; Na parte inferior, vistas externa e interna do Australian Wildlife Health Centre, do arquiteto Paul Minifie, Austrália, destacando-se a superfície mínima empregada

**Fonte:** <http://www.ingenhovenarchitects.com/projects/more-projects/main-station-stuttgart/?img=1>; <http://www.behmerwright.com.au/projects/australian-wildlife-centre-healesville/>; <http://www.archello.com/en/project/australian-wildlife-health-centre/image-2>.

A obra Australian Wildlife Health Centre (segunda linha da Figura 4) emprega outro tipo de superfície mínima, a qual se diferencia da superfície da estação de trem de Stuttgart por ter sido obtida por meio de formulações matemáticas. O matemático brasileiro Celso Costa obteve esta superfície em 1982, como resultado de seu trabalho de doutorado no Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA). De acordo com Burry e Burry (2010), esta superfície mínima possui três furos, com três oculi (aberturas redondas) que trazem a luz natural no pátio e que atuam como chaminés solares. Estas aberturas criam três clarabóias que são distribuídas uniformemente ao redor do principal espaço de visão do ambulatório. Topologicamente a superfície de Costa é derivada de um toro circular, em uma transformação em que três pontos do toro são lançados ao infinito (CARMO, 1987) conforme as imagens da Figura 6. Esta superfície possui três fins (relacionados às regiões onde os pontos são omitidos, ao ser configurada a superfície), sendo dois deles em catenoide e o terceiro planar.



**Figura 5:** Modelo funicular (de corrente de suspensão) de Otto proposto para o Main Station Stuttgart  
**Fonte:** <http://architecturehabitat.blogspot.com.br/2010/10/final-submission.html>.



**Figura 6:** A topologia da superfície de Costa a partir de um toro circular  
**Fonte:** <https://victordt.wordpress.com/2013/09/08/12/>.

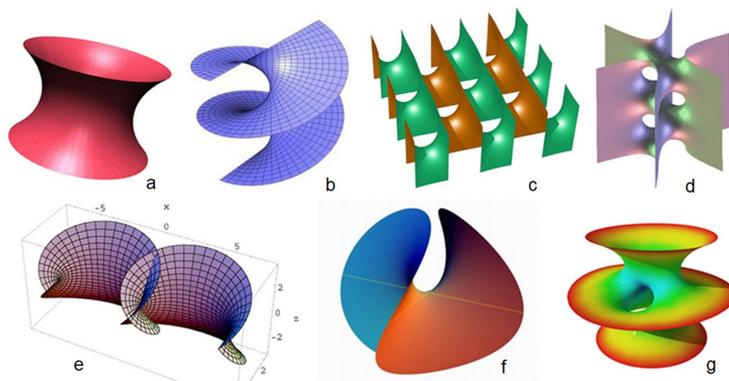
A teoria das superfícies mínimas evoluiu desde os primeiros estudos de Lagrange em 1760 e os experimentos de Plateau com bolhas de sabão para modelos mais complexos, encontrados principalmente nos séculos XIX e XX. A palavra mínima, segundo Carmo (1987), está relacionada com o seguinte problema proposto por Lagrange em 1760: Dada uma curva fechada  $C$  (sem autointersecções), achar a superfície de área mínima que tem esta curva como fronteira. Lagrange, no entanto, só conseguiu formular matematicamente o exemplo trivial do plano. A fórmula de Lagrange que permitiu esta definição não pode ser aplicada para encontrar a área mínima superficial para qualquer tipo de curva fechada, em uma generalização.

Em 1776, Jean Baptiste Meusnier, visando simplificar o problema apresentado por Lagrange e obter novos exemplos de superfícies mínimas, aplicou algumas condições à fórmula descrita por tal matemático, obtendo duas superfícies mínimas, as primeiras além do plano: o *catenoide*, superfície obtida pela revolução de uma curva *catenária* em torno de um eixo ortogonal ao eixo de simetria da curva (Figura 7a), e o *Helicoide*, gerado pela translação e rotação simultânea de uma reta apoiada em duas curvas hélices cilíndrica (Figura 7b). Para cada ponto no helicoide, existe uma hélice que passa através desse ponto. Mais tarde, Scherk provou que o *Helicoide* compartilha algumas propriedades interessantes com o *Catenoide*, tais como a habilidade de dobrar um no outro sem rasgar a superfície, sendo estas superfícies pertencentes a uma família associada.

Em 1834, Heinrich Ferdinand Scherk descobriu duas outras superfícies mínimas, que foram chamadas de Primeira Superfície de Scherk e Segunda Superfície de Scherk. A primeira superfície é duplamente periódica, enquanto a segunda é apenas individualmente periódica. As superfícies são conjugadas entre si (Figuras 7c e 7d).

Em 1855, como parte de seu trabalho sobre superfícies regulares mínimas, o matemático belga Eugene Charles Catalan criou uma superfície mínima contendo toda uma família de parábolas, agora chamada de *superfície mínima catalã* (Figura 7e).

Em 1864, Alfred Enneper descobriu uma superfície mínima conjugada a si própria, agora chamada *Superfície Enneper* (CARMO, 1987). Ela é uma superfície mínima completa com duas linhas retas em sua estrutura, sendo que esta superfície não é mergulhada, ou seja, ela possui autointersecção (Figura 7f).



**Figura 7:** Catenóide, Helicóide, Primeira e Segunda superfícies de Scherk, Superfície de Catalã, Enneper e Superfície de Costa

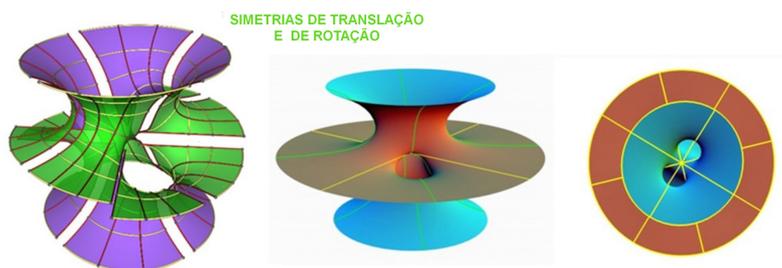
**Fonte:** <https://www2.le.ac.uk/departments/mathematics/extranet/staff-material/staff-profiles/kl96/stuff/lopez-ros-deformation-of-the-catenoid/view>; <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/helicoid.html>; <http://numod.ins.uni-bonn.de/grape/EXAMPLES/AMANDUS/GIF/towersym.gif>; [https://www.math.hmc.edu/~gu/curves\\_and\\_surfaces/surfaces/catalan.html](https://www.math.hmc.edu/~gu/curves_and_surfaces/surfaces/catalan.html); <http://www.indiana.edu/~minimal/maze/enneper.html>; <http://www.eg-models.de/models/7>.

Segundo Carmo (1987), as superfícies mínimas completas e de curvatura total finita nos permitem dar uma descrição razoável de sua estrutura conforme (relacionada à preservação na transformação topológica e conforme dos ângulos das curvas que se cruzam sobre a superfície), por isso a determinação de tais propriedades foi fundamental para a formalização de exemplos de superfícies mínimas. As condições de tais superfícies serem mergulhadas (sem autointersecção) e de curvatura total finita foram importantes para a obtenção no século XX de novas superfícies mínimas, pela possibilidade de simplificação no cálculo matemático que envolve suas formulações. Devido a isto, durante mais de cem anos foi buscado pelos matemáticos um terceiro exemplo de superfície mínima com estas condições. Até o ano de 1982 tal exemplo não havia sido obtido e as únicas superfícies mínimas com estas propriedades geométricas eram o plano e o catenoide.

O helicóide, embora se caracterize como uma superfície mergulhada, não possui curvatura total finita.

Segundo Carmo (1987), as superfícies mínimas completas e de curvatura total finita nos permitem dar uma descrição razoável de sua estrutura conforme (relacionada à preservação na transformação topológica e conforme dos ângulos das curvas que se cruzam sobre a superfície), por isso a determinação de tais propriedades foi fundamental para a formalização de exemplos de superfícies mínimas. As condições de tais superfícies serem mergulhadas (sem autointersecção) e de curvatura total finita foram importantes para a obtenção no século XX de novas superfícies mínimas, pela possibilidade de simplificação no cálculo matemático que envolve suas formulações. Devido a isto, durante mais de cem anos foi buscado pelos matemáticos um terceiro exemplo de superfície mínima com estas condições. Até o ano de 1982 tal exemplo não havia sido obtido e as únicas superfícies mínimas com estas propriedades geométricas eram o plano e o catenoide. O helicóide, embora se caracterize como uma superfície mergulhada, não possui curvatura total finita. O brasileiro Celso Costa, a partir do estudo de tais propriedades e das características dos fins da superfície para que ela não tivesse autointersecção, encontrou o terceiro exemplo procurado pelos matemáticos, uma superfície mínima que está ilustrada pela Figura 8g. Trabalhando com funções elípticas e a representação paramétrica de Weierstrass, desenvolvida em 1866, Costa definiu uma superfície como a primeira de gênero 1 com estas propriedades e equivalente conformemente a um toro circular. O gênero 1 da superfície relaciona-se a equivalência topológica do toro circular a uma esfera com uma alça, segundo Carmo (1987).

Estas e mais outras superfícies mínimas foram descritas entre os séculos XIX e XX, utilizando-se da geometria diferencial e do cálculo por variáveis complexas, além da descrição paramétrica de superfícies. No entanto, segundo Carmo (1987), estes desenvolvimentos matemáticos não permitiram encontrar uma solução global para a fórmula de Lagrange. Estes primeiros exemplos, exceto a de Costa, segundo Verzea (2012), integram superfícies mínimas cujas parametrizações são simples. O autor destaca que a superfície mínima descoberta por Celso Costa em 1982 possui uma parametrização bem mais complexa, mesmo pertencendo em álgebra ao mesmo grupo diédrico de simetrias. Enquanto Costa foi o primeiro a ter imaginado a superfície e tê-la descrito por meio de funções elípticas (CARMO, 1987), parametrizá-la seria muito difícil e a primeira parametrização teve que esperar até 1986 (VERZEA, 2012). Outra questão a destacar é que esta superfície só pode ser visualizada em 1986 quando David A. Hoffman e William H. Meeks inseriram uma descrição paramétrica em um programa de computação gráfica (CARMO, 1987). Em tal momento foi possível ‘ver’ a beleza da superfície e suas simetrias rotacionais e de reflexão (Figura 8).



**Figura 8:** Simetrias da superfície de Costa

**Fonte:** <http://www.indiana.edu/~minimal/archive/Tori/Tori/Costa/web/index.html>; <http://www.indiana.edu/~minimal/maze/costa.html>.

A inserção de atividades de representação gráfica digital de tais superfícies no ensino de arquitetura resulta ao mesmo tempo na sua compreensão espacial, dos seus entes fundamentais (curvas geratrizes e diretrizes) e dos seus processos de geração. Considera-se que tais atividades exemplificam concretamente o potencial que a configuração de tais superfícies possui para sua adoção no projeto de arquitetura. Na sequência, serão desenvolvidos processos de modelagem paramétrica destas superfícies com um enfoque didático para aplicação na arquitetura.

### **O reconhecimento de processos de modelagem paramétrica de superfícies mínimas**

Compreender a geometria complexa que conformam algumas superfícies presentes na natureza, tal como as de superfícies mínimas, é o primeiro passo para representar parametricamente estruturas naturais com potencial regenerativo para arquitetura. Tais modelos paramétricos de estruturas geométricas regenerativas podem ser usados para suportar: a atividade de análise de padrões que moldam as formas do local, no sentido de compreender como estes padrões influenciam os processos de regeneração; a avaliação de desempenho das estruturas quanto ao condicionamento térmico do edifício projetado; a proposição formal de estruturas em um processo generativo, alcançado por meio de técnicas paramétricas de representação digital (PIRES et al, 2016).

Para Bertol (2011), por meio dos modelos digitais se podem gerar vários níveis de complexidade em diferentes escalas do mesmo modelo. Neste sentido, tais modelos incorporam propriedades e atributos que podem definir uma forma não apenas em seus aspectos geométricos, mas também como uma configuração dinâmica que muda com o tempo, definindo-a quase como um organismo vivo. A autora entende que as representações computacionais contemporâneas trazem ideias para a interpretação das formas naturais. Devido a isto, a exploração de uma forma orgânica deve ir além do seu valor representacional, integrando o seu modelo computacional em vários aspectos, o que exige um conhecimento aprofundado de modelos (por exemplo, para simulações dos aspectos físicos em interação com geometria e materiais).

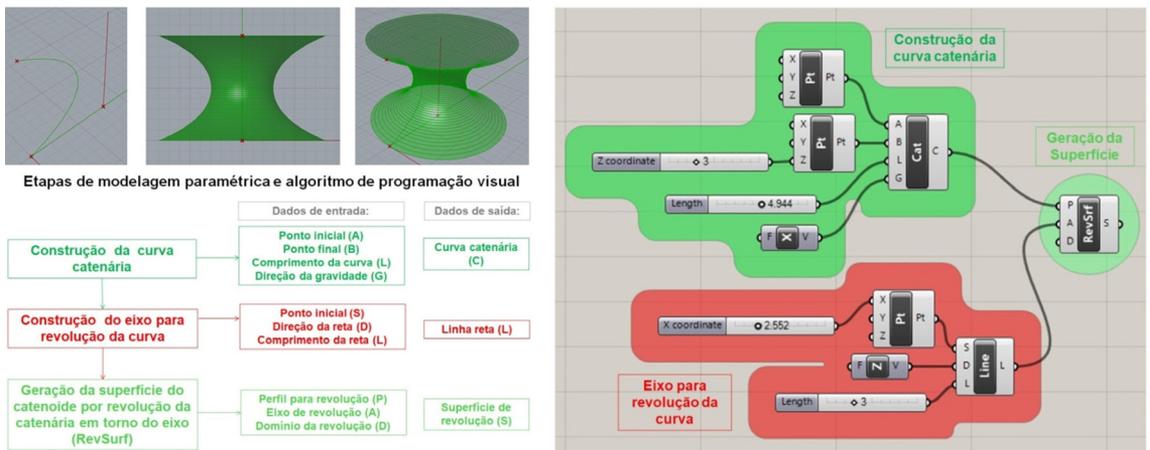
No presente trabalho, o estudo será focado na representação da geometria em seus aspectos conceituais. Para tanto, foram desenvolvidos processos de modelagem paramétrica da geometria de algumas das superfícies mínimas descritas na seção anterior: o catenoide, o helicoides e a superfície mínima descoberta por Costa. Desde que estas superfícies possuem propriedades interessantes do ponto de vista arquitetônico, considera-se que as suas representações paramétricas oportunizam explicitar uma estrutura de saber que auxilia a compreender a geometria complexa de estruturas regenerativas para arquitetura.

A modelagem paramétrica pode ser desenvolvida com base em vários tipos de representação, tais como: pelos elementos principais da superfície (geratrizes e diretrizes) e os processos de geração; por descrição paramétrica; e por simulação das condições físicas que as conformam (forças atuantes sobre a superfície, tais como de expansão e relaxamento aplicadas sobre superfícies topologicamente equivalentes ou sobre modelos funiculares de referência). Neste trabalho será abordado o primeiro tipo de representação, aquele em que as superfícies são conformadas por meio da modelagem de seus elementos principais e dos seus processos de geração.

## A modelagem paramétrica do catenoide de superfície mínima

O processo de geração do *catenoide de superfície mínima* foi definido anteriormente neste trabalho: é a superfície gerada pela revolução de uma curva catenária em torno de um de seus eixos, sendo este ortogonal ao seu eixo de simetria. Em função desta definição, o primeiro passo é representar a curva catenária que é a geratriz da superfície. Os seus parâmetros de representação são: os pontos inicial e final da curva (A) e (B); o seu comprimento (L); e a direção da gravidade (G), que se encontra no eixo Y, já que a curva foi orientada lateralmente para a revolução em torno de um eixo vertical.

A figura 9 ilustra as etapas do processo de geração do catenoide e a correspondente representação paramétrica por linguagem de programação visual, desenvolvida no *plug-in Grasshopper* junto ao software *Rhinceros*.



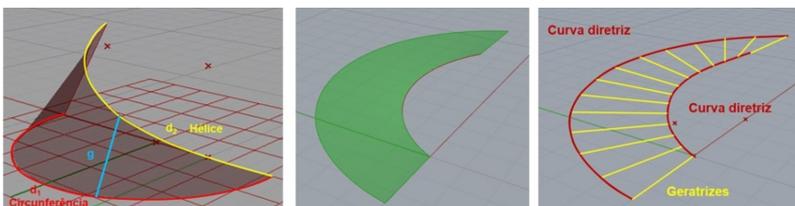
**Figura 9:** Modelagem paramétrica de um catenoide de superfície mínima

**Fonte:** Elaboração própria.

Em tal processo de modelagem são reconhecidos os elementos principais que integram a estrutura geométrica da superfície: a geratriz catenária, o eixo de revolução e o tipo de processo de geração, por superfície de revolução. O eixo de revolução foi definido por uma curva orientada (SDL) no eixo z (uma reta vertical) e a revolução (RevSrf) exigiu informar os parâmetros: perfil para a revolução (P), neste caso a curva catenária, o eixo de revolução (A) e um domínio (D), que é dado pelo ângulo de revolução, neste caso, 360°.

## A modelagem paramétrica do helicoides de superfície mínima

Os Helicoides (Figura 10) são gerados por uma reta que se apoia em diretrizes, sendo da classe de superfícies regradas (POTTMANN et al, 2007) ou denominada de retilíneas de acordo com a classificação de Gaspar Monge adotada em Rodrigues (1960). Nesta classe, se tem os helicoides desenvolvíveis e não desenvolvíveis, tendo-se nesta última subclasse o helicoides de superfície mínima ou helicoides de plano diretor.



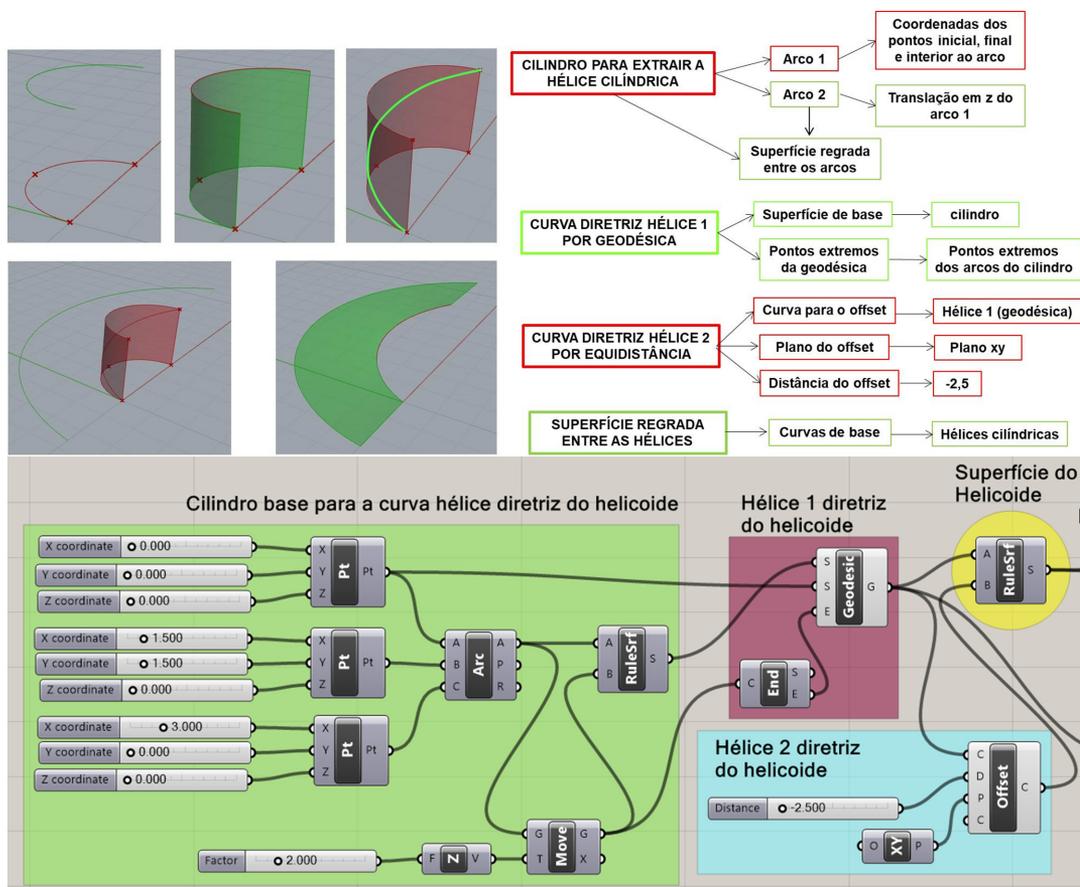
**Figura 10:** Processos de geração de helicoides: à esquerda, o helicoides desenvolvível, gerado por uma reta apoiada em uma diretriz hélice (d2) e uma diretriz circunferência (d1); ao centro e à direita, o helicoides não desenvolvível, gerado por uma reta e que possui somente diretrizes helicoides

**Fonte:** Elaboração própria com base em Rodrigues (1960).

Segundo Pottmann et al (2007), a *hélice* é uma curva descrita simultaneamente por movimentos de *translação* e *rotação*: os pontos que conformam a curva têm uma translação ao longo de um eixo z e uma rotação ao redor do mesmo eixo. As hélices se encontram configuradas sobre as superfícies de cilindros, cones ou esferas e, dentre estas, a *hélice cilíndrica* é definida como uma curva *geodésica* do cilindro, ou seja, o caminho mais curto entre dois pontos da superfície (POTTMANN et al, 2007).

Com o objetivo de otimizar o processo de representação da primeira *hélice cilíndrica* (diretriz do helicóide) e inserir o conceito de curva *geodésica*, esta curva foi encontrada diretamente sobre a superfície de um cilindro utilizando-se o componente *geodesic*. O cilindro foi modelado a partir de dois arcos deslocados um em relação ao outro no eixo vertical e a geração da superfície entre os arcos por superfície regradada (*ruled surface*). O resultado foi uma porção de superfície cilíndrica sobre a qual foi extraída tal curva geodésica entre dois pontos da superfície.

A segunda diretriz, outra curva *hélice cilíndrica*, foi obtida aplicando-se a transformação de equidistância (*offset*) sobre a primeira *hélice cilíndrica* representada. A superfície foi configurada ao aplicar-se a técnica de geração de superfície regradada (*ruled surface*) entre as curvas diretrizes. Na Figura 11 estão ilustrados o processo de geração do helicóide de superfície mínima e as etapas deste processo, em linguagem descritiva, contendo os parâmetros envolvidos em cada etapa. Na mesma figura está ilustrada a programação visual em Grasshopper para este processo de modelagem.



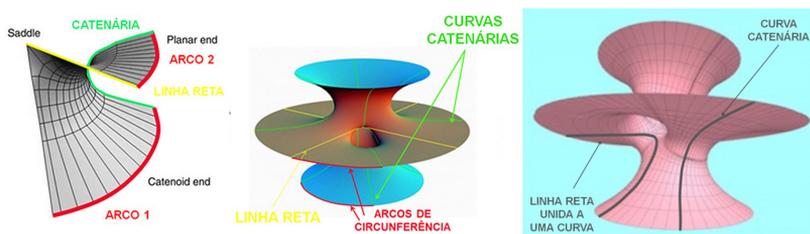
**Figura 11:** Etapas do processo de modelagem paramétrica, parâmetros envolvidos e programação visual em Grasshopper do helicóide de superfície mínima.

**Fonte:** Elaboração própria.

## A modelagem paramétrica da superfície mínima de Costa

A superfície de Costa possui três fins: dois deles são em catenoide e um deles é planar, existindo, portanto, linhas retas nesta superfície (CARMO, 1987). E ela possui simetrias de rotação e translação, conforme descrito anteriormente, o que indica a possibilidade de representá-la por intermédio do emprego de processos compositivos sobre uma porção fundamental da superfície. Anteriormente ao processo de modelagem, é necessário realizar uma análise da geometria desta superfície, o que foi feito por meio das seguintes atividades: identificação das simetrias das curvas geratrizes e diretrizes, a partir de imagens disponibilizadas na web e também diretamente sobre o modelo digital desenvolvido por David A. Hoffman e William H. Meeks, disponível em <http://www.eg-models.de/models/>.

Como curvas diretrizes da porção fundamental, identificaram-se dois arcos circulares e uma reta. Como curvas geratrizes desta mesma porção, identificou-se a existência de uma curva catenária inclinada 13 graus em relação ao eixo z e uma curva que se encontra unida a reta diretriz da porção (Figura 12).



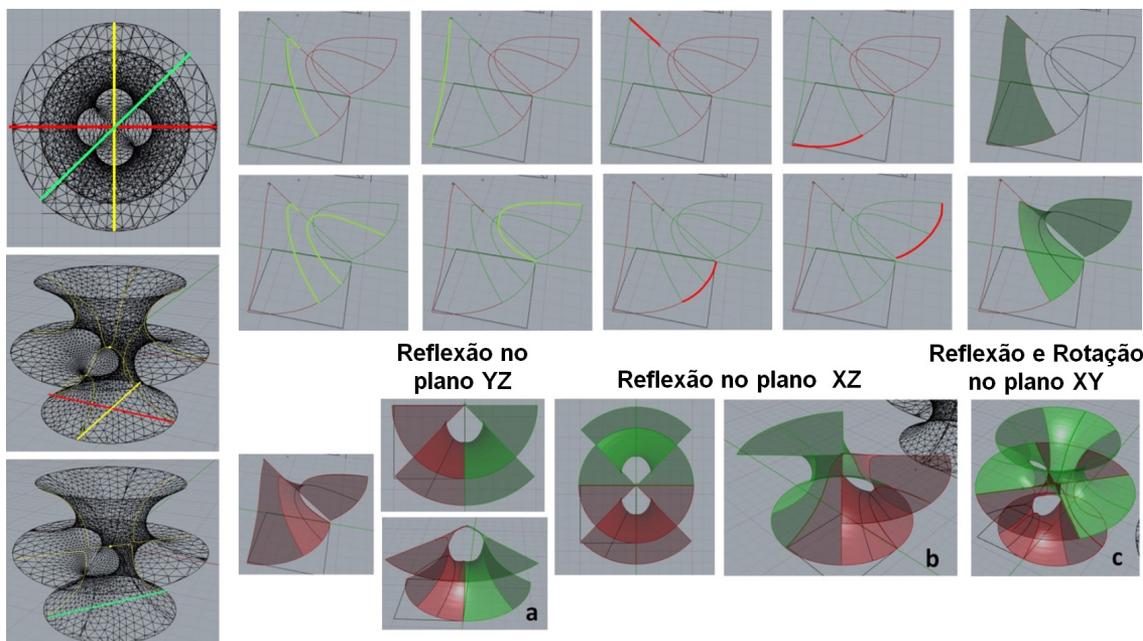
**Figura 12:** Curvas diretrizes e geratrizes da superfície mínima de Costa

**Fonte:** Elaboração própria a partir das imagens disponíveis em <http://www.indiana.edu/~minimal/essays/costa/index.html>; <http://www.indiana.edu/~minimal/maze/costa.html>; <http://profs.sci.univr.it/~baldo/tjs/costa.html>.

A primeira parte do processo de modelagem paramétrica é correspondente à representação das porções fundamentais da superfície de Costa, a partir de suas curvas geratrizes e diretrizes. A representação de tais curvas pode ser feita utilizando-se os componentes: arco (Arc), catenária (Cat); curvas NURBS (Nurbs); e reta (Line). O processo de geração da superfície pode ser obtido por aplicação de uma varredura de suas curvas geratrizes apoiadas nas diretrizes, empregando-se o componente Net surface, que representa gerar uma superfície a partir de uma rede de curvas. A superfície gerada é correspondente a uma porção fundamental da superfície, sobre a qual ao aplicar simetrias de reflexão e rotação, obtém-se a superfície completa de Costa.

A segunda parte do processo de modelagem paramétrica refere-se à representação das simetrias da superfície. A esta porção de superfície aplicam-se três transformações de reflexão (Mirror): a primeira no plano YZ; a segunda, no plano XZ; e a terceira no plano XY. Por fim, aplica-se, sobre uma das composições obtidas, uma rotação (Rotate) de 90 graus para completar a totalidade da superfície.

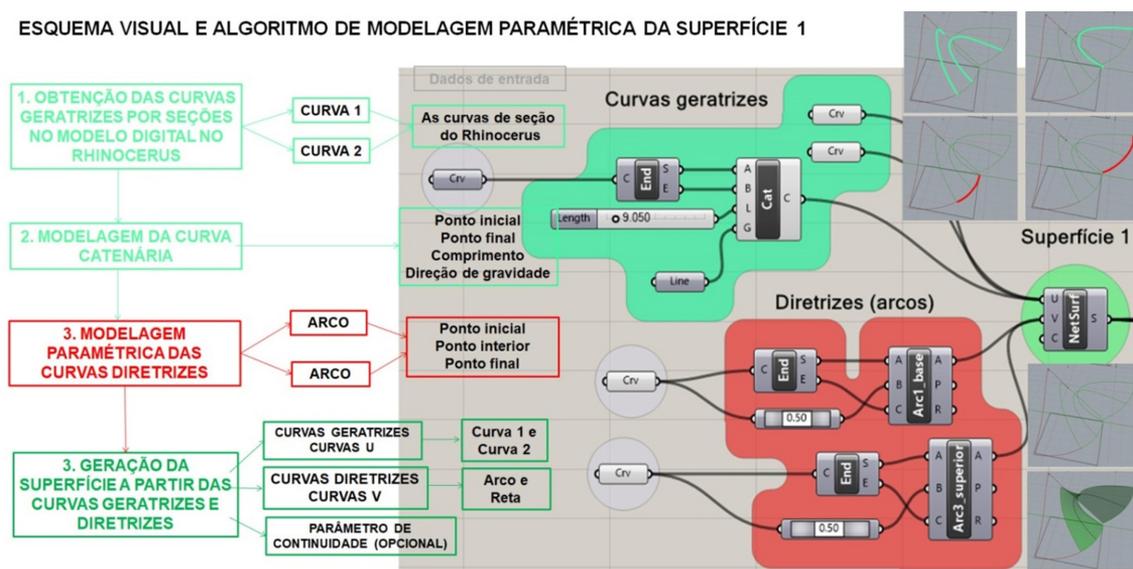
O processo completo de modelagem paramétrica está ilustrado nas Figuras 13 à 16. Na Figura 13, à esquerda, a extração das curvas geratrizes a partir de seções no modelo de Hoffmann e Meeks; na mesma Figura, na primeira e segunda linha, um esquema visual da modelagem das curvas e das porções fundamentais da superfície; ainda na mesma Figura, na terceira linha, outro esquema visual ilustrando as etapas da modelagem das simetrias da superfície. Nas Figura 14 e 15 estão ilustradas, em linguagem de programação visual, as etapas de modelagem das curvas geratrizes e das porções fundamentais de superfície, e na Figura 16, o processo de modelagem da superfície inteira por meio de suas simetrias.



**Figura 13:** Extração das curvas do modelo digital de Hoffmann e esquema visual das etapas do processo de geração das porções fundamentais da superfície mínima de Costa e de suas simetrias

Fonte: Elaboração própria.

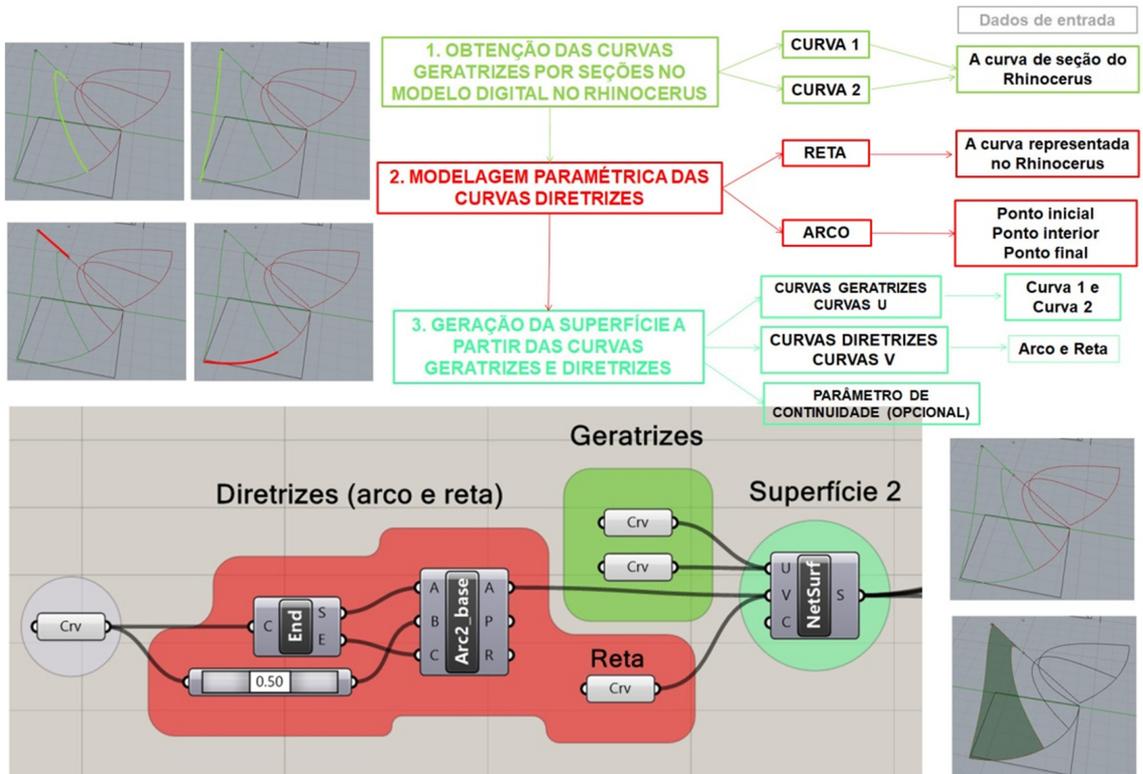
**ESQUEMA VISUAL E ALGORITMO DE MODELAGEM PARAMÉTRICA DA SUPERFÍCIE 1**



**Figura 14:** Etapas de modelagem paramétrica e programação visual em Grasshopper das curvas geratrizes e diretrizes da superfície 1 (porção fundamental da superfície mínima de Costa).

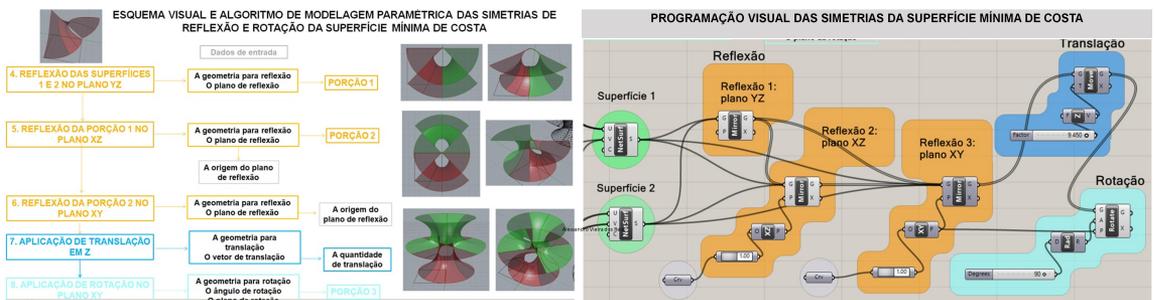
Fonte: Elaboração própria.

### ESQUEMA VISUAL E ALGORITMO DE MODELAGEM PARAMÉTRICA DA SUPERFÍCIE 2



**Figura 15:** Etapas de modelagem paramétrica e programação visual em Grasshopper das curvas geratrizes e diretrizes da superfície 1 (porção fundamental da superfície mínima de Costa).

**Fonte:** Elaboração própria.



**Figura 16:** Etapas de modelagem paramétrica e programação visual em Grasshopper das simetrias da superfície mínima de Costa.

**Fonte:** Elaboração própria.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sistematização de processos de modelagem paramétrica das geometrias associadas às estruturas naturais, apresentada neste estudo, foi possível ao aplicar-se uma teoria didática (CHEVALLARD, 1999), a qual toma por base o próprio saber como modelo de análise, considerando que este saber possui uma estrutura dinâmica formada por quatro elementos

fundamentais (problemas, técnicas, tecnologias e teorias), os quais devem estar presentes em atividades didáticas. Para a proposição dos processos de modelagem apresentados, foi necessário identificar estruturas de saber relacionadas às teorias e técnicas que possibilitam representar as geometrias presentes na natureza, as quais possuem propriedades regenerativas, como as superfícies mínimas. As teorias trouxeram novas estruturas de saber para uma maior compreensão de tais superfícies, principalmente no âmbito da matemática, da representação gráfica digital e do ensino de arquitetura. Conforme mencionado no referencial teórico, a explicitação de tais estruturas de saber é essencial para a estruturação de situações didáticas para arquitetura com foco na geometria complexa de potencial regenerativo e na modelagem paramétrica. Também são estruturas de saber que possibilitam aos estudantes terem uma maior compreensão dos processos de geração de tais geometrias e das ações projetuais dos arquitetos que as propõem em seus edifícios. Isto permite aos estudantes poderem refletir sobre seus próprios processos projetuais, ao ponto de selecionarem o refutarem conscientemente tais geometrias, sabendo como empregá-las.

O processo de reconhecimento de tais estruturas de saber apontou a necessidade de detalhar em um nível mais profundo algumas caracterizações apresentadas pelos autores de referência. Principalmente quanto aos tipos de curvas diretrizes e geratrizes de tais superfícies e os processos compositivos intrínsecos a suas simetrias. Embora as representações propostas não abordem saberes mais específicos de cálculo matemático, os quais envolveriam álgebra, funções ou descrição paramétrica de curvas, e a lógica de programação, estas podem ser consideradas importantes para explicitar estas geometrias espacialmente e em seus componentes fundamentais, atingindo objetivos didáticos.

As estruturas de saber que caracterizam os processos de projeto e as estruturas geométricas voltadas à regeneração e que foram apresentadas em Littmann (2009) e Bertol (2010), didaticamente, podem ser oportunamente associadas aos conceitos geométricos que envolvem as superfícies representadas. Segundo Pottmann et al (2007), tais estruturas de saber relacionam-se com o conceito de otimização e desempenho na arquitetura, os quais vem sendo empregados como requisitos projetuais principalmente em obras da arquitetura contemporânea dos últimos 20 anos.

Outra questão a destacar é que, para cada uma das abordagens estudadas, foram desenvolvidos mapas conceituais (estruturação do saber) como parte de uma rede de conceitos que foi constituída e disponibilizada em um ambiente virtual de apoio ao ensino de projeto apoiado por tecnologias digitais, a rede TEAR\_AD, da Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil (<http://www.tearad.ufsc.br/>). A estruturação e disponibilização de tal rede de conceitos inserem-se em uma pesquisa de doutoramento relativa ao estudo da geometria complexa recorrente na arquitetura contemporânea e sua transposição ao ensino de arquitetura, com foco nas superfícies matemáticas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009), a natureza desenvolve as suas estruturas a fim de alcançar sempre soluções energéticas ideais em longo prazo. O conhecimento sobre estruturas da natureza permite assim aprender sobre a morfologia ótima, integração funcional e eficiência, atributos relacionados com a sua geometria. Para Pottmann et al (2007) a realização de uma ideia de design de forma ótima é uma tarefa difícil e complexa, principalmente por sua formulação matemática e algorítmica, ainda mais tendo que levar em conta requisitos funcionais. O autor destaca que as abordagens centrada em curvas, superfícies e malhas muito bem conhecidas podem ser tomadas como possíveis soluções de problemas de otimização, os quais são associados diretamente às superfícies mínimas, merecendo atenção, de uma perspectiva arquitetônica. Além da abordagem

de curvas e superfícies, os modelos físicos que conformam superfícies mínimas ao serem estudados nesta perspectiva integrados a simulações digitais paramétricas por atuação de forças, permitem tratar com a relação entre forma e estrutura.

Como pesquisa futura e que se encontra em desenvolvimento no presente momento é ampliar o desenho de situações didáticas para além dos modelos matemáticos de superfícies mínimas (que foram alvo de experimentações didáticas desenvolvidas no ano de 2017, mas que não fazem parte do escopo deste trabalho), objetivando integrar a construção física (real) de tais modelos a sua modelagem paramétrica. Isto será feito obtendo-se tais modelos por meio da modelagem física com modelos de suspensão e por simulações digitais que integram as propriedades físicas a que tais superfícies ficam submetidas. As etapas de simulação digital destas condições e de conformação geométrica do modelo da obra Main Station Stuttgart (que utiliza um modelo de corrente suspensa de Frei Otto) já estão concluídas, sendo que a próxima etapa da pesquisa é a de estruturar as atividades didáticas que visam uma integração de tais tipos de simulações ao ensino do projeto de arquitetura.

Em relação aos aspectos didáticos visando à inserção no ensino de arquitetura, a explicitação das teorias e técnicas de modelagem paramétrica de tais geometrias oferece uma base teórica e tecnológica que pode ser considerada fundamental como conhecimento de projeto, principalmente na concepção da arquitetura direcionada as abordagens contemporâneas de design.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa em nível de doutoramento e ao CNPQ por apoiar o desenvolvimento da rede TEAR\_AD.

## REFERÊNCIAS

- ALLGAYER, R. Formas naturais e estruturação de superfícies mínimas em arquitetura. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 157 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/24723?show=full>> Acesso: maio 2017.
- BERTOL, D. FORM GEOMETRY STRUCTURE: from nature to design. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2011.
- BURRY, J.; BURRY, M. The New Mathematics of Architecture. London: ed. Thames e Hudson, 2010.
- CARMO, M. P. Superfícies Mínimas. Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada - IMPA, 1987.
- CHEVALLARD, Y. La Transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 2013. 3ª ed. 4ª reimp. Título original: La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné. Grenoble: Pensée Sauvage, 2ème édition, 1991.
- \_\_\_\_\_. El Análisis de las Prácticas Docentes en la Teoría Antropológica de Lo Didáctico. Recherches en Didactique de Mathématiques, Grenoble, Vol. 19, nº 2, pp. 221-266, 1999. (Traducción de Ricardo Barroso, Universidad de Sevilla). Disponível em: <<http://www.aloj.us.es/rbarroso/Pruebas/CHEVALLARD.PDF>>
- GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. Sustainable architecture: integration among environment, design and technology in research, design practice and education. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81 out./dez. 2006. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs>

br/index.php/ambienteconstruido/  
issue/view/289> Acesso em: maio 2015.

LITTMAN, J. A. Regenerative Architecture: A Pathway Beyond Sustainability. Dissertação de Mestrado. University of Massachusetts – Amherst. 2009. 68 p. Disponível em: <<http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1389&context=theses>> Acesso em: abril 2015

MONEDERO, J. Parametric design. (b) A review and some experiences. Automation in Construction, 2000. Disponível em: <<http://info.tuwien.ac.at/ecaade/proc/moneder/moneder.htm>> Acesso em: dezembro de 2014.

OSSERMAN, R. A Survey of Minimal Surfaces. 2. New York: Dover Publications, Inc. 1986.

PEREZ-GARCIA, A.; GÓMEZ-MARTÍNEZ, F. Natural structures: strategies for geometric and morphological optimization. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 28 September – 2 October 2009, Universidad Politécnica de Valencia, Spain. Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.)

PIRES, J. F. SILVEIRA, C. E. FIALHO, F. A. P. 2016. ARQUITETURA REGENERATIVA: O Ensino e Aprendizagem para uma Nova Concepção em Arquitetura. Travessias, 10 (2), p. 14-34. 2016.

POTTMANN, H. ASPERL, A. HOFER, M. KILIAN, A. Architectural Geometry. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press, 1ª ed., 2007.

RODRIGUES, Á. Geometria Descritiva: Projetividades, Curvas e Superfícies. 1a ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico Ltda., 1960.

THOMPSON, D. A. On Growth and Form. Cambridge: Cambridge University Press, 1971. 345 p.

VERZEA, A. Superfícies Mínimas. 2012. Disponível em: <[http://www.math.mcgill.ca/gantumur/math580f12/minimal\\_surfaces.pdf](http://www.math.mcgill.ca/gantumur/math580f12/minimal_surfaces.pdf)> Acesso em: abril 2017>

WOODBURY, R. Elements of Parametric Design. London: Routledge, 2010.

#### Notas:

<sup>1</sup> A Modelagem paramétrica é a descrição computacional de um modelo matemático com base em scripts, parâmetros e relacionamentos (MONEDERO, 2000).

Segundo Monedero (2000), o projeto paramétrico é entendido como um processo em que a descrição de um problema é criada usando variáveis. Ao alterar essas variáveis uma gama de soluções alternativas pode ser criada, com base em alguns critérios selecionados que levariam a uma solução final. Com este sentido, pode-se dizer que todo o projeto é paramétrico. O autor destaca que, em termos computacionais, é o processo de desenvolvimento de um modelo de computador ou a descrição de um problema de design, com uma representação baseada em relações entre os objetos controlados por variáveis, possibilitando gerar modelos alternativos. A seleção de uma solução é feita de acordo com alguns critérios, tais como o desempenho, a facilidade de construção, os requisitos de orçamento, as necessidades do usuário, estética ou uma combinação destes.

O projeto paramétrico permite a geração de soluções customizadas que podem ser prototipadas e avaliadas nas diferentes etapas do projeto de arquitetura. Segundo Monedero (2000), ele é entendido como um processo em que a descrição de um problema é criada usando variáveis. Ao alterar essas variáveis, uma gama de soluções alternativas pode ser criada, com base em alguns critérios selecionados de uma solução final, que podem ser relacionados com o desempenho, facilidade de construção, requisitos de orçamento, as necessidades do usuário, estética ou uma combinação destes. O autor destaca que, em termos computacionais, é o processo de desenvolvimento de um modelo de computador ou a descrição de um problema de design.

Para Woodbury (2010), sistemas paramétricos e de geração de formas permitem ter um maior controle das possibilidades de geração de geometrias complexas e um maior número de alternativas de projeto para avaliação e seleção do projetista.

Woodbury (2010, pág. 24) descreve que “o processo de criação de relacionamentos (necessariamente) requer uma notação formal e introduz conceitos adicionais que não tenham sido previamente considerados como parte do “pensamento de design”, podendo assim alargar o âmbito intelectual do projeto”.

<sup>2</sup>Uma superfície S é chamada completa se ela não possui pontos na fronteira que possam ser atingidos por uma curva em S de comprimento infinito. Intuitivamente, é aquela na qual se pode percorrer qualquer distância em qualquer direção sem sair da superfície. Fonte: Carmo (1987).

**Janice de Freitas Pires**  
janicefp@hotmai.com

**Alice Theresinha Cybis Pereira**  
acybis@gmail.com

# BONE-INSPIRED 3D PRINTED STRUCTURES FOR CONSTRUCTION APPLICATIONS

ARTIGO

Roberto Naboni<sup>1</sup>, Anja Kunic<sup>1</sup>

**ABSTRACT:** Overconsumption of resources is one of the greatest challenges of our century. The amount of material that is being extracted, harvested and consumed in the last decades is increasing tremendously. Building with new manufacturing technology, such as 3D Printing, is offering new perspectives in the way material is utilized sustainably within a construction. This paper describes a study on how to use Additive Manufacturing to support design logics inspired by the bone microstructure, in order to build materially efficient architecture. A process which entangles computational design methods, testing of 3D printed specimens, developments of prototypes is described. A cellular-based tectonic system with the capacity to vary and adapt to different loading conditions is presented as a viable approach to a material-efficient construction with Additive Manufacturing.

**KEYWORDS:** Functionally Graded Trabecular Tectonics; Digital fabrication; Additive Manufacturing; Computational Design; Biomimetics.

<sup>1</sup> CREATE Group,  
University of Southern  
Denmark - SDU - Unit of  
Civil and Architectural

---

## How to cite this article:

NABONI, R.; KUNIC, A. Trabecular Tectonics. 3D Printed Cellular Structures for Architectural Applications. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.14, n.1, p.111-124, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148496>

## Fonte de financiamento:

Declara não haver

## Conflito de interesse:

Declara não haver

**Submetido em:** 29/07/2018

**Aceito em:** 07/02/2019



## INTRODUCTION

### Material Scarcity

Overconsumption of resources is one of the greatest challenges of 21<sup>st</sup> century. The tremendous increase in the amounts of material that is being extracted, harvested and consumed in the last decades is bringing to the serious problem of material and resource scarcity (Fig. 1). Coal, oil and gas are not only becoming increasingly rare, but are also accelerating emergence of sensitive global crisis leading to climate change and exceeded CO<sub>2</sub> emissions. Even though the most usual associations to the pollution and CO<sub>2</sub> emission are cars and aeroplanes, these are not the crucial culprits. In fact, another area that is more critical and far more problematic is the building construction, which causes, directly or indirectly, 80% of CO<sub>2</sub> emissions. Therefore, architects are challenged to rethink the way of designing, building and confronting with the of materials in the built environment. New strategies are needed to adapt to the post-fossil age and make a crucial contribution to the ecological turnaround through the intelligent and looking-forward design, use of materials, technologies, recycling requirements and energy use.



**Figure 1:** Mirny diamond mine in Eastern Siberia, Russia

**Source:** Science Source.

### Improving resilience to material scarcity with biological models

Learning from nature and biological formations has become a meaningful and crucial approach for contemporary architects, especially for those who foster a future that does not compete with nature but coexists with it. As a response to the natural disasters worldwide, especially those geologically associated such as tsunamis and earthquakes, which have proven their destructive power over the current built environment, architects and structural engineers have found in biomimicry an ecological approach in order to improve future disaster resilience of the buildings.

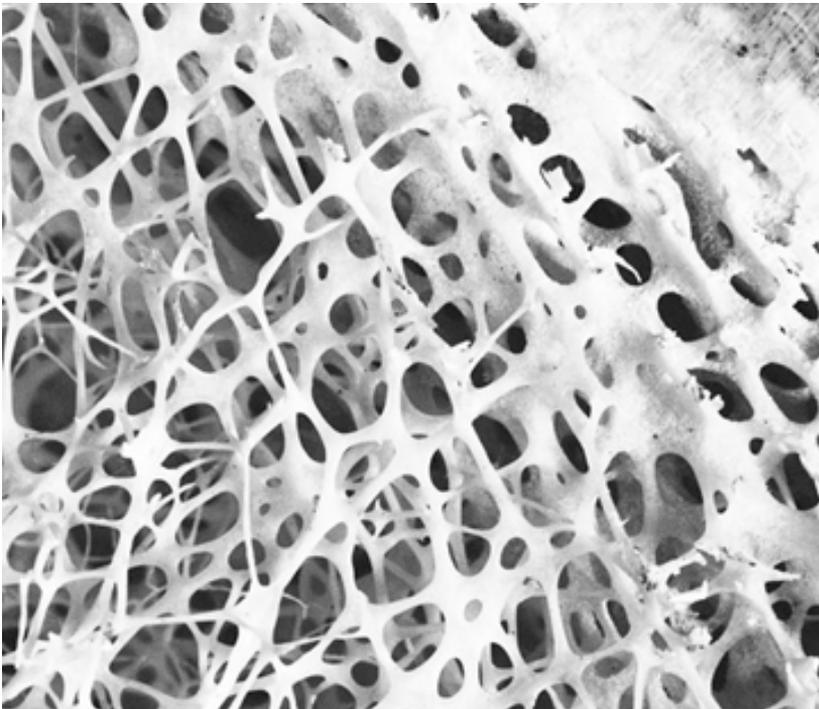
In his dissertation *Bio-Structural Analogues in Architecture*, Joseph Lim (2009) explains that *'the central to the development of architectural concept and design strategy is a form of technological thinking which drew inspiration from other forms of knowledge'*. Scientific insights in the technological solutions promoted by nature and their links to architecture has led to a bottom up approach for more resilient structural design. As D'Arcy W. Thompson (1945) wrote, every form in Nature is essentially a product of a set of forces acting on it. This technological feature of the living structures is a parameter that defines the level of resilience of their morphology, since their tessellation grows in intrinsic relationship with the ecosystem and the natural flows within it.

To overcome the problem of scarcity of resources, this paper focuses on describing an approach to material minimization in constructions, based on the investigation of cellular solids as a tectonic system in architecture that is based on a complex form articulation. In particular, this works is inspired by the hierarchical structure of bones as the most prominent example of lightweight and at the same time structurally efficient natural systems. Bone internal microstructure can be used as role model to conceive larger scale constructions, by means of computational design and Additive Manufacturing (AM).

### The efficient design of the trabecular bone

*When modern man builds large load-bearing structures, he uses dense solids: steel, concrete, glass. When nature does the same, she generally uses cellular materials: wood, bone, coral. There must be a good reason for it (Ashby 2000).*

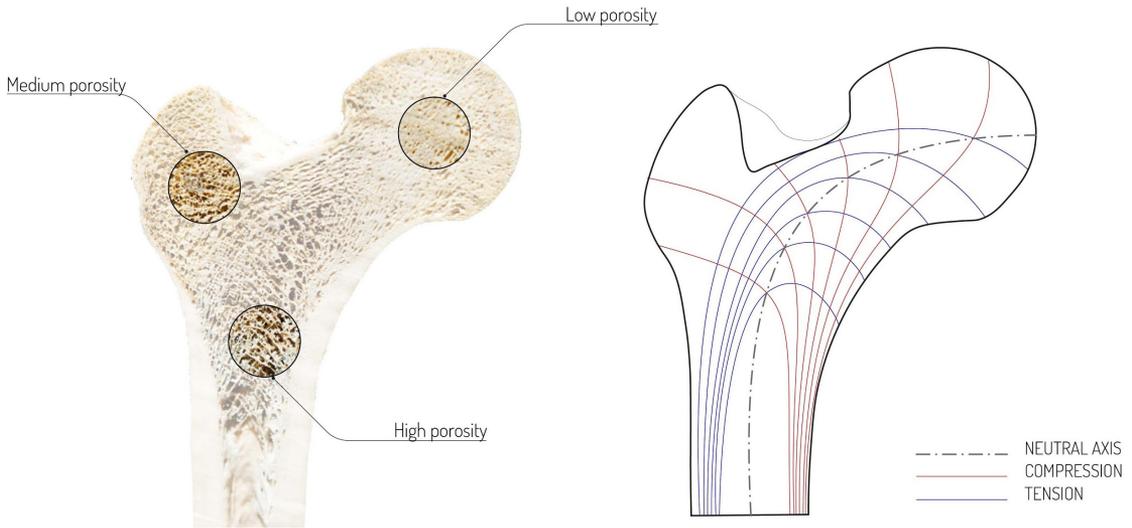
Natural organisms are based on coherent development of form, material and performance. Cell, as a basic construction unit and a fundamental form of life, has been widely explored since Robert Hooke discovered it and described it in his seminal work *Micrographia* (Hooke, 1665). Cellular structures in nature can be found in various configurations and scales. The different level of connectivity of cellular structures (topology) is the main parameter that influences the behaviour of the material or structure.



**Figure 2:** Type of of cellular structures found in nature: Open cell structure in cancellous bone

**Source:** Science Source.

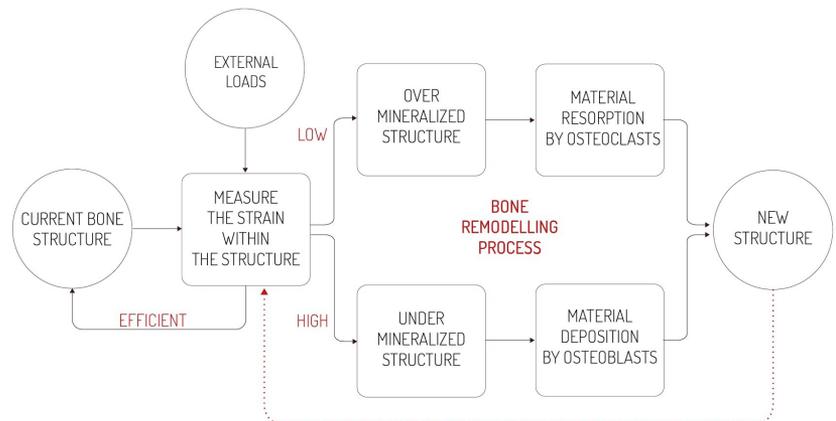
The high structural efficiency of the bone structure in particular relies on the internal microstructure (cancellous bone) (Fig. 2), based on cells named trabeculae, that are formed through an iterative and homeostatic load-responsive process. Here, an emergent latticework of fibers constitutes a cellular microstructure informed by its loading conditions, which varies in porosity and in orientation to align with the main stress trajectories to withstand both tensile and compressive forces (Benyus, 2002) (Fig.3).



**Figure 3:** Section of a human femur bone showing degrees of porosity according to a load-responsive material organization

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

The process of bone’s structural reconfiguration is called *Bone Remodelling Process*. Bone remodelling process is a continuous change and adaptation of the trabeculae based on the external loading conditions that are encountered within one’s life. More specifically, this process is subjected to the simultaneous action of two types of cells - osteoclasts and osteoblasts, that are evaluating local strain values within the trabecular structure of the bone and adding or removing material accordingly. High strain levels shows that the bone is weaker than desirable and osteoblasts will compensate by adding material in order to reduce strain. Analogously, excessively low strain levels show an unneeded over-mineralization, and the need for osteoclasts to remove material. The balance between these two processes therefore provides a converging point where function and structure are optimized (Turner, 2012). This specific formation process can be synthesized in an algorithm (Fig. 4) which constitutes the procedural base for the generation of the load-responsive cellular envelope tackled in this paper.



**Figure 4:** Algorithmic interpretation of the bone remodeling process

**Source:** Adapted from J.S. Turner, 2012.

An experimental skin system based on the lattice structure is implemented through the combined use of advanced computational design tools and Additive Manufacturing. Fundamentally, lattice structures are composed of an interconnected network of struts, pin-jointed or rigidly bonded at their connections (Ashby, 2005).

## METHODOLOGICAL PROCEDURES

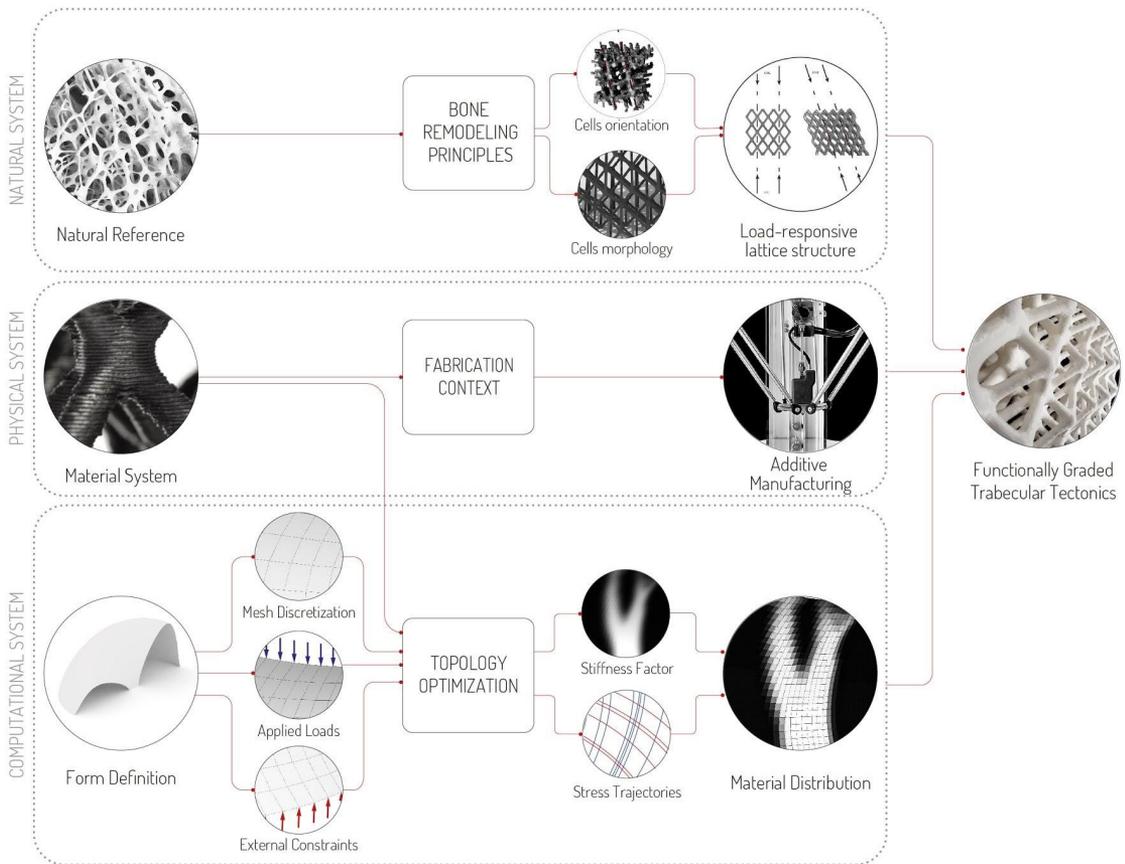
### Computational workflow

Specific logics referring to the process of bone remodelling such as informed variation of porosity, relative density and trabeculae orientation in relation to main stress trajectories are relevant for this study and implemented into a computational workflow for the design, optimization and fabrication of the so called *Functionally Graded Trabecular Tectonics* (Fig. 5). As in nature, the goal here is to provide a general methodology for sustainable materialization that is possible to be applied to an infinite variety of formal and loading conditions. This involves the elaboration of a customized computational workflows for the generation and materialization of load-responsive lattice structures. Analogous to the bone remodelling principles, an algorithm performs an iterative mechanical analysis of the overall form with the use of Finite Element Methods (FEM) to compute a highly refined material distribution of free-form building envelopes. The resulting layout is translated in an optimized lattice structure which, in common with the bone trabeculae, varies in porosity, topology and orientation according to the local stress values, and in size to best fit specific shape features. The main input parameters of this process are material properties and fabrication constraints of AM, overall geometry and loading conditions. Variations in any of these would generate different outputs. Morphological, material and performance information is read, analysed and modified iteratively.

What is a particular advantage of this approach is the possibility to be applied to a wide range of materials. Certainly, the mechanical properties of cellular structures are governed by those of the solid materials that they are made of, yet the most influencing parameter is their relative density and topological configuration. More precisely: form does matter, more than material. For this reason, the research focuses on the fabrication method of Fused Deposition Modelling (FDM) with thermo polymers - an additive process that ensures high formal complexity and control over material organisation, relative geometrical freedom and the use of weight and cost effective materials. This naturally profits from the fact that thermoplastic polymers can be modeled into any desired shape while preserving almost entirely their mechanical and thermal properties.

### Fabrication Setup

FDM Printers share common features and characteristics, however, professional applications of Additive Manufacturing are nowadays necessitating more and more specialization in terms of materials, design for fabrication and printer typology. Cellular constructions require discontinuous printing. While this technique is favouring the reduction of material usage, it is highly impacting on the printing sequence, where extrusion has to be continuously retracted and paused, with a large number of travels without material deposition. Typically, this condition is considered inefficient as the printing head is activated and deactivated. In spite of this, a clear advantage of this type of printing is that components are not influenced by warping. This happens when plastics cool down after the extrusion, and temperature gradient in the printing chamber are causing shrinkage. In this case, the reduced area/volume ratio of the components, and their porosity, eliminate completely this phenomenon - making it ideal for the use with any material.



**Figure 5:** Scheme of the overall design workflow, involving computational tools, fabrication procedures and material information

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

After several tests with different printers, it became evident that Delta Printers are an ideal match for this morphologies: because of their mechanics with minimal mass they are intrinsically, thus permit extreme travel speed for the production of discontinuous geometries such as the lattice structures. In this research, a new type of extruder with a larger nozzle of 1.2 mm that allows for larger shell thickness without the need of multiple extrusions per layer (Fig. 6).



**Figure 6:** Printing process of the lattice structure by Delta Wasp robot

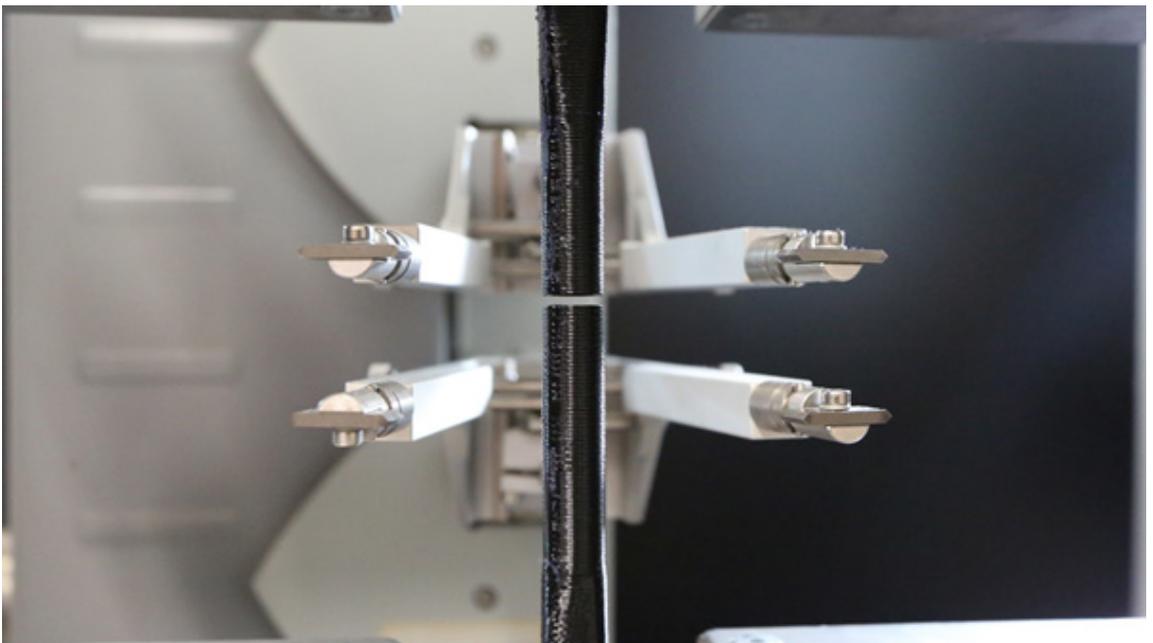
**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

The employed material is High Performance, biodegradable polymer with discrete mechanical properties which are leveraged by its superior printability. An extensive campaign of fabrication tests have been conducted with it to define print settings in relation to geometric constraints, printing time, printing resolution and mechanical resistance of the lattice microstructure. Material characterization was developed mainly through the tensile testing of custom made specimen that resembles the thinnest strut of the lattice structure i.e. diameter 10 mm with the hollow section of 1.4 mm thick walls (Fig. 7; Fig. 8).



**Figure 7:** The scheme shows dimensions and geometry of the testing specimen

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.



**Figure 8:** Tested specimen in tension after breaking

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

Among various aspects, an important one emerged in the necessity of evaluating models to be printed according to geometry limitations in overhanging angles, to avoid the need of support geometries with consequent inefficiency in the use of material. The relation between the deviation angle from the vertical axis and the number and thickness of shell elements is fundamentally driving the resolution and refinement of the production.

## Study on lattice cell typologies

As learnt from biological role models, cell is a basic construction unit and it plays the main role in the definition and characteristics of any cellular structure. In nature this is direct expression of material system, which accommodates the biological and mechanical needs of an organism. This implies that previously discussed geometrical constraints of FDM are the first to be taken into account in the critical evaluation for best structural and design solution. A comparative multicriteria analysis of typical three dimensional lattice cells is conducted to evaluate parameters such as printability, relative density and visual permeability. Eight typologies are analysed and shown in Fig. 9, each specimen being bounded in a 10 000 mm<sup>3</sup> cube with all struts having same cross section diameter of 10 mm.

For what concerns geometrical constraints and evaluation of overhanging angles, a critical threshold is set at 65° angle deviation from the vertical axis, as this has been established in some of the previous test and studies on printability with basic settings. All the angles below this value guarantee production speed and quality, whereas larger angles than this can be problematic. This problem becomes always more obvious as the printing layer height increases. From the eight evaluated cells, the octahedron (D) and diamond (E) cells show optimal features for FDM fabrication process as they have no horizontal elements and the angles between the struts can be kept out of critical range. In the Fig. 9 red color represents the critical struts.

In the observations regarding relative density values, large differences are highlighted ranging from the very low ones of 0.10 and 0.18 in the case of diamond (E) and (D) octahedron respectively, to the high values of 0.50 as in the case of octet (F) and tesseract (C). The higher relative density means more stiff structure as more than the half of a bounding box is occupied by the cell struts, however, the structure gets heavier and less permeable.

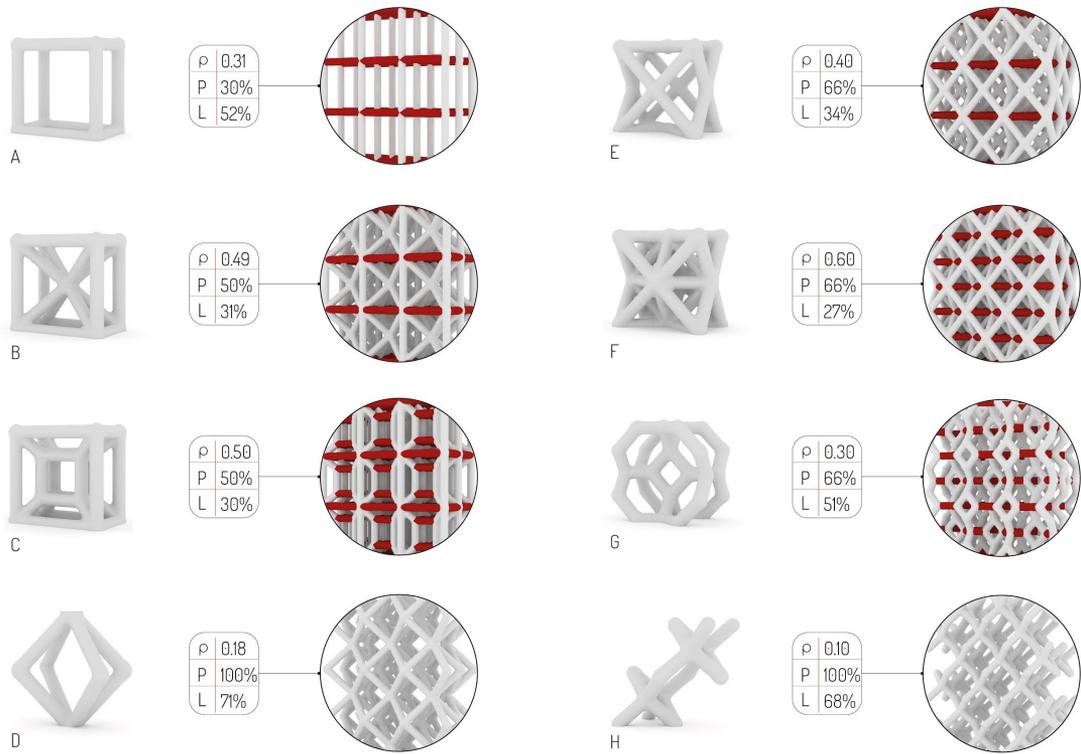
Last, but not least visual permeability is evaluated in respect to the projection of the unit cell on a vertical plane using a 30° angle of view. This analysis shows again very strong differences among the samples, with the dimension of projected areas ranging from 4 900 mm<sup>2</sup> to 12 100 mm<sup>2</sup>. Considering the projected area of the bounding box itself that results in 16 600 mm<sup>2</sup>, the octahedron with its area of 4 900 mm<sup>2</sup> obstructs about 1/3 of the visual field, while the octet cell with its projected area of 12 100 mm<sup>2</sup> blocks around 3/4 of the view.

Everything examined and summed up, octahedron cell has shown to be the most appropriate to guarantee a streamlined production while offering a degree of freedom allowing variable mechanical and visual features.

## Constructive Prototype with Octahedron Cells

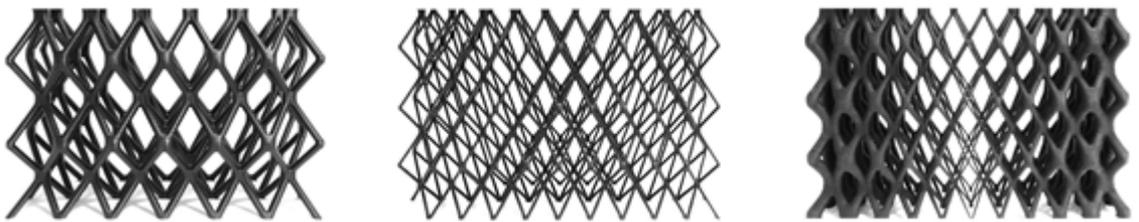
Scaling up towards the larger construction components, a further step was undertaken in order to evaluate stiffness, lightness and permeability at full scale according to variation in porosity (relative density). Larger samples of cellular structures have been manufactured inscribed within a 500 mm wide cuboid component (Fig. 10). Interestingly, same (or close enough) relative density can be reached with different cells size, and very different visual perception. Various configurations have been considered seeking for the geometrical limits and constraints of the lattice structure considering relationship between the cell size, strut thickness and cell angle.

While first experiments involved only regular geometries and standardized angles, further experiments went on testing doubly curved geometries (Fig. 11), cell deformation boundary conditions and varying material distribution. What was observed from these material experiments is that the critical angle of lattice cell is ranging from 45° to 75° from horizontal axis (printing plane). A 1 m tall and 0.5 m wide doubly-curved component was printed in order to verify such findings. Moreover, this component dimension was considered as optimal size for the building skin that is assembled out of larger number of lattice based components.



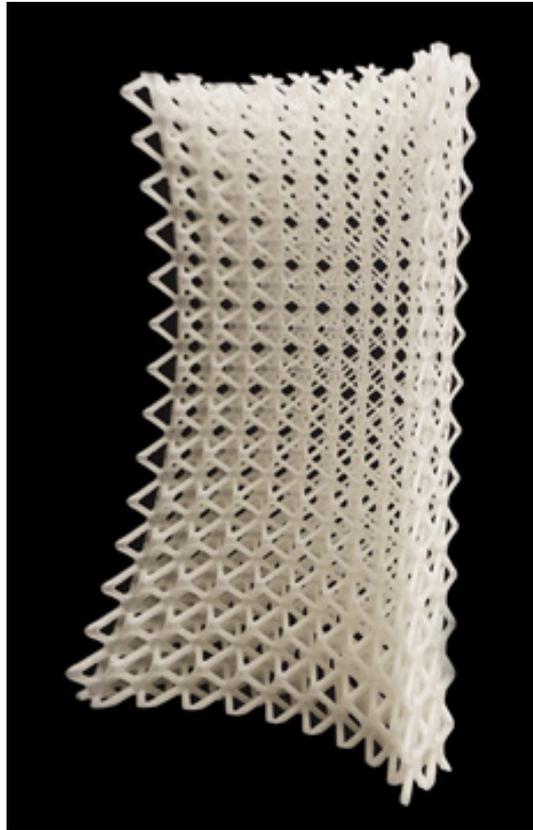
**Figure 9:** The image shows eight different unit cells typologies for the Cellular Lattice Structure and their observed characteristics; first column shows unit cell types: A - orthogonal grid, B - star, C - tesseract, D - octahedron, E - cross, F - octet, G - vintiles and H - diamond; second column shows the relative density ( $\rho$ ), printability (P) and light permeability (L); third column shows the repeated unit cell in a skin system, highlighting in red elements that are not possible to be fabricated with FDM.

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.



**Figure 10:** Constructive Prototype: Regular geometry components 500 mm wide with different relative density: from left -  $\rho = 0.04$ ,  $\rho = 0.05$ ,  $\rho = (0.04 \text{ to } 0.06)$

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.



**Figure 11:** Constructive prototype: Doubly-curved component 500 mm wide and 1000m tall

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

### Mechanical Performance of Octahedron Cells

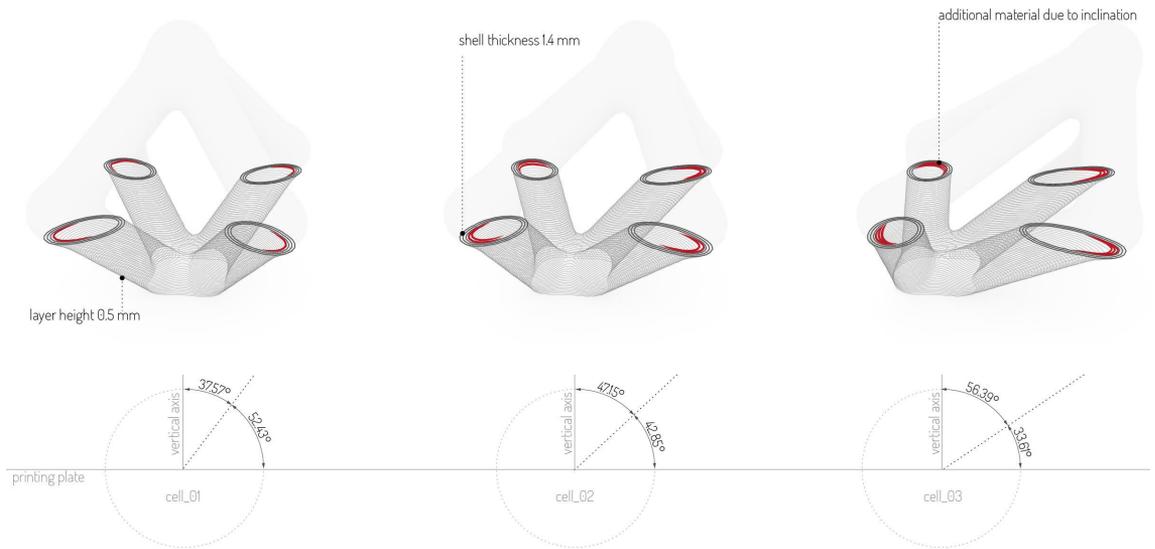
Consequently, a lattice brick with evaluated octahedron cells was tested in compression in order to measure its mechanical properties and structural behaviour (Fig. 12). The total weight of the brick was 185 g with the configuration of 2x2x2 (x,y,z) cells. The cell struts were designed under the angle of 60° and hollow cross section with the wall thickness of 1.4 mm. The test results shows compression resistance up to 3000 N load, about 1.600 times the weight of the structure.



**Figure 12:** Compression testing of the lattice bricks with octahedron cells

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

In the performed tests, the design of the cellular structure extends till the level of the individual layers in such a way that the layer thickness is not used equally along the various part of the structure. Different concurrent optimizations are provided to increase structural performance and improve printability of the cells. The main one is related to the anisotropic nature of 3D printed parts. Anisotropy is not to be considered necessarily as a problem, however, FDM has the constraint of printing with horizontal parallel layers. Since the optimization that involves varying layer orientation according to the orientation of the principal stresses is not possible, to compensate the fact that in certain part of the structure the layer orientation might be inconvenient, it is introduced a correction of the layer thickness in function of the inclination of the printed parts (Fig. 13). This helps either to improve the quality of printing when geometries are oriented with deviation angle from the vertical direction and, moreover, it is reinforcing the tensile and compressive capacities - essentially compensating the anisotropy of the material.



**Figure 13:** The scheme shows a correction of the layer thickness in function of the inclination of the printed parts

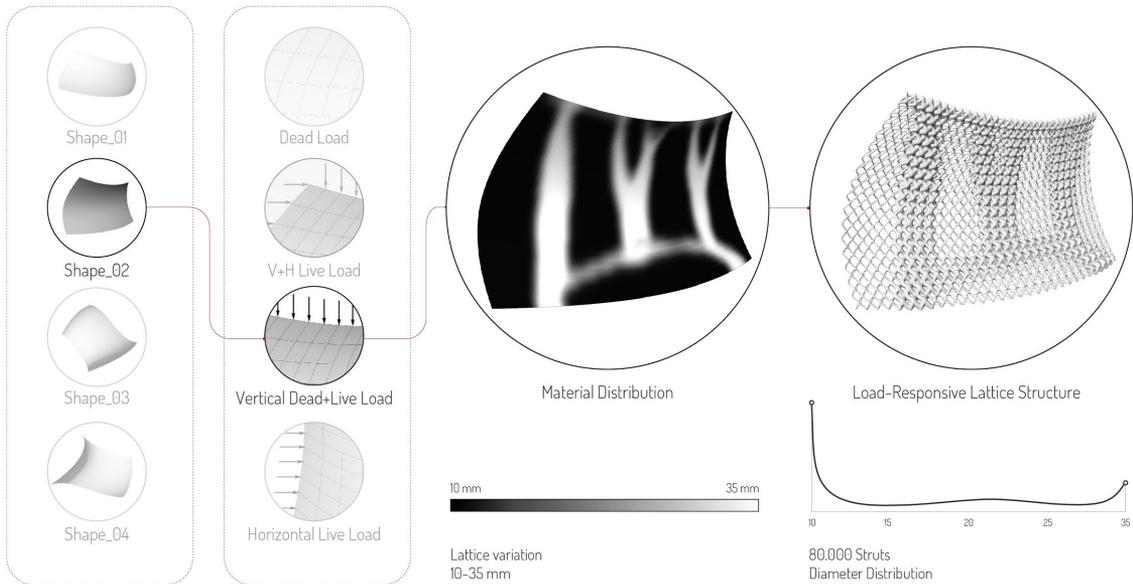
**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

## Design and fabrication of Functionally Graded Trabecular Tectonics

As discussed earlier, the *Functionally Graded Trabecular Tectonics* is a lattice-based structural system whose main characteristic is the ability to adapt and reconfigure based on variable loading conditions aiming at reaching the most optimized solution for the structural resilience. Similarly to the self-reconfiguration of the bone's trabecule, the lattice structure is defined in response to the stresses that are acting upon it, and therefore it can be called a load-responsive structure. The whole process of lattice generation and optimization is developed within the computational environment, through the set of algorithms tackling the geometrical, structural and fabrication constraints and seeking for the optimal solution that comprises all the parameters involved.

The use of Topology Optimization algorithms allowed the anticipation of the structural performance for different situations of mechanical changes and loading conditions. Most often TO is only used as a preliminary design tool which provides the designer with an insight into efficient structural layout for previously specified boundary conditions. Nevertheless, in this study the final TO output is used to directly inform the generation of a continuous lattice structure.

The TO is fed with two-dimensional free-form shapes which stand for a ‘draft’ of potential building envelope configurations, along with a description of some typical boundary conditions such as applied loads, support points and material properties. The algorithm is based on a *Solid Isotropic Material Penalization* (SIMP) method for material optimization and it iteratively computes stiffness values and allocates material along the given form in a multi-phase process which tends to converge to a 0/1 solutions. These are zones with lowest/highest density of material, which are represented with an interpolation of black/white color values respectively (Bendsøe and Sigmund, 2003). These obtained values are directly converted into *Functionally Graded Trabecular Tectonics* where mechanical behaviours provide the information to evolve a base polyhedron into highly defined cells with locally optimized size and orientation, struts diameter and cross section (Fig.14).



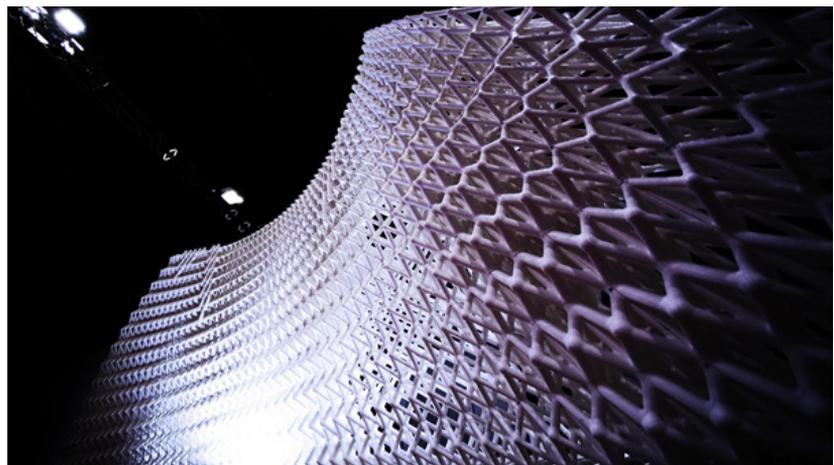
**Figure 14:** Workflow of the lattice cellular structure generation from the initial shape definition

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

Following described computational workflow and methods, and building upon previously developed research on additively manufactured building envelopes (Naboni et al. 2016; Naboni et al. 2017), a set of discrete components is fabricated and assembled in a full scale mockup, addressing construction and fabrication aspects of the load bearing lattice structure (Fig. 15).

**Figure 15:** Full scale mock-up of a 3D printed Load-Responsive Lattice Structure

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.



## RESULTS

The research develops a system for free-form building envelopes based on load-responsive lattice structures. The design process is inspired by the formation of cellular bone microstructure, in particular in the creation of gradients of porosity and cell orientation to improve the response to variable loading conditions and foster structural resilience. A novel algorithm-based workflow for the design of complex building skins is introduced. This is articulated in: an iterative procedure for FEM analysis of complex envelope shapes, which suggests optimal material distribution and a process of analysis of FDM material system to define base unit cell for the cellular system. Lattice samples at various scales are successfully prototyped and tested towards the validation of their application in construction. A final full scale mock-up is produced as a proof-of-concept for the load-responsive cellular envelope system, which highlights interesting properties in terms of weight to area ratio, equal to 11 kg/m<sup>2</sup>. This is compared with traditional construction skin systems for an intuitive analysis, showing a considerable mass reduction (Table 1). The employed material, High Performance PLA, exhibited ideal characteristics in terms of printability for such geometries, as well as good stiffness and impact resistance.

CONSTRUCTION SKIN SYSTEM	Plastered brickwork	Curtain wall	Balloon frame construction	Cellular concrete	Lightweight concrete	Precast concrete (hollow planks)	Load-responsive Cellular Envelope (mockup)
WEIGHT TO AREA RATIO (kg/m <sup>2</sup> )	339	68	73	142	268	36	11

**Table 1:** Weight to Area ratio values of typical construction skin systems in comparison with the realized mockup of Load-Responsive Cellular Envelope

**Source:** R. Naboni - CREATE Group.

## CONCLUSIONS

AM methods have undoubtedly introduced novel materialization processes, where logics of sustainability and efficiency typical of mass-production are no longer applicable. Unprecedented control, precision and freedom of this manufacturing allow the conceptualization of unseen architectural systems. Taking inspiration from the remodelling process of bones, a design methodology which adapts to different shapes and loading conditions is developed. The outcome of this process is an envelope system, which allows the creation of light-permeable load-bearing facades with reduced material usage. This experimental approach challenges current design paradigms of lightweight architecture: complex shapes are neither pre-optimized by shape, nor post-rationalized to meet manufacturing constraints. The system has been successfully tested in a laboratory setup. However, its implementation in operative conditions in buildings would require further developments in terms of material and fabrication equipment. This approach can be easily adapted to the use of metal 3d printing, to offer a more robust material option at current time. However, the rapid development of thermos-polymers for 3d printing with increased chemical, mechanical and weather resistance, offers interesting perspectives of application with FDM. Further development of this work will involve the testing in a relevant environment through a full scale architectural demonstrator, where a wider set of evaluative criteria are to be involved. In the long-time perspective, this research offers an alternative approach to the problem of scarcity of resources by shifting the design towards a higher scale of resolution, inferior to 1 mm. At this scale, nature prefers to operate by articulating material into complex formations to minimize the use of material. With this open perspective, complexity in architecture can be considered as a beautiful opportunity.

## REFERENCES

Ashby, M.F. (2005). The properties of foams and lattices, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, No.364, November 2005, pp. 15-30.

Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Hutchinson, J.W., Gibson, L.J. & Wadley, H. (2000). *Metal foams - a design guide*, Vol. 1, Butterworth-Heinemann.

Bendsøe, M. P. & Sigmund, O. (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods and Application*, Berlin, Springer.

Benyus, J. M. (2002). *Biomimicry. Innovation inspired by nature*, HarperCollins Publishers, NYS.

Hooke, R. C. (1665). *Micrographia: or Some Physiological Descriptions of Miniature Bodies Made by Magnifying Glasses*. London, England: Jo. Martyn, and Ja. Allestree.

Lim, J. (2009) *Bio-Structural Analogues in Architecture*. BIS publishers.

Naboni, R., Kunic, A. & Paoletti, I. (2016). Load-responsive skin systems for lightweight architecture. *Proceedings of 11th Conference on Advanced Building Skins*. Bern, Switzerland. October, 2016.

Naboni, R., Kunic, A., Breseghello, L. and Paoletti, I. (2017). Load-Responsive Cellular Envelopes with Additive Manufacturing. *Journal of Facade Design and Engineering*. Vol. 5, Special issue Powerskin. November, 2017. Pp. 37-49.

Thompson, D'Arcy W. (1945) *On Growth and Form*. University Press, Macmillan in Cambridge, New York.

Turner, J.S. (2012) Evolutionary architecture. Some perspectives from biological design. In *AD, Architectural Design: Material Computation*, No. 216, March/April 2012, pp. 28-33.

**Roberto Naboni**  
ron@iti.sdu.dk

**Anja Kunic**  
kunic@iti.sdu.dk

# AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS POLÍMEROS ABS E PLA EM IMPRESSÃO 3D VISANDO SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO ESTRUTURAL

Evaluation of mechanical behavior of ABS and PLA polymers in 3D printing for structural performance simulation

Andressa C. P. Martinez<sup>1</sup>, Douglas L. de Souza<sup>1</sup>, Denise M. dos Santos<sup>1</sup>, Leonardo G. Pedroti<sup>1</sup>, Joyce C. Carlo<sup>1</sup>, Marianna A. D. Martins<sup>1</sup>

**RESUMO:** Aplicações na Arquitetura, Engenharia e Construção estão ampliando o interesse da impressão 3D. No entanto, limitações da produção, dentre as quais inclui-se a performance estrutural, ainda impedem o uso significativo desta tecnologia. Neste sentido, este artigo apresenta parte da pesquisa de simulação e otimização estrutural e objetiva estudar o comportamento mecânico de polímeros ABS e PLA, sob a forma de filamentos termoplásticos, comumente utilizados em impressoras 3D de baixo custo. Ele apresenta os resultados preliminares de avaliação do comportamento mecânico do ABS e PLA, segundo as normas ASTM E2954 e ASTM D790, que estabelecem métodos para testes de compressão axial e flexão de três pontos para matriz plástica e polimérica. A partir dos ensaios destrutivos dos modelos físicos, vislumbra-se a criação de modelos numéricos estruturais, e a definição de novos algoritmos e componentes no *Grasshopper*, que facilitem a simulação computacional e otimização estrutural de peças, bem como a maior precisão de seu comportamento mecânico pós-produção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impressão 3D; Performance estrutural; Prototipagem rápida; Simulação computacional.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa - UFV

**ABSTRACT:** Applications in Architecture, Engineering and Construction are amplifying the interest of 3D printing. However, some manufacturing limitations, such as structural performance, still prevent the significant use of this technology. In this sense, this paper presents part of the research on simulation of structural performance, which aims to study the mechanical behavior of polymers ABS and PLA in the form of thermoplastic filaments (FDM- Fused Deposition Modelling), commonly used in affordable 3D printers. It presents the preliminary results for the evaluation of the mechanical behavior of ABS and PLA in the light of ASTM E2954 and ASTM D790 standards, which establish test methods for axial compression and three-point flexure for plastic and polymer matrix. Through destructive physical analysis, this research aims to create structural numerical models, algorithms and components in *Grasshopper*, which will be able to facilitate computational simulation and structural optimization of parts, as well the greater precision of its post fabrication mechanical behavior.

**KEYWORDS:** 3D printing; Structural performance; Rapid prototyping; Computational simulation.

## How to cite this article:

MARTINEZ, A. C. P.; SOUZA, D. L.; SANTOS, D. M.; PEDROTI, L. G.; CARLO, J. C.; MARTINS, M. A. D. Avaliação do comportamento mecânico dos polímeros ABS e PLA em impressão 3D visando simulação de desempenho estrutural. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.14, n.1, p.125-141, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148289>

**Fonte de financiamento:** CNPQ e CAPES

**Conflito de interesse:**

Declaro não haver

**Submetido em:** 17/07/2018

**Aceito em:** 21/02/2019



## INTRODUÇÃO

Segundo Haesuler et al. (2017), técnicas e materiais de manufatura aditiva estão evoluindo rapidamente na última década. Aplicações na Arquitetura, Engenharia e Construção estão ampliando o interesse da impressão 3D. No entanto, o custo do material, aliados a limitações da produção e dimensões dos modelos, bem como a performance estrutural (HAEUSLER et al., 2017; DRITSAS; CHEN; SASS, 2017; MATSON; SWEET, 2016 e CROLLA; WILLIAMS, 2014), ainda impedem o impacto significativo da aplicação da tecnologia de impressão 3D na produção de componentes de edificações.

De um modo geral, o uso da manufatura aditiva em Arquitetura e Engenharia, conhecida como impressão 3D, limita-se comumente à criação de modelos físicos com o propósito apenas representacional (RASPALL; BANÓN, 2016), devido à relativa baixa resistência das partes impressas em 3D. Neste sentido, esta investigação reúne pesquisadores dos campos de Arquitetura e Urbanismo e Engenharia Civil, com ênfase em projeto estrutural, e propõe-se a investigar a modelagem digital e a simulação de desempenho estrutural de componentes com geometrias complexas, produzidos a partir de impressoras 3D com filamentos aquecidos. O presente artigo apresenta os primeiros resultados dos ensaios destrutivos de diferentes corpos de prova, com o objetivo de conhecer o comportamento mecânico dos polímeros ABS<sup>1</sup> e PLA<sup>2</sup>, sob a forma de filamentos termoplásticos, comumente utilizados em impressoras 3D de baixo custo.

Segundo Divyathej, Varun e Rajeev (2016), a técnica de impressão com filamentos termoplásticos considerada neste trabalho, também conhecida como FDM (Fused Deposition Modeling), funciona a partir de um bico de extrusão, com aquecedores resistivos que derretem o plástico, expulsando-o para impressão de seções transversais do objeto, consecutivamente, até a finalização do modelo. A tecnologia de impressão por polímeros termoplásticos também cria um suporte para o modelo, que pode ser posteriormente dissolvido em diferentes tipos de soluções ou separado mecanicamente do objeto final. O controle da seção transversal para impressão, a espessura das camadas, densidade, dentre outros fatores, podem ser configurados em diferentes *software* para fatiamento da geometria.

Segundo Divyathej, Varun e Rajeev (2016), a qualidade da impressão 3D depende de diferentes fatores, como a espessura das camadas, orientação, o suporte e temperatura de impressão, bem como diferenças entre equipamentos. Cada um dos fatores influencia o processo completo de impressão 3D, e ainda devem ser confrontados com a fase de preparação do modelo, impressão e fase de pós impressão.

Adicionalmente, apesar de diferentes *software*, como o *Rhinoceros* e sua interação com o *Grasshopper*, constituir ambientes de simulação a partir de *plugins* de avaliação de desempenho estrutural como *Karamba*, *Millipede*, *Kangaroo*, *Scan&Solve<sup>TM</sup>*, dentre outros (HAEUSLER et al., 2017; CROLLA et al., 2017; MATSON; SWEET, 2016), ainda são necessários testes adequados para a compreensão do desempenho estrutural dos polímeros ABS e PLA sob a forma de filamentos aquecidos.

Neste sentido, esta fase da pesquisa visa lançar luz sobre este tema e auxiliar na validação de valores pré-existentes em *plugins* de simulação (como o ABS no *Scan&Solve<sup>TM</sup>*) ou auxiliar na inserção e ponderação das propriedades de resistência dos materiais utilizados nas impressoras de baixo custo mais comuns nos laboratórios de prototipagem e fabricação digital. Além do limitado conhecimento sobre o comportamento mecânico dos materiais poliméricos para manufatura aditiva, esta pesquisa parte também da hipótese inicial que as limitações de controle de qualidade, acurácia dos modelos finais, bem como acabamento e velocidade de impressão, inerentes aos diferentes modelos de impressoras 3D, também afetam o desempenho

<sup>1</sup> A sigla ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) significa Acrilonitrila Butadieno Estireno, em português. Trata-se de um copolímero termoplástico sintético, rígido e leve, derivado do petróleo, com facilidade de moldagem por injeção, extrusão, sopro e conformação ao calor. Permite adição de pigmentos, é reciclável e também possui propriedades de isolante elétrico.

<sup>2</sup> A sigla PLA (*polylactic acid*) significa Poliláctido láctico ou ácido poliláctico, em português. Trata-se de um polímero termoplástico, constituído por moléculas de ácido láctico, biodegradável e reciclável.

estrutural dos protótipos, e estes dados serão confrontados e ponderados ao final da investigação.

De fato, segundo Haeusler et al. (2017), em uma escala de produção mais ampla, antes da introdução da manufatura aditiva em escala industrial ou no processo de construção, testes adequados de materiais, ensaios estruturais, códigos e normas, precisam ser revistos. No entanto, as limitações atuais não reduzem o potencial para o desenvolvimento e aprimoramento futuro da tecnologia (NABONI; PAOLETTI, 2015).

Neste sentido, este artigo visa apresentar os resultados preliminares da avaliação do comportamento mecânico dos corpos de prova de material polimérico ABS e PLA, impressos por uma impressora 3D, submetidos a esforços de compressão axial e flexão, à luz das normas ASTM E2954 (ASTM E2954-15..., 2015) e ASTM D790 (ASTM D790-17..., 2017) que estabelecem parâmetros para execução de ensaios de polímeros à compressão axial e à flexão em três pontos, respectivamente.

## METODOLOGIA

O procedimento metodológico da pesquisa completa possui quatro fases: (1) ensaios destrutivos de corpos de prova fabricados com os polímeros ABS e PLA para aferição do comportamento mecânico dos materiais; (2) desenvolvimento da modelagem de componentes com geometrias complexas a serem impressos em 3D; (3) simulação e otimização na micro-escala de peças, segundo metodologia de Haeusler et al. (2017) e Crolla et al. (2017), a partir da utilização de *plugins* disponíveis para o *Grasshopper*<sup>3</sup> como *Karamba*, *Millipede*, *Kangaroo* e *Scan&Solve*<sup>TM</sup>; (4) simulação e otimização da macro-escala do sistema estrutural, segundo metodologias de Haeusler et al. (2017), Crolla et al. (2017) e Matson e Sweet (2016), utilizando *plugins* como *Karamba*.

Esse artigo trata especificamente da fase inicial da pesquisa, caracterizada por ensaios destrutivos de esforços de compressão axial e flexão, impressos prioritariamente no modelo de impressora 3D Cubex Duo, com área de impressão de 20 cm<sup>3</sup>. Por se tratar de uma pesquisa em andamento, os primeiros resultados foram publicados parcialmente (MARTINEZ, et al., 2017) para corpos de prova com malha interna em 45o, considerado mais resistente em performance estrutural em comparação aos exemplares com malha interna de 0o e 90o (LETCHER, WAYTASHEK, 2014). Este artigo visa, então, ampliar os resultados a partir da impressão de corpos de prova maciços, comparando-os. Em ambos, o método de modelagem e impressão inclui:

(a) estudo da otimização do rendimento da matéria-prima (filamentos termoplásticos ABS e PLA), e a relação entre o consumo, velocidade e tempo de impressão, dimensões dos modelos, massa e densidade do material;

(b) qualidade de acabamento e precisão do modelo de acordo com as espessuras estabelecidas pela impressora (0,1 mm; 0,25 mm ou 0,5 mm);

(c) otimização de material e controle das malhas estruturais internas geradas e malhas de suporte, no caso de corpos de prova maciços;

(d) estratégias de finalização e pós-produção do modelo;

(e) geração de arquivos .STL e a análise qualitativa de modelos criados através dos software *Rhinoceros* e *SketchUp*;

(f) impressão de corpos de prova cilíndricos e prismáticos para ensaios destrutivos em dimensões e quantidades definidas pela equipe de análise estrutural;

<sup>3</sup> Nesta etapa, vislumbra-se a criação de modelos numéricos estruturais a partir dos ensaios destrutivos dos modelos físicos, que permitam a definição de algoritmos e componentes no *Grasshopper*. Nessas fases subsequentes da pesquisa, não tratadas por este artigo, vislumbra-se a adoção do *Grasshopper*, uma linguagem de programação visual livre, cuja interação com o software *Rhinoceros* permitirá a produção de geometrias complexas e paramétricas. Este será adotado devido à possibilidade de associação a *plugins* de análise estrutural e a outras linguagens de programação, como *python*, para a criação de modelos numéricos estruturais. Os *plugins* de análise estrutural *Karamba*, *Millipede* e *Kangaroo* serão adotados por serem livres e recorrentemente citados na literatura, do mesmo modo que o *Scan&Solve*<sup>TM</sup>, porém este com uso por tempo limitado.

(g) avaliação do comportamento mecânico dos corpos de prova, submetidos a esforços de compressão axial e flexão, à luz das normas ASTM E2954 (ASTM E2954-15..., 2015) e ASTM D790 (ASTM D790-17..., 2017) que estabelecem parâmetros para execução de ensaios de polímeros à compressão axial e à flexão em três pontos, respectivamente;

(h) conclusões preliminares dos ensaios destrutivos.

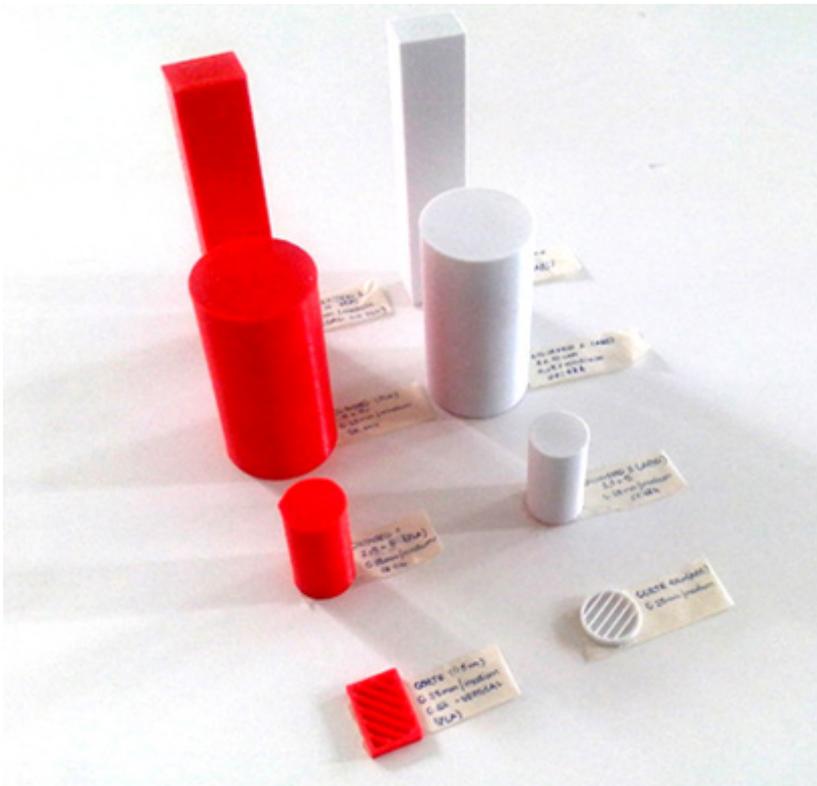
## IMPRESSÃO E ENSAIOS

Esta seção descreve a preparação do experimento, no que se refere às etapas de impressão e de ensaios destrutivos. A etapa de impressão refere-se ao número de corpos de prova, definição das dimensões das geometrias impressas, software utilizado e espessuras de camadas testadas. Apresenta também a descrição dos ensaios destrutivos, segundo os métodos de compressão axial e de flexão a três pontos, no que se refere aos equipamentos utilizados, os esquemas de montagem e os métodos numéricos para avaliação do comportamento mecânico dos filamentos ABS e PLA.

### Impressão

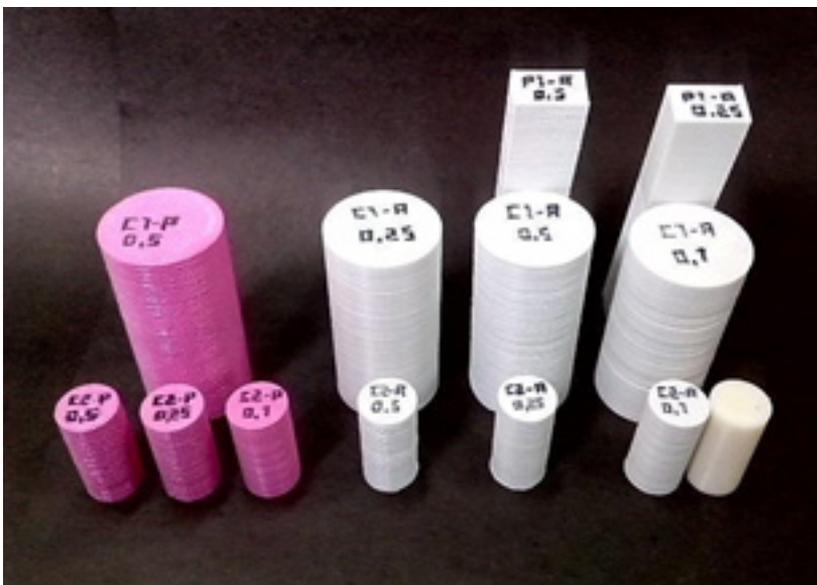
Como resultado da fase da impressão 3D, foram produzidos para os ensaios destrutivos três conjuntos com sete corpos de prova, formatados pelo *software Cubify*, padrão da impressora 3D *Cubex Duo*, com malha interna gerada automaticamente para otimização do consumo de matéria-prima, redução de custos e tempo de impressão. Durante o processo, percebeu-se a impossibilidade de impressão de corpos maciços no *software Cubify*, já que este definiu automaticamente uma malha interna estrutural, para a otimização do material. Por este motivo, adicionalmente foram formatados dois conjuntos com sete corpos maciços, a partir do *software* livre *KISSlicer*, com o maior controle de camadas e suportes.

Cada conjunto era caracterizado por três paralelepípedos (3,0 cm x 2,0 cm x 15,0 cm) e quatro cilindros nas dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, e 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, impressos nos filamentos PLA e ABS. Os paralelepípedos foram produzidos em seus eixos vertical e horizontal, para verificar a possível influência da orientação das fibras no desempenho estrutural. Os corpos de prova com malha estrutural interna foram impressos com espessuras de 0,1 mm, 0,2 mm e 0,5 mm (segundo o padrão da impressora *Cubex Duo*), densidade média e sem nenhum suporte, enquanto os maciços foram produzidos na mesma configuração, embora encapsulados por uma pele de suporte (Figuras 1 e 2).



**Figura 1:** Os corpos de prova impressos verticalmente, com malha estrutural interna gerada pelo software *Cubify*, foram identificados por cores (laranja PLA e branco ABS) e respectivas configurações de impressão

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).



**Figura 2:** Os corpos de prova maciços, impressos verticalmente, foram identificados por cores (magenta PLA e branco ABS), e respectivas configurações de impressão

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Adicionalmente, foram impressos diversos cilindros com dimensões de 2,5 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura nas impressoras de baixo custo, RepRap e Prusa i3, e um único protótipo na impressora profissional Dimension 1200 com camadas de 0,025 mm de espessura, exclusivamente no material ABS. A Figura 3 ilustra a diferença de qualidade de acabamento entre as impressoras de baixo custo (à esquerda) e as impressoras profissionais (à direita).



**Figura 3:** Comparação visual entre os cilindros em ABS.

À esquerda, cilindro impresso por impressora de baixo custo com espessura de camada de 0,1 mm e à direita, cilindro impresso com impressora profissional e camadas de 0,025 mm

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

### Ensaio Destrutivos

As propriedades mecânicas dos materiais podem ser caracterizadas por vários métodos de ensaio, dentre os quais foram adotados dois: os ensaios de compressão axial e de flexão a três pontos. O primeiro refere-se a um esforço crescente de compressão distribuído de maneira uniforme ao longo da seção transversal do corpo de prova, de modo a provocar o seu encurtamento longitudinal; o segundo caracteriza-se por uma carga concentrada crescente aplicada no centro do vão de uma barra bi apoiada, com o objetivo de fletir a peça em torno do seu eixo de maior inércia.

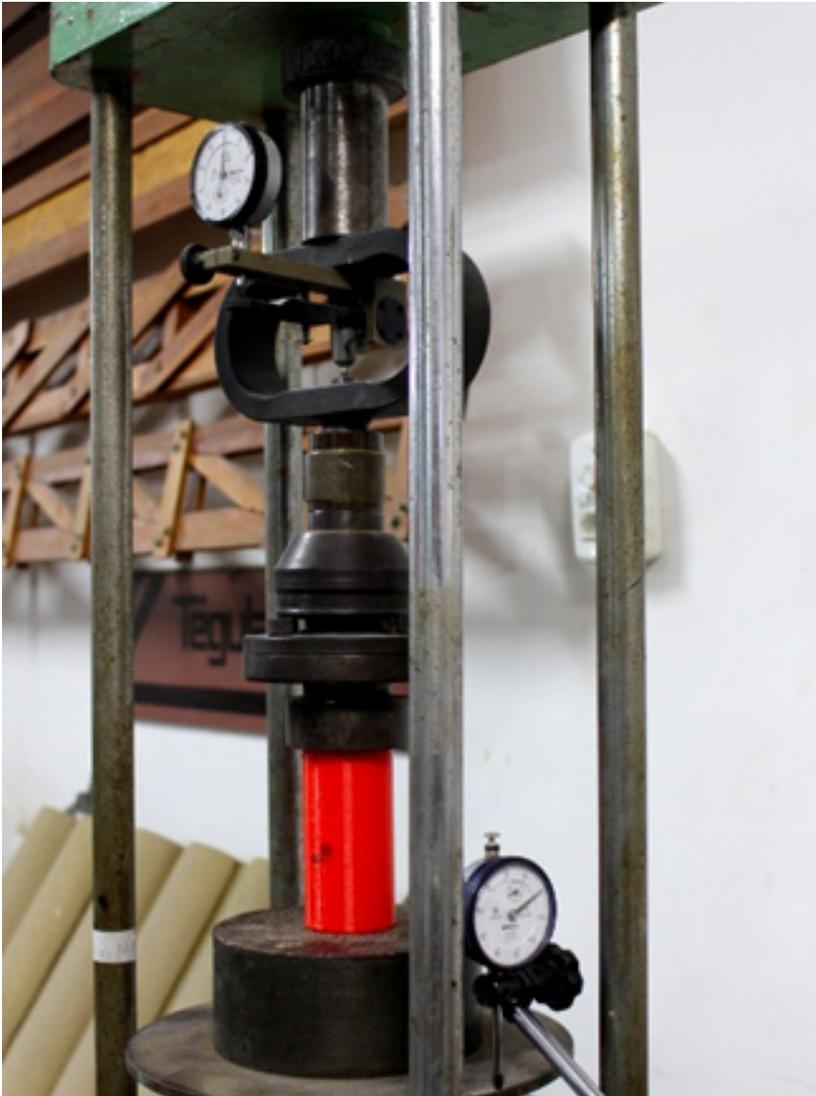
### Identificação

Os corpos de prova foram identificados de acordo com a procedência do material (ABS e PLA), a espessura das camadas de impressão (0.50, 0.25 e 0.10), e suas dimensões (comprimento, largura e peso), aferidas com auxílio de régua e balança de precisão de 0,1 g. Como identificação, os corpos de prova foram nomeados em “A”, para ABS e “P” para PLA, seguido do número de identificação da espessura de camadas, sendo 50 para 0.50mm, 25 para espessuras de 0.25mm e 10 para espessuras de 0.10mm<sup>4</sup>. Em seguida os corpos de prova cilíndricos foram submetidos aos ensaios de compressão, enquanto os paralelepípedos à flexão.

### Ensaio de compressão axial

Os corpos de prova cilíndricos foram centralizados na máquina de ensaios universal, utilizando dois extensômetros analógicos: um para a medição da carga e outro, para a medição do deslocamento da placa superior. A carga foi aplicada de maneira incremental e medida pelo extensômetro analógico de constante  $K = 692 \text{ kgf/mm}$ , com valores de deformação da amostra obtidos em intervalos de medição de 0,05 mm. A Figura 4 traz o esquema de montagem.

<sup>4</sup> A identificação P50, P25 e P10 designa as amostras de PLA com 0.50, 0.25 e 0.10 mm de espessura, respectivamente. Enquanto a nomenclatura A50, A25 e A10 identifica as amostras de ABS com 0.50, 0.25 e 0.10 mm de espessura, respectivamente.



**Figura 4:** Esquema de montagem das amostras para o ensaio de compressão axial

**Fonte:** Autores (OMITIDO PARA AVALIAÇÃO CEGA, 2017).

A tensão de compressão para cada incremento foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$\epsilon = \frac{P}{A} \quad (1), \text{ onde: } P = \text{Carga}; A = \text{Área da seção inicial.}$$

A deformação específica é dada pela equação:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (2), \text{ onde: } \Delta L = \text{Variação de comprimento}; L_i = \text{Comprimento inicial.}$$

### Ensaio de flexão em três pontos

Os paralelepípedos foram marcados no centro do vão e a 3 cm das duas extremidades, antes de posicionados na máquina de ensaios universal (Figura 5). A carga foi aplicada de maneira incremental e medida com o extensômetro analógico de constante  $K = 692 \text{ kgf/mm}$ .

A equação matemática para o cálculo do momento fletor máximo no centro do vão é dada em função da distância entre os apoios (L) e da carga aplicada (P):

$$M = \frac{PL}{4} \quad (3)$$

O momento de inércia para a seção retangular foi obtido através da relação:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4) \quad \text{, onde: } b = \text{dimensão da base da seção retangular,} \\ h = \text{dimensão da altura da seção retangular.}$$

O módulo de resistência da seção transversal retangular, representado pela letra W pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$W = \frac{I}{0.5h} \quad (5)$$

Por fim, a tensão de flexão na ruptura é dada pela equação:

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (6)$$



**Figura 5:** Preparação para o ensaio de flexão a três pontos

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

## RESULTADOS E ANÁLISES

Uma vez que o comportamento mecânico dos corpos de prova impressos em polímeros ABS e PLA possui relação direta com o controle de qualidade na etapa de impressão, os resultados aqui apresentados serão divididos em duas seções: etapa de impressão e ensaios destrutivos.

A primeira apresenta a análise das limitações existentes na etapa de pré-impressão (armazenamento de material), impressão (tempo de impressão e consumo de material, descolamento de camadas, dentre outros), e pós-impressão (comportamento e variações nos corpos de prova no ambiente). Por sua vez, em relação aos ensaios destrutivos serão apresentados os principais coeficientes de resistência dos materiais, de corpos de prova com malha interna e maciços, comparando-os.

## Impressão

A Tabela 1 identifica e compara os corpos de prova ABS e PLA (finalizados e posteriormente testados), de acordo com as espessuras, dimensões, massa e tempo de impressão. Conforme resultado esperado, os corpos de prova com malha para preenchimento interno possuem, em geral, menor tempo de impressão e consumo de material, em comparação aos modelos maciços. Do mesmo modo, o tempo de impressão aumenta à medida que a espessura da camada é reduzida. No entanto, para os modelos maciços, não há variação considerável de consumo de material à medida que a espessura de camada diminui.

		FORMATO	MASSA (g)		TEMPO (HH:MM:SS)	
			MACIÇO	MALHA	MACIÇO	MALHA
ABS (mm)	0.50	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,67	10,64	1:03:00	0:35:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	205,81	58,36	7:31:00	2:18:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	94,59	38,41	4:00:00	1:49:00
	0.25	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,78	8,67	2:06:00	2:04:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	206,24	46,97	15:02:00	3:45:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	94,99	32,17	8:00:00	2:58:00
	0.10	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	25,83	10,2	5:17:00	4:51:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	206,50	60,49	37:38:00	8:52:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	95,214	39,15	20:00:00	7:08:00
PLA (mm)	0.50	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,12	11,02	1:03:00	00:32:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	225,41	54,72	7:31:00	1:59:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	103,60	37,50	4:00:00	1:31:00
	0.25	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,23	12,18	2:06:00	1:02:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	225,88	67,62	15:02:00	4:27:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	104,04	43,86	8:00:00	3:33:00
	0.10	CILINDRO (2.50 X 5.00cm)	28,29	13,05	5:17:00	1:58:00
		CILINDRO (5.00 X 10.00cm)	226,17	71,90	37:38:00	8:42:00
		PARALELEPIPEDO (3.00 X 2.00 X 15.00cm)	104,28	47,22	20:00:00	7:04:00

**Tabela 1:** Comparação entre os corpos de prova maciços e com malha interna, no que se refere a massa (consumo de material) e o tempo de impressão

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Como as limitações das impressoras de baixo custo ainda são entraves para assegurar um rígido controle de resistência e qualidade uniforme dos modelos físicos. Além disso, sob as mesmas configurações de modelagem e controles de impressão (massa, densidade, tempo, temperatura, dentre outros), há também variações decorrentes das diferenças entre equipamentos. Abaixo descrevemos algumas limitações nas etapas de pré-impressão, impressão e pós-produção dos modelos.

### Etapa de pré-impressão

A variação de umidade do ambiente ocasiona pequenas variações dimensionais nos filamentos, decorrentes de fenômenos de retração e expansão, ainda no cartucho. Essa variabilidade foi ainda mais significativa no PLA, o que ocasionou maior facilidade de rompimento dos fios durante a impressão, gerando falhas de fluxo do material.

### Etapa de impressão

Peças maciças exigem maior atenção na configuração de parâmetros, sobretudo nas de menores dimensões. Os primeiros corpos de prova maciços apresentaram deformações causadas pelo extravasamento do preenchimento interno (Figura 6), interferindo diretamente nos resultados de resistência. A redução da espessura da camada de preenchimento interno, e inversamente, o espessamento da parede externa, foram essenciais para que os corpos de prova apresentassem um melhor acabamento. Além disso, ajustes constantes de temperatura, altura do bico e velocidade, contribuíram com a melhoria da série de corpos de prova.

No que se refere à integridade das camadas, as principais causas dos deslocamentos foram a variação de temperatura e as correntes de ar no ambiente de impressão. Assim, influenciaram o número de pessoas circulando, o fluxo de ar condicionado, a amplitude térmica durante um único dia, e a temperatura noturna baixa, principalmente no caso das impressões que atingiram 30 a 40 horas. Para minimizar o problema, a impressora *Cubex Duo* foi vedada lateralmente para evitar o fluxo de ar transversal à mesa, além da modelagem de uma casca externa ao modelo, para auxiliar a adesão das camadas. Objetos impressos sem a casca de proteção apresentaram problemas de descolamento da mesa, além da separação de camadas (Figura 6).



**Figura 6:** À esquerda, a camada indica extravasamento do material; os corpos de prova à direita possuem a casca de proteção criada para minimizar os problemas de impressão, decorrentes do descolamento das camadas

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Em impressões de longa duração (40 horas), as variações térmicas do ambiente são mais significativas, e a baixa velocidade de impressão diminui a manutenção de temperatura de extrusão, causando descolamento das camadas. Nestes casos, foi possível ouvir estalos decorrentes do desprendimento do material. No entanto, a casca de proteção, apesar de benéfica, impedia a visualização destas falhas durante o processo de impressão.

### Etapa de pós-produção

Se durante a etapa de pré-produção, o PLA sofreu maior variação dimensional decorrente de umidade e temperatura do ambiente, na fase de pós-produção, foi o ABS que apresentou menor durabilidade de integridade das camadas ao longo do tempo. A Figura 7 ilustra como as falhas de impressão no ABS aumentam no decorrer de poucos dias, principalmente nos corpos de prova maciços, com altura superior a 10 cm e longo tempo de impressão. Nos ensaios de resistência do material (Figura 8), essas falhas nas camadas também são constatadas, mesmo em corpos de prova que possuíam visualmente, uma aparente integridade preservada.



**Figura 7:** Descolamento das camadas após o fim da impressão, em poucas horas, e acentuada ao longo de alguns dias

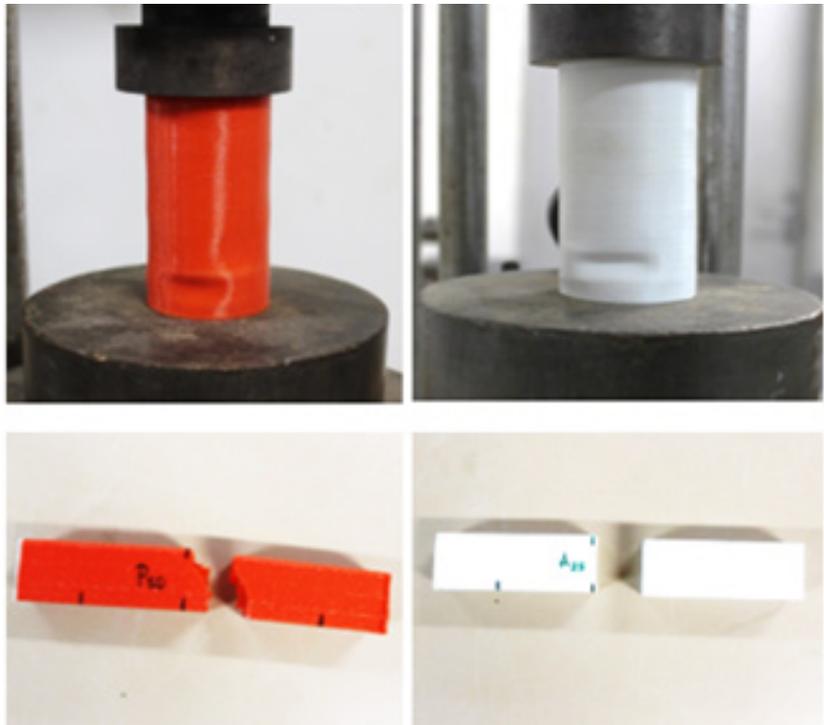
**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

Em geral, os maiores problemas durante a fase de impressão e pós-produção foram constatados nos corpos de prova maciços, decorrentes do maior tempo de impressão. A geração da malha interna automática, além de otimizar o consumo de material, reduz trincas, desprendimento de camadas e outras falhas, e prolongam a vida útil do objeto.

### Ensaio destrutivos

Foram ensaiados inicialmente os corpos de prova com malha estrutural interna, densidade média, uma vez que a redução do tempo de impressão, consumo de material e de falhas durante o período de impressão e pós-produção aumentam a viabilidade de sua produção em escala. A mesma metodologia foi aplicada na sequência, para os ensaios com os objetos maciços, porém os problemas decorrentes das etapas de pré-impressão (armazenamento do material) e impressão (tempo prolongado, em média 30 horas), reduziram a quantidade de amostras ensaiadas.

De modo semelhante, alguns exemplares também apresentaram falhas decorrentes da fase de impressão durante os ensaios destrutivos. A Figura 8, por exemplo, ilustra o descolamento de camadas de um paralelepípedo em ABS, quando submetido ao ensaio de compressão axial. O descolamento possui relação direta com variação de temperatura durante a fase de depósito da camada de filamento e não foi considerado na avaliação do comportamento mecânico do polímero.



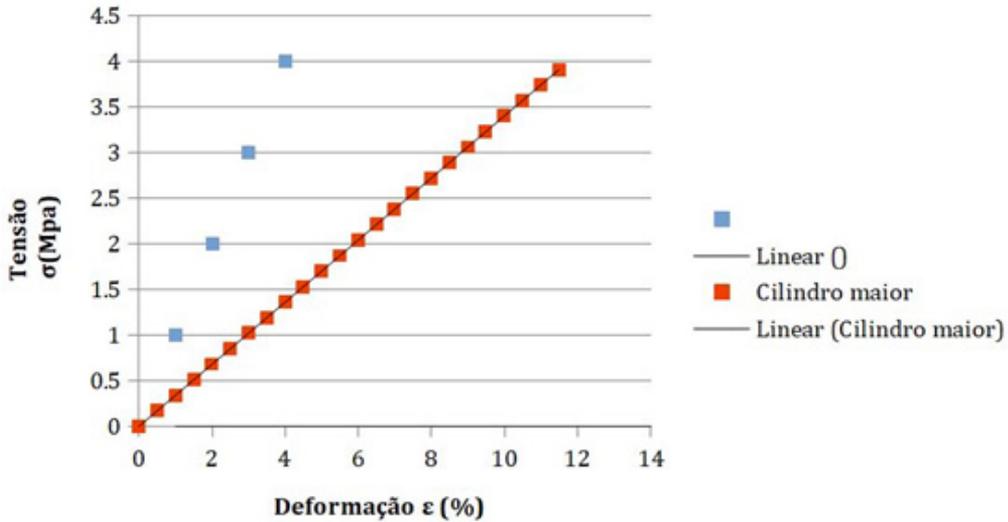
**Figura 8:** Amostras dos dois materiais rompidos à compressão axial e à flexão. A amostra de ABS, abaixo à direita, indica ruptura devido a problemas de impressão (em uma única camada de filamento), sem relação com a resistência do material  
**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

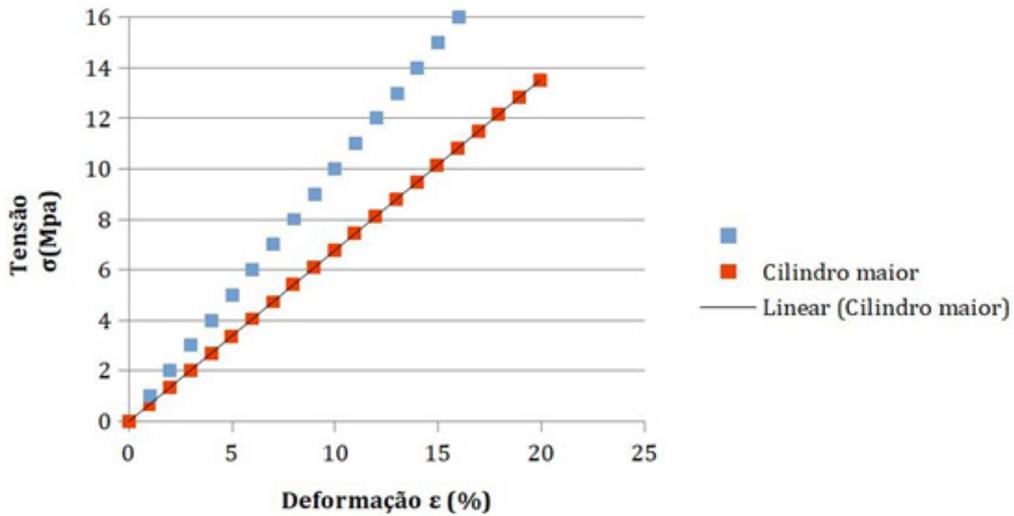
**Corpos de prova com malha estrutural interna: ensaio de compressão axial**

Tanto nas amostras de PLA quanto nas de ABS, submetidas à compressão axial, os gráficos de tensão x deformação traduzem o comportamento frágil de ambos os materiais: falha sem deformação plástica visível. Ainda é possível observar uma variação maior entre os valores de módulo de elasticidade para as amostras de PLA. Para as amostras de ABS, os gráficos tensão x deformação apresentam inclinações semelhantes para a mesma densidade de fibras.

**Gráfico 1:** Curva tensão de deformação para as amostras de PLA, com 0,50mm de espessura (P50)  
**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

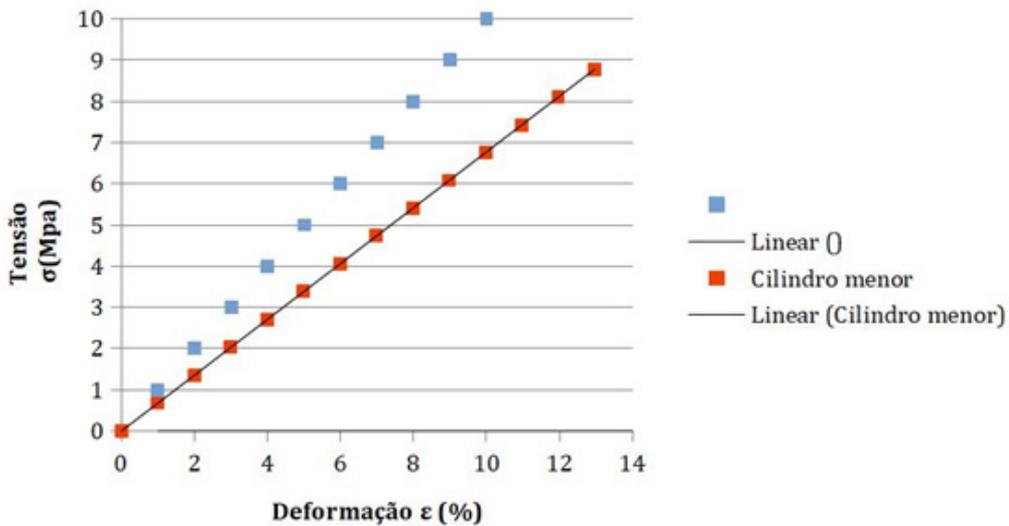
Os Gráficos 1, 2 e 3 ilustram os resultados de tensão x deformação para cada amostra ensaiada, e estão dispostos de acordo com a densidade de fibras do material (espessura das camadas).





**Gráfico 2:** Curva tensão de deformação para as amostras de ABS, com 0.25 mm de espessura (A25)

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).



**Gráfico 3:** Curva tensão de deformação para as amostras de ABS, com 0.50 mm de espessura (A50)

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

O módulo de elasticidade do material foi obtido a partir das médias da inclinação dos gráficos tensão x deformação: Para o PLA,  $E = 52,3 \text{ Mpa}$  / Para o ABS,  $E = 65,42 \text{ Mpa}$ . Por definição, o módulo de elasticidade indica a resistência do material à deformação sob estresse (BRISCHETTO et. al, 2018), o que significa que o ABS suporta uma tensão maior para o mesmo grau de deformação que o PLA.

### Corpos de prova com malha estrutural interna: Ensaio de flexão em três pontos

Com relação aos ensaios de flexão, o maior momento cortante e momento fletor ocorrem no centro do vão. O carregamento produz esforços de compressão normal nas fibras superiores e tração nas inferiores. A disposição das fibras internas no material potencializa um comportamento anisotrópico, que confere diferentes propriedades de resistência à tração e à compressão. É possível notar nas amostras de plástico uma combinação de efeitos ao longo da seção do centro do vão: nas fibras inferiores prevalecem as tensões normais de tração, e nas superiores às tensões de cisalhamento, responsáveis pela fratura inclinada, no ponto de maior fragilidade do material. Para as amostras de ABS, a ruptura ocorre na junção entre os filetes da impressão, provavelmente ocasionadas por falhas de impressão.

A Tabela 2 apresenta os resultados para os ensaios de flexão e as diversas propriedades de resistência de ambos os materiais, identificados pela letra P para PLA e A para ABS, seguido da espessura da camada. Segundo os testes, o PLA possui índices de resistência muito superiores ao ABS, no que se refere ao momento fletor máximo, tensão de flexão de ruptura, esforço cortante e tensão de cisalhamento. Por outro lado, o ABS possui desempenho superior no módulo de elasticidade, e índices semelhantes para o momento de inércia e módulo de resistência. Também é notório que quanto menor a espessura das camadas, maior é o desempenho estrutural do sólido.

CP	P (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	M <sub>f máx</sub> (kNxc m)	W (cm <sup>3</sup> )	σ (Mpa)	Q (cm <sup>3</sup> )	V (kN)	τ (Mpa)
P25	2.08	6.36	5.05	4.62	3.27	13.85	4.91	1.04	4.80
P50	1.73	6.19	4.74	3.89	3.13	12.22	4.69	0.87	4.12
A25	0.76	6.28	4.92	1.69	3.21	5.18	4.82	0.38	1.78
A50	0.69	6.62	5.39	1.54	3.45	4.38	5.17	0.35	1.54

**Tabela 2:** Resultados para os ensaios de flexão. Onde, CP= corpo de prova, P= Carga, I= momento de inércia, M= Momento fletor máximo, W= módulo de resistência, σ = tensão de flexão de ruptura, Q= carga variável, V=esforço cortante, τ = tensão tangencial ou de cisalhamento

**Fonte:** Autores (MARTINEZ et.al, 2017).

### Corpos de prova maciços: ensaio de compressão axial e flexão em três pontos

No que se refere à compressão axial, os corpos de prova maciços, em ABS e PLA, também traduzem o comportamento frágil de ambos os materiais. Os corpos de prova cilíndricos em ABS (h= 10 cm) não romperam. A deformação começou a ocorrer a partir de 7000 Kgf, e foram submetidos à carga final aproximada de 11000 Kgf. No geral, a variação dimensional significa uma compactação de aproximadamente 40% em relação ao eixo vertical, como ilustra a Tabela 3. No entanto, essa mesma compactação não foi observada em corpos de prova com h= 5 cm em ABS. A variação do tempo de impressão dos corpos de prova nestes diferentes formatos (Tabela 1), e os consequentes prejuízos no controle de produção, pode ser uma das variáveis responsáveis pelo comportamento diferente do material.

Por outro lado, os corpos de prova em PLA foram submetidos à cargas maiores (aproximadamente 17000 Kgf), mas não sofreram deformação significativa, como ilustrado pela Tabela 4, o que indica a maior resistência à compressão. Os valores de tensão em Mpa obtidos para os corpos PLA aproximam-se de 90 Mpa, enquanto para os corpos de prova em ABS os valores aproximam-se dos 50 Mpa.

CP	Altura Final dos CPs (cm)	Deformação Longitudinal (ε)
A25	5,70	0,429
A10	6,38	0,341
A50	6,20	0,379

**Tabela 3:** Os corpos de prova em ABS (A50, A25 e A10), com espessuras de impressão de 0,5mm, 0,25 mm e 0,1 mm, respectivamente, sofreram deformação sem rompimento

**Fonte:** Autores (2018).

Corpo de Prova	D <sub>1</sub> (cm)	D <sub>2</sub> (cm)	D <sub>méd.</sub> (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	H <sub>1</sub> (cm)	H <sub>2</sub> (cm)	H <sub>méd.</sub> (cm)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)
A25	4,95	4,97	4,96	19,32	9,97	9,99	9,98	11070	57,29
A10	5,00	4,98	4,99	19,56	9,70	9,67	9,69	11470	58,65
A50	4,94	4,97	4,96	19,28	10,00	9,98	9,99	10900	56,53
P50	5,00	4,96	4,98	19,48	10,10	10,15	10,13	17640	90,56
A25	2,47	2,47	2,47	4,79	4,98	4,97	4,98	2763	57,67
A10	2,47	2,49	2,48	4,83	4,99	4,99	4,99	2227	46,11
A50	2,46	2,48	2,47	4,79	5,08	5,07	5,08	1775	37,04
P25	2,46	2,50	2,48	4,83	5,05	5,05	5,05	4180	86,53
P10	2,50	2,50	2,50	4,91	4,80	4,80	4,80	4560	92,90
P50	2,50	2,52	2,51	4,95	5,06	5,05	5,06	4290	86,70

**Tabela 4:** Resultados de compressão axial para os corpos de prova em ABS e PLA

**Fonte:** Autores (2018).

No que se refere à flexão em três pontos (Tabela 5), não foram realizados testes com corpos de prova em PLA, porém os corpos de prova maciço também apresentam desempenho superior aos modelos com malha estrutural interna, com densidade média. No entanto, em ambos os casos, a ruptura tende a ocorrer na direção da camada do filamento, o que indica a necessidade de otimização do desempenho estrutural baseado na direção das camadas de impressão, em relação à geometria do modelo.

Corpo de Prova	B (cm)	H (cm)	L (cm)	Carga (kgf)	Tensão (MPa)
A25	2,00	2,99	9,90	140,07	23,27
A50	2,00	3,00	9,95	324,30	53,78

**Tabela 5:** Resultados de flexão em três pontos para os corpos de prova em ABS

**Fonte:** Autores (2018).

## CONCLUSÕES

O trabalho apresentado constitui ainda uma investigação em processo e, portanto, requer outros ensaios. Para um estudo estatístico mais relevante, serão feitos também testes com uma amostragem maior de corpos de prova.

Os primeiros testes indicam que a resistência à compressão, dentre os modelos com malha interna, é maior para o ABS. No entanto, em corpos de prova maciços, o PLA possui maior desempenho e deformação visível mínima, enquanto o ABS apresenta menor resistência e maior deformação dimensional.

Para os testes em flexão de três pontos, o PLA possui índices de resistência muito superiores ao ABS. Também é notório que quanto menor a espessura das camadas, maior é o desempenho estrutural do sólido. As rupturas, em geral, ocorreram nas junções entre camadas, o que indica que para melhores resultados de desempenho estrutural, recomenda-se que a direção do filamento seja perpendicular à seção transversal do objeto impresso.

## DISCUSSÕES FUTURAS

Pretendemos também utilizar outros métodos normativos internacionais para testes mecânicos de plásticos e polímeros, já utilizados em alguns *plugins* de simulação no *Rhinoceros* e *Grasshopper*, visando a comparação entre a simulação computacional e os ensaios físicos (fase 03 da pesquisa). Nesta etapa, vislumbra-se a criação de modelos numéricos estruturais a partir dos resultados dos ensaios destrutivos dos modelos físicos, que permitam a definição de novos algoritmos e componentes no *Grasshopper*. Conhecendo-se os valores de resistências dos polímeros ABS e PLA, para as impressoras de baixo-custo recorrentes em laboratórios de prototipagem, será possível criar ambientes de simulação computacional que se aproximem da realidade pós-impressão.

A pesquisa também está em fase de exploração de corpos de prova produzidos em outros modelos de impressoras de baixo custo, tais como *Prusa* e *Zortrax*. Os resultados preliminares já indicam que a qualidade de acabamento dos objetos, relacionados também à menor espessura de camadas de filamento, contribui para a maior resistência dos materiais. Neste sentido, espera-se também que os testes destrutivos dos corpos de prova da impressora profissional *Dimension 1200* e *Zortrax*, não discutidos neste artigo, apontem para a viabilidade de uso da impressão 3D com filamentos termoplásticos, em maior escala e com relativo desempenho estrutural na produção de pequenos componentes construtivos.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - pelo apoio à pesquisa “Modelagem Digital de Projetos Arquitetônicos Baseados no Desempenho Energético e Estrutural” (processo 471634/2014-0 - APQ), e CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão de bolsa de iniciação científica Programa Jovens Talentos para a Ciência.

## REFERÊNCIAS

- ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. **ASTM American Society for Testing and Materials**, West Conshohocken, PA, 2017. <http://dx.doi.org/10.1520/D0790-17>
- ASTM E2954-15 Standard Test Method for Axial Compression Test of Reinforced Plastic and Polymer Matrix Composite Vertical Members. **ASTM American Society for Testing and Materials**, West Conshohocken, PA, 2015. <http://dx.doi.org/10.1520/E2954-15>
- BRISCHETTO, S.; FERRO, C.G.; TORRE, R.; MAGGIORE, P. 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. **Curved and Layer. Structure**. Berlin: De Gruyter, 2018, p.80-94.
- CROLLA, K.; WILLIAMS, N. Smart Nodes: A system for variable structural frames with 3D metal-printed nodes. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 34, 2014, Los Angeles. **Proceedings...** Los Angeles: ACADIA, 2014. p. 311-316. ISBN 9781926724478.
- CROLLA, K.; WILLIAMS, N.; MUEHLBAUER, M.; BURRY, J. SmartNodes Pavilion. Towards Custom-optimized Nodes Applications in Construction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA), 22, 2017, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017. p. 467-477. ISBN 9789881902689.

DIVYATHEJ, M V; VARUN, M.; RAJEEV, P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments. In: **INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & ENGINEERING RESEARCH**, Volume 7, Issue 3, March-2016. ISSN 2229-5518

DRITSAS, S.; CHEN, L.; SASS, L. Small 3D Printers. Large Scale Artifacts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA), 22, 2017, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017. p. 821-831. ISBN 9789881902689.

HAEUSLER, M. H.; MUEHLBAUER, M.; BOHNENBERGER, S.; BURRY, J. Furniture Design Using Custom-Optimised Structural Nodes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA), 22, 2017, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: CAADRIA, 2017. p. 841-851. ISBN 9789881902689.

LETCHER, T.; WAYTASHEK, M. Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an entry-level 3D printer. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS & EXPOSITION (IMECE), 2014, Montreal. **Proceedings...** Montreal: IMECE, 2014. p. 1-8.

MATSON, C. W.; SWEET, K. Simplified for Resilience: A parametric investigation into a bespoke joint system for bamboo. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGrADi), 20, 2016, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: Blucher Design Proceedings, 2016. p. 284- 289. <http://dx.doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-801>

NABONI, R.; PAOLETTI, I. **Advanced Customization in Architectural Design and Construction**. Heidelberg: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-04423-1.

RASPALL, F.; BANÓN, C. (2016). vMesh: How to print Architecture? In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGrADi), 20, 2016, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: Blucher Design Proceedings, 2016. p. 394-398. <http://dx.doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-771>

MARTINEZ, A. C. P.; SOUZA, D. L. de; SANTOS, D. M. dos; PEDROTI, L. G.; MARTINS, M. A. D. Simulação de desempenho estrutural baseada na prototipagem rápida com impressão 3d. In: CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGrADi), 21, 2017, Concepción. **Proceedings...** Concepción: Blucher Design Proceedings, 2017. p. 333-339. ISSN 2318-6968, <http://dx.doi.org/10.5151/despro-sigradi2017-052>

**Andressa Carmo Pena Martinez**  
andressamartinez@gmail.com

**Douglas Lopes de Souza**  
dglopes@gmail.com

**Denise Mônico dos Santos**  
dglopes@gmail.com

**Leonardo Gonçalves Pedroti**  
lpedroti.ufv@gmail.com

**Joyce Correna Carlo**  
correnacarlo@gmail.com

**Marianna Auxiliadora Dias Martins**  
marianna.martins@ufv.br

# MODELAGEM DINÂMICA DE COMBINAÇÃO DE VARIÁVEIS POR MULTICRITÉRIOS: EMPREGO DE MODELO PARAMÉTRICO E ALGORITMO GENÉTICO NO ESTUDO DA ÁREA DE PATRIMÔNIO MUNDIAL RECONHECIDO PELA UNESCO NA PAMPULHA, BRASIL

Dynamic models of multicriteria to combine variables: the use of parametric model and genetic algorithm in the study of the World Heritage area recognized by UNESCO in Pampulha, Brazil

Silvio Romero Fonseca Motta<sup>1</sup>, Ana Clara Mourão Moura<sup>2</sup>, Suellen Roquete Robeiro<sup>2</sup>

**ABSTRACT:** The present paper surveys dynamic models of multicriteria to combine variables using parametric model and genetic algorithm as a method of changing the adequacy level of variables in a multicriteria analysis (MCA). The aim is to simulate if-then scenarios of territorial occupation of commerce, housing and green areas. The case study is a MCA for the buffer zone of the modern assembly of Niemeyer in Pampulha region, Belo Horizonte, Brazil, declared World Heritage by UNESCO. The parametric model was developed in Grasshopper software. The level of adequacy of the territorial units to characterize attractiveness and vulnerabilities to land use change was defined by “knowledge-driven” in the layers: Safety Risks; Fragility in Infrastructure; Bus Stop; and Centralities due to Interaction Potential. The land use change simulation “if-then” was defined by “objective-driven”. The simulation due the use of fitness-function in genetic algorithm, with the goal to achieve the best distribution of land use changes. The fitness function seeks the results of the use of the territory in a more equitable way, considering the attractiveness and vulnerabilities defined by the characteristics of the neighborhoods (centralities, transportation, security and weaknesses in infrastructure). The parametric model generates “if-then” simulation, changing the land use (commerce, housing or vegetation), which results in new levels of adequacy, and calculates the index of suitability for each territorial unit (the lot) with the best situation to the objective of the fitness-function.

**KEYWORDS:** Multicriteria analysis; Parametric modeling; Genetic algorithm; Scenario simulation; Objective-driven evaluation.

<sup>1</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

## How to cite this article:

MOTTA, S. R. F.; MOURA, A. C. M.; ROBEIRO, S. R. Modelagem dinâmica de combinação de variáveis por multicritérios: emprego de modelo paramétrico e algoritmo genético no estudo da área de patrimônio mundial reconhecido pela UNESCO na Pampulha, Brasil. *Gestão e Tecnologia de Projetos*. São Carlos, v.14, n.1, p.142-159, set.2019. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v14i1.148381>

**Fonte de financiamento:** CNPQ e FAPEMIG

**Conflito de interesse:**

Declara não haver

**Submetido em:** 24/07/2018

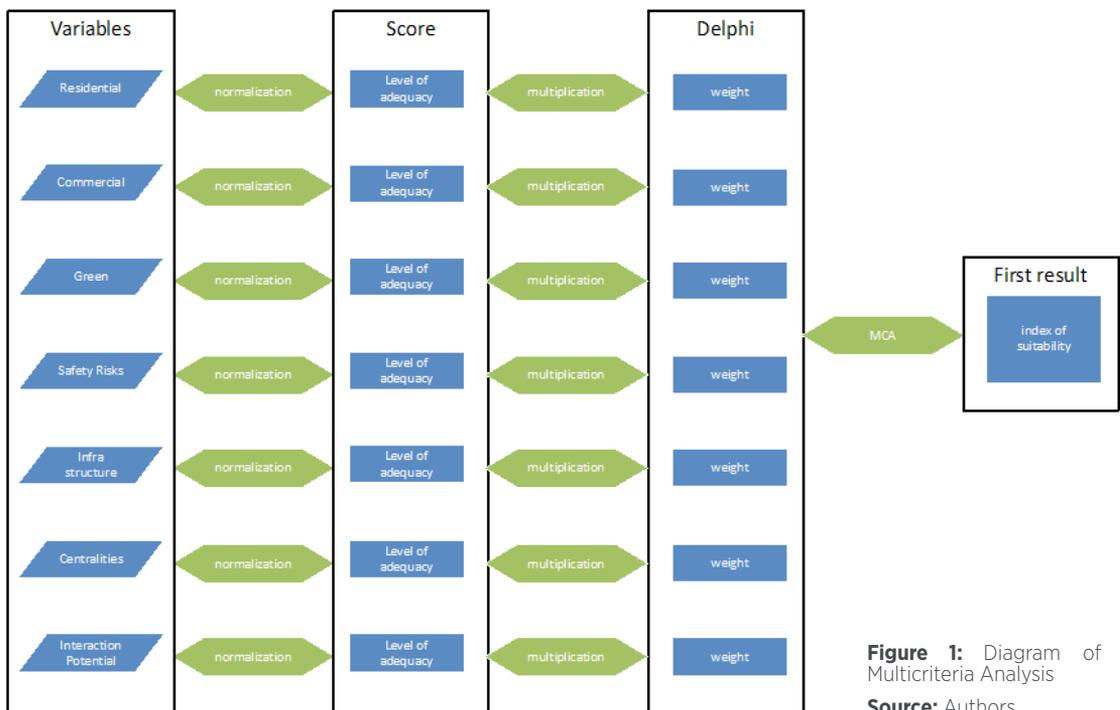
**Aceito em:** 22/02/2019



## INTRODUCTION

An analysis of the urban environment involves the consideration of several variables, which are in constant interaction and transformation. Creating a synthesis of urban analysis implies combining and associating these data. As most of the information concerning the urban context has a spatial element, the urban planning decision-making process requires the analysis of geographic data. Multicriteria Analysis (MCA) is one methodology widely applied to urban studies. As, in solving a complex problem, it can consider multiple variables including geographic data, it is possible to create a summarized integrated model to support the decision-making process.

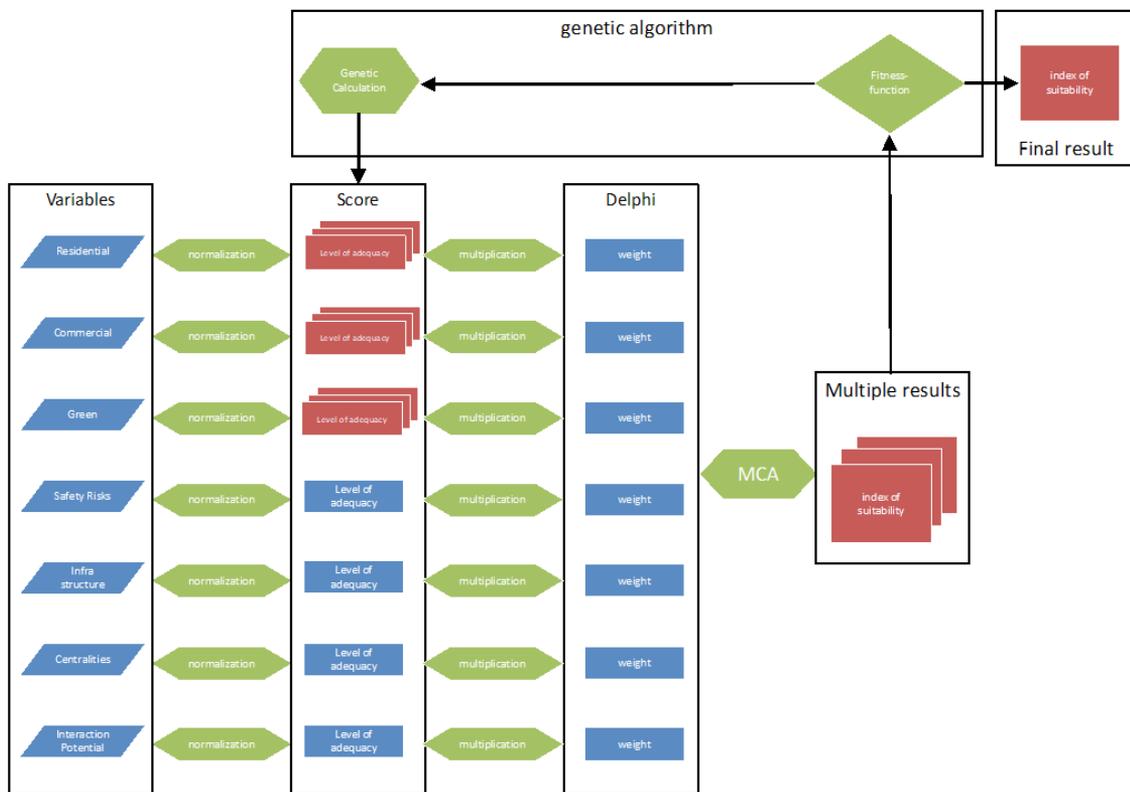
The MCA requires the definition of several aspects involving the decision context and considering the objective of study. Firstly, it requires the definition of the variables that describe the area, or the scenario, and interfere in the decision context. Also, it requires the classification of the suitability of the area to the objective of study, considering each variable. This may be established in accordance with the current and existing situation or can be composed according to future expectations or scenarios, changing the score or level of suitability of the variables. After that, the MCA combines the level of adequacy of each variable with the defined set of weights, generating the overall value. This final value is called the index of suitability of the territorial unit for the MCA objective (Figure 1).



**Figure 1:** Diagram of a Multicriteria Analysis  
**Source:** Authors.

The paper investigates methods of changing the level of adequacy of the variables in a MCA through parametric modeling. It aims to explore the parametric method called Genetic Algorithm (GA) to alter only the level of adequacy of some variables. The set of weights is maintained and the altered level of adequacy is used to simulate future scenarios that improve the index of suitability of the area (Figure 2). The goal is to find new patterns of occupation that compose the synthesis that will better fit the goal to distribute land use according to the principle of equality and promoting

more distributed good areas. The equality in quality of the place can be an important strategy for urban planning, as it balances the potentials of seeking for the smallest difference between the variables' levels of adequacy, which indicate the index of suitability. The simulation scenario can indicate the best possible way to equilibrate the conditions within the area.



**Figure 2:** Diagram of the genetic simulation experiment

**Source:** Authors.

The research axis adopted by the article is to develop an exploratory analysis of the application of spatial models and techniques that perform the process of working with major component variables (decomposing reality into some themes), promoting the integration of these variables (to spatialize attractivities, potentialities or vulnerabilities) and simulate and recompose these variables in probability studies in *If-Then logic*. Being an exploratory study, it has the freedom of experimentation that does not necessarily result in practical applications that can be immediately used in territorial planning. It fulfills the function of awakening possibilities of using logics and mathematical processes, in the form of algorithms, in an initial approach that awakens ideas for new developments and applicability.

Among the models of spatial analysis adopted there is Multicriteria Analysis, which works with the composition of main variables that, integrated, indicate areas suitable for some activity or event, or areas lacking some intervention or transformation. The model is already widely used in studies of spatial analysis, in the sciences that have the territory as support. The article goes one step further and develops a script that makes the combination of variables be performed automatically, by genetic algorithm, in many simulations until an established goal is reached, which would be the best possible result in the combination of those variables. As the study is still exploratory, the goal itself was also arbitrated with the aim of having equitable distribution of some land uses in the territory, among three defined types of use. In future studies the goal may not be an equitable

distribution, but rather favor the development of certain portions of the territory, or even the introduction of a more complex set of variables.

The objective of the article is to explore the potentialities of simulation in a genetic algorithm, using a set of parameters according to parametric modeling, to increase the potentialities of the multicriteria analysis model. If the study was limited to the use of Multicriteria Analysis, the result would be a single scenario as an answer, but with the use of parametric modeling and multiple simulations by genetic algorithm, the application produces a much larger set of responses internally of the application, and chooses among them the one that most suits a previously defined expectation. The resulting scientific contribution is to promote reflection on the possibilities of integrating the chosen models, with gaining information and producing more complex answers, which may favor decisions in the future where there are different perspectives and expectations.

### **Multicriteria Analysis**

The Multicriteria Analysis (MCA) is a decision-making method for complex planning problems involving the identification of main components from a phenomenon or occurrence and the combination of these main variables according to parameters that indicate the importance of each one in the final result. It's based on systemic approach and models, because it presents the idea that you have to decompose reality according to main characteristics, that are the variables, and then compose the elements according to their importance, that are their values or parameters.

As a model, it's a simplification of reality according to main characteristics and can be presented in a logic, a law, a theory, a hypothesis, a structured idea, a relation, a function, an equation or a synthesis of data that represents the real world (HUGGETT, 1980; MOURA, 2009). Recognizing the complexity of reality and avoiding rigid representations, dynamic models are being applied to simulate a set of possibilities in instead of just one result. This paper is a study about dynamic models based on parametric modeling.

MCA can be used as a methodology of spatial analysis studies, which combines and associates geographic data of different variables in order to support decision-making (JANKOWSKI & RICHARD, 1994). The first step is the definition of main variables. The second step is the definition of the importance of each variable in the final results, what means the value to be associated to it, the parameter itself. The variables are combined on map algebra, and the results of this combination are based on the relative importance of each criterion. People involved in the process define the relative importance using various methods and techniques (DODGSON, 2009).

The third step is the definition of geographic territorial unit to integrate the variables (lot, block, neighborhood or even a regular grid of spatial positions), according to the objective of analysis. The fourth step is to prepare all the variables (by layers) according to a surface of spatial distribution of it, already classified in scores according to the objective of analysis. In general, the scores need to be standardized for the same measurement unit, in order to be combined (EASTMAN et al., 1995). As an example, if the goal is to investigate areas for urban growth and densification, the distribution of commerce in the area must be transformed into a surface presenting from the areas with lack of units to the concentration of the activities, while the land use must be classified from suitable to not suitable to urban growth, but both variables must have the same initial value and the same final value, what is the normalization of the score. Spatial units (grids, lots, territorial units) and also spatial distribution of characteristics (the scores of the variables) must be normalized to compose a matrix with the same spatial reference and the same score in values, so that the map algebra can be applied.

After all, preparing the four steps, it's time to define the importance of each variable in the map algebra combination (MOURA, 2007). The

MCA result is an index of suitability or vulnerability to the problem or question that was presented. For example, the researcher can investigate the suitability for urban growth and sprawl, suitability for land use change, vulnerability of geotechnical risks, vulnerability for landscape and environmental protection. The result is a spatial ranking from the worst to the best condition, in relative scale, in which each portion from the territory presents a value that is positioned in a hierarchized scale. The user can analyze the results choosing the best places for the future intervention, or even recognizing the classification of the place he had already chosen in order to provide better conditions, as it's possible to understand which were the variables and parameters that interfered in the result. As an example, if he was investigating suitability of urban growth and a specific area of interest was not well classified, he can identify fragilities in variables, (example transportation), and can control if the result changes according to different parameters applied to that variable.

One of the most common procedures in MCA is the weighted linear combination method. According to Eastman et al. (1995), in this method, a weight is multiplied by each variable's level of adequacy and then summed with its value for other variables to get a final index of suitability for each unit. Thus, a suitability map results from the combination of weighted variables. In order to increase the reliability of the process, there are several methodologies for the definition of weights.

There are different methods to define the importance of the variables, and to choose the parameters that represent this importance. According to Bonham-Carter (1994) the definition of parameters, known as the "weight" to the variables in the weighted average that is the most used algorithm applied to map algebra of Multicriteria Analysis, can be defined by "knowledge-driven evaluation" (interviewing experts) or by "data-driven evaluation" (analyzing a set of data and searching for tendencies). But according to Motta, Moura and Ribeiro (2017), there is also the "visual-driven" in which the user can simulate alternative parameters and get the dynamic results from each combination, what is a support to opinion making. In the case study it was applied "knowledge-driven evaluation" based on Delphi method, in which a group of participants give suggestion about the importance of the variables to arrive to an index of suitability in two rounds: a first round declaring anonymously their votes, and after receiving the media of the opinions of the participants they can change or keep their votes, so that the second media is the distribution of the weights (LINSTONE et al., 1975).

In Pampulha case study the goal was suitability of quality of the place, and people were asked about the importance of each variable to provide that index of quality. In the case study, after constructing the first result with the weights in MCA (Figure 01), the genetic algorithm was applied but weights were kept the same, while the values of some variables were changed to search for multiple results and the most suitable result among them (Figure 2).

As a contribution of the paper, the current study presents a fourth possibility to define parameters in MCA, based on the application of algorithms that will search for the best combination of values to achieve a specific condition established by the researcher: the "objective-driven evaluation".

### **Parametric modeling and genetic algorithm**

Parametric modeling is largely used in architecture nowadays to generate new shapes in contemporary projects. It adopts parameters and functions by computing processes that explore the potential of geometric modeling (FLORIO, 2011). Parameters and functions are connected and organized through algorithms to be altered and manipulated in a logical process. In most cases, it creatively explores the mathematical possibilities in an architectural scale but it is still slightly used in an urban scale. In urban planning there are a few groups using parametricism, such as Zaha Hadid

Architects (SCHUMACHER, 2009). Nevertheless, the referred modeling is not so applied in cartography and spatial visualization mechanisms. Instead, it is only used by those who exploit the PPGIS (Planning Participatory GIS) possibilities as a future landscape production mechanism in applications of dynamic cartography and visualization of changes in spatial results (LEACH, 2009); and in the simulation of parameters alterations for production of dynamic cartography by Parametric Modeling in Territorial Occupation and Urban Landscape (MOURA, 2013).

Parametric modeling allows the use of evolutionary computing based on algorithms (genetic algorithms) that embrace Darwinian principles to calculate processes (SIMON, 2013). The genetic algorithm uses the trial and error approach in order to solve a function or a group of functions for numerical optimization (BÄCK, FOGEL & MICHALEWICZ, 1997). The optimization of a function aims to find the best result to problem solving. This is called a fitness function. In fact, this solution is not necessarily exact or determinist, but a heuristic solution for the issue (MICHALEWICZ & FOGEL, 2013).

This approach is suitable in solutions of inaccurate or even impossible problems phenomena. Those problems often have meta-heuristics characteristics and the calculation of the numerical optimization solution gives a group of heuristic possible results, in other words, a group of approximated results to the problem resolution criterion. New populations of individuals/results are generated for potential evolution in problem solving. The decision of the following events to be calculated for the future population works in an undefined way. Once the repeated population defines the best available value, the adequate solution for the problem is concluded.

The Darwinian principles are used for the development of the population results and to determine the behavior of the calculation. The genetic algorithms ascertain, by evolutionary principles, how the parameters are going to interact and how the calculations development will generate, select, evaluate and choose the population of results (HINGSTON, BARONE & MICHALEWICZ, 2008).

Simulation using evolutionary computing has an analysis potential for inaccurate problems. These problems must have a consistent structure with this heuristic nature. It usually uses storage methods in order to develop the calculations. The calculation evolution or even the several attempts to search for an adequate solution for the problem work in a random way. The main purpose is to calculate a population of potential results/individuals to reach the best available solution. The results from the generated population are confronted with the desired solution and identified its level of suitability towards the problem solving. News generations of population are subsequently calculated from the previous generation to find a more possible suitable solution.

## METHODS

The research axis adopted by the article is to develop an exploratory analysis of the application of dynamic model for urban studies. For it, the methodology adopted in the research was Design Science Research – DSR (DRESCH, LACERDA, JÚNIOR, 2015; PEFFERS, 2007). The research sought for a solution to the practical problem of the adequate tool to dynamic model of MCA in an urban area. The solution was based on theoretical foundations and aimed to respond to the real case as much as to be adaptable to other cases. The research was developed in 6 steps, as shown by table 1.

Firstly, to define the theoretical basis, the article presents a literature review about MCA and GA concepts. After presenting the investigation of the theoretical knowledge, the parametric model that was developed using Grasshopper software was described.

<b>1. Find a relevant practical problem:</b>	Alterations in the indexes of suitability of the MCA variables
<b>2. Examine the research potential:</b>	Literature review of MCA and GA
<b>3. Obtain theoretical and practical knowledge:</b>	Searching for MCA and GA tools
<b>4. Solution proposal:</b>	Development of a genetic parametric model in Grasshopper
<b>5. Implement and test the solution:</b>	Simulate scenarios in buffer zone in the protected area of Unesco in Pampulha, Brazil
<b>6. Ponder the applicability:</b>	Evaluate the results

**Table 1:** Research development steps

**Source:** Authors.

In order to test the model, genetic simulations of future scenarios were performed using the Unesco buffer zone of Pampulha Region, Brazil, as a study area. Finally, the article presents a critical analysis of the observed results.

The research proposes “if-then” simulations, where the methodological model operates hypothetical scenarios of *if* the context changes, *then* the index of suitability become more balanced. The simulations, which are considered as possible future scenarios or contexts, can be made through the modification of the condition of each variable. Therefore, the model operates a variation in the scores among the territorial units in the search for new patterns that are in accordance with the objective proposed by the researchers.

In the case study of this paper the genetic algorithm was planned to achieve a fitness-function so that to simulate alternative futures to a territory, considering local characteristics and opinion from experts about the importance of existing attractiveness and vulnerabilities. It presents the innovation of “objective-driven” evaluation to be applied in Multicriteria Analysis, in order to simulate not only one result but possible different results considering the complexity of reality, visualized in dynamic cartography, but presenting the most feasible result according to the definition of fitness-function. The biggest challenge was the choice of variables and the definition of the fitness-function, so that in future studies it is possible to include a greater number of land use typologies and variables. The most interesting contribution was the “objective-driven” evaluation based on genetic algorithm.

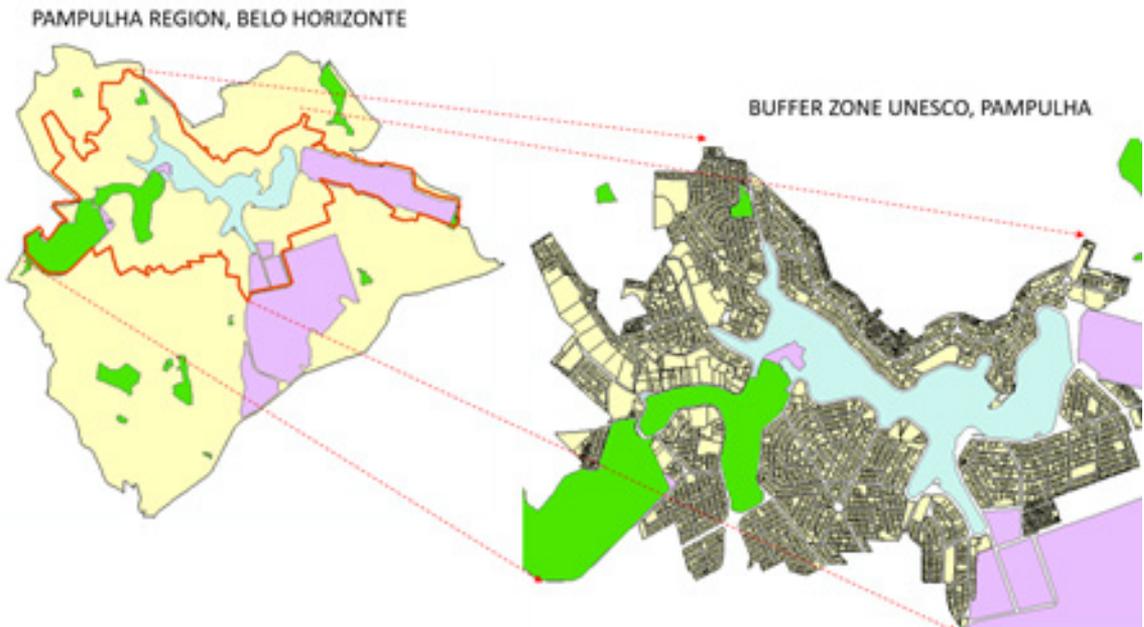
## CASE STUDY - PROPOSAL AND RESULTS

The case study is an illustration of the possibilities to apply genetic algorithm based of fitness-function to simulate the alternative futures to a land use change considering the opinion of experts and also the according to a defined objective.

### The buffer zone of World Heritage protection recognized by UNESCO in Pampulha, Belo Horizonte

In July 2016 Pampulha, in Belo Horizonte, received the title of World Heritage by UNESCO, due to the exceptionality of the architecture design of Oscar Niemeyer in the urban assembly, composed not only to modern

architecture and its originality and authenticity, but also to the report through architectural, landscape and urban scale. It means that valorization and protection of Niemeyer's work is very important to the World, but also the equilibrium of anthropic and natural values, in the sense of landscape (Figure 03).



**Figure 3:** Case study: Buffer Zone UNESCO, Pampulha, Belo Horizonte

**Source:** Authors.

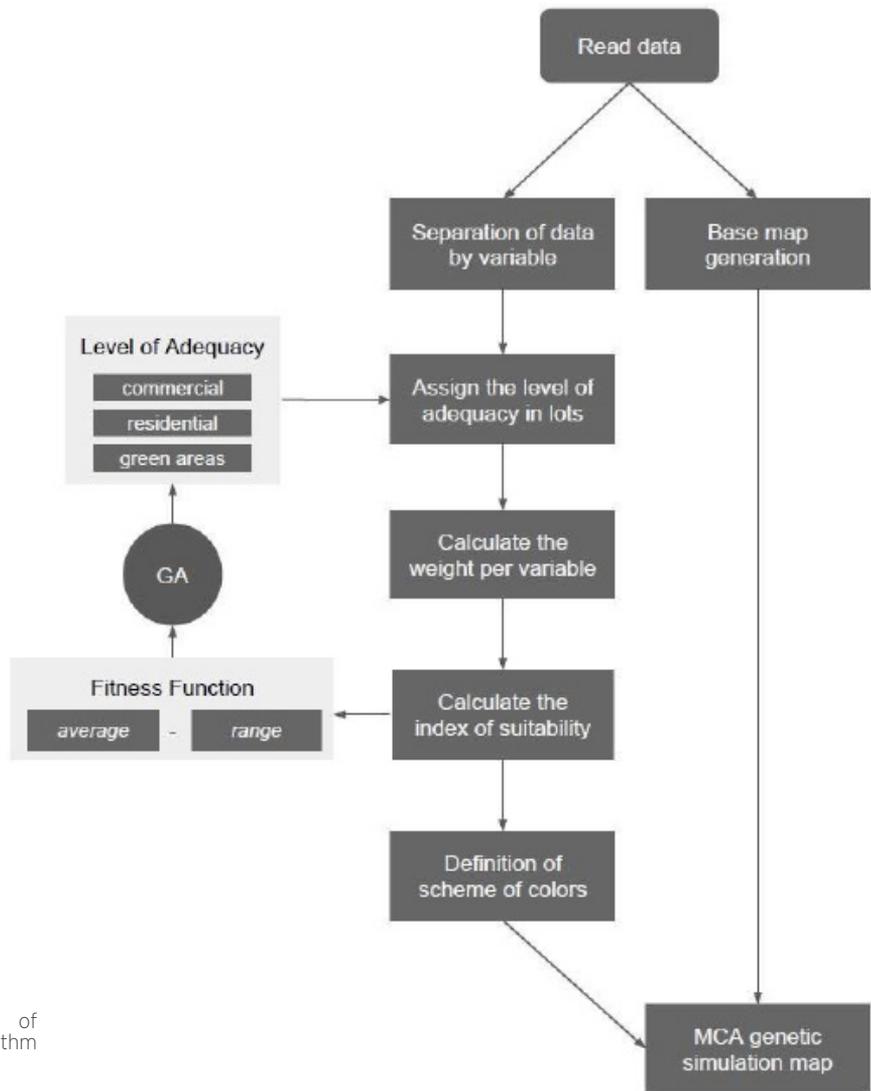
The protected area defines a buffer zone, composed by the border of the lake and its surroundings. We analyzed this area to understand that it has homogeneity and heterogeneity, what is quite interesting as a case study to simulate alternative futures. The homogeneity comes from the dimension and land use of the lots, most of them big lots around 1000 m<sup>2</sup>, with residential uses characterized by expressive green areas. Pampulha is the region that has the best quality of green in Belo Horizonte and the landscape is characterized by an equilibrium of volumetric buildings and vegetation cover (Rocha et al., 2017).

The heterogeneity comes from the distribution of commerce and services, that are concentrated just in few some centralities and not distributed along the region, resulting in lack of integration potential and places that people meet in daily needs and consumption. There is also heterogeneity due to environmental risks and safety risks. In the border of the lake, in the buffer zone for protection, there are places with sanitation fragilities, in risks of flood and of tropical diseases. The safety risks can be problems to tourism development but also to the development of the area.

Because of spatial homogeneity related to the lots (spatial units) and heterogeneity related to the characteristics (spatial variables) the area was chosen as a case study, because it was possible to calibrate and validate the results. It was just a first experiment to be tested in other case studies, and to be developed in more complex models to represent other spatial analysis.

### Multicriteria Analysis tool using Genetic Algorithm

The Multicriteria Analysis tool consists of a parametric model developed in Grasshopper® software using genetic algorithms. The parametric model algorithm considers the following steps (Figure 04).



**Figure 4:** Flowchart of Grasshopper® algorithm steps

**Source:** Authors.

The Figure 05 shows the algorithm such as viewed in Grasshopper@:

Firstly, the parametric model processes a database by importing a shapefile (*shp*) previously prepared using ArcGis®, with spatial reference in UTM WGS-84 coordinate system. The *shp* was composed by the polygons of lots linked with alphanumeric data presented in table about four variables (safety risks; fragility in infrastructure; bus stop; interaction potential). In each column of the table it was registered the level of adequacy of the variable in the lot. The definition of the level of adequacy of the variable “safety risks” consider the risk of crimes and robberies, using data of the site “*onde fui roubado*” (“where I was robbed”) considering also the proximity of banks, unlit places and places where people concentrates waiting for services as buses. The layer “fragility in infrastructure” presents the indexes of health risk due to the presence of dengue fever, spotted fever, flood and precarious sewage network. The “bus stop” layer consider the proximity of the service. The “interaction potential” layer consider the accessibility and the urban dynamic, as an index of centralities due to concentration of service and commerce combined with roads’ facilities.

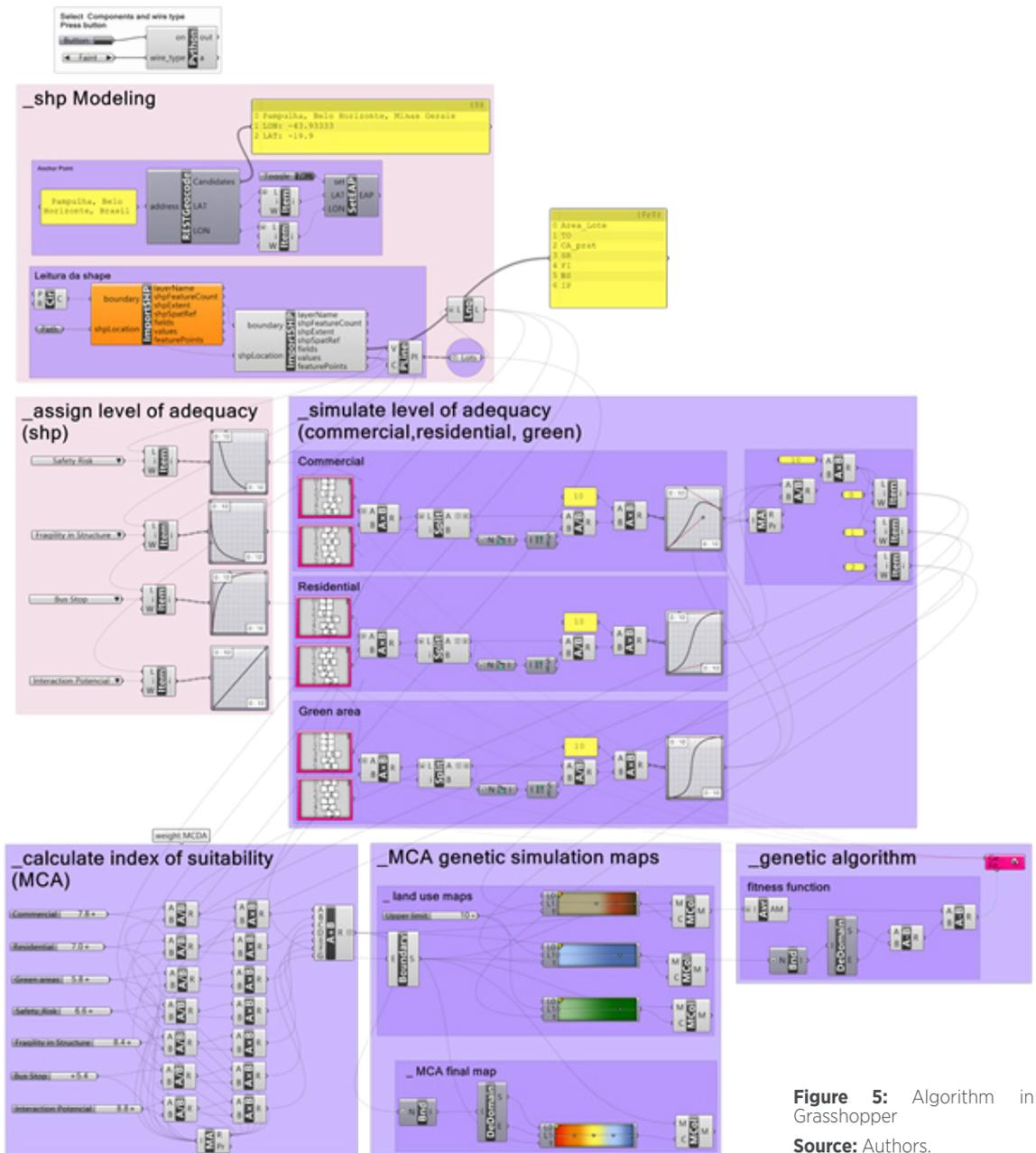


Figure 5: Algorithm in Grasshopper

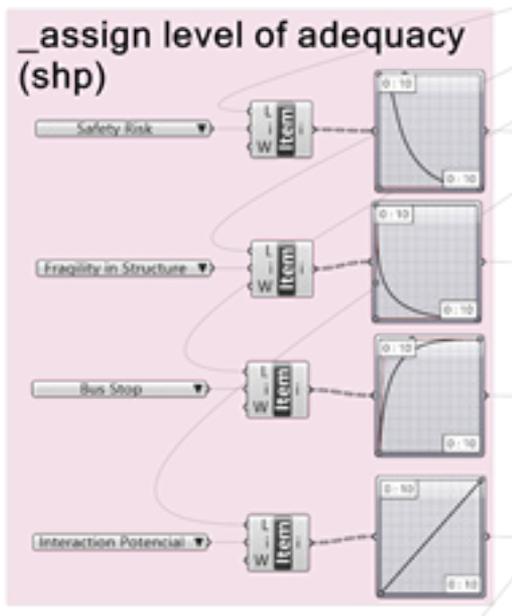
Source: Authors.

After importing the *shp* file, the algorithm separates the levels of adequacy of the four variables individually, those were registered in the table linked to the polygons, and associates them one by one to each geo-referenced lot. According to each variable it was defined a behavior function that better represents the performance of it, representing what happens if the value of the variable increases: does the quality of the place increases proportionately? Is there a value from which the quality doesn't change anymore?

For example: commerce is considered a good condition to the quality of the place, but after a certain level of concentration of this use, the quality declines indicating a saturation of this type of use. The behavior function of this variable can be composed by a curve that simulates it: increasing until at a certain point, and after this limit defined by experts it declines. To each variable, academic experts defined a curve by simple agreement. The figure 06 shows the behavior curves used in each variable.

**Figure 6:** Behavior functions to Safety Risks, Fragility in Infrastructure, Bus Stop, Interaction Potential

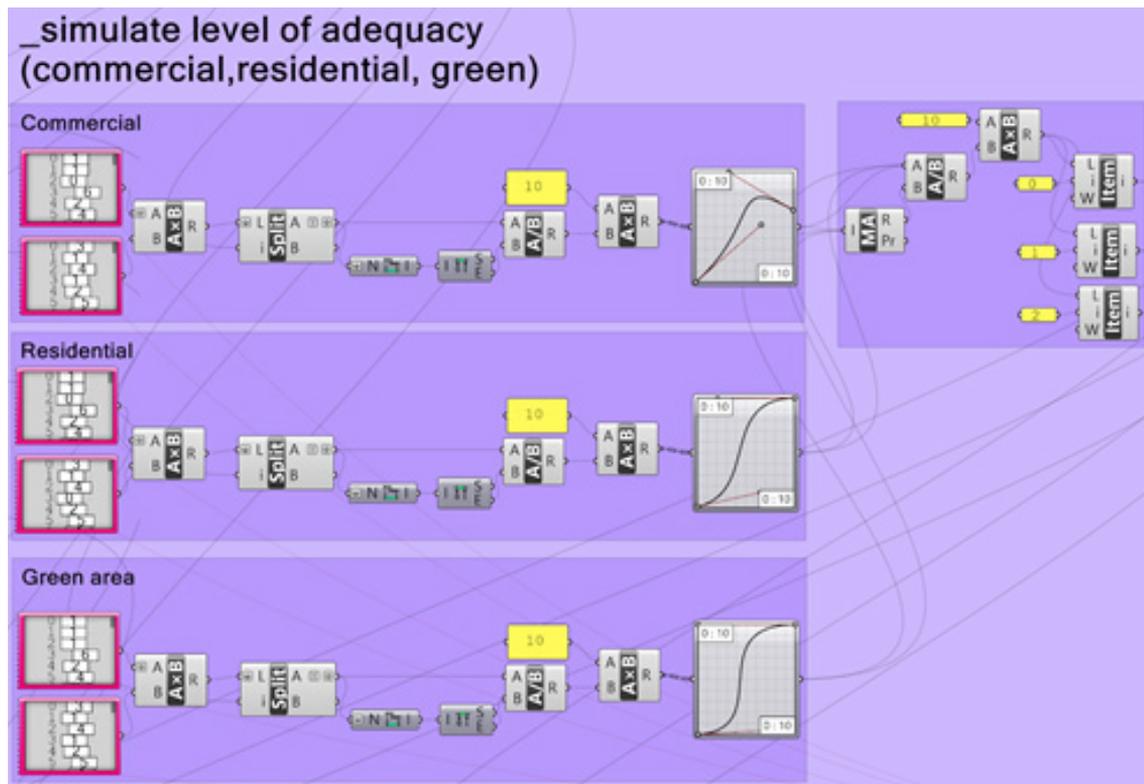
Source: Authors.



The algorithm adds three new layers in the model: Commercial, Residential and Green Areas. The layers were added to simulate the territorial occupation of these uses. It was used a *gen pool* function (group of dynamic sliders) to assign the news scores/level of adequacy in the lots. It was also used a behavior function to adjust the assigned level of adequacy. The figure 07 shows these parts of algorithm.

**Figure 7:** Assign new layers/ levels of adequacy

Source: Authors.



The algorithm uses the strategy of Dynamic Calculation of MCA weights to the MCA calculation (MOTTA et al., 2017). With the MCA set, it is possible to simulate scenarios of territorial occupation. The simulation of possible scenarios and contexts was made through a genetic function that changes the score/level of adequacy. The land use variables of commercial, residential and green area were used for the if/then simulations of new territorial patterns. The genetic calculation performed the variation of the units' scores/levels of adequacy for each lot, changing the gen pool values in a random way.

Parallel to the dynamic calculation of the *index of suitability*, the algorithm models a map of the area from the geo-referenced points. The territorial unit adopted was the urban lot. A 2D base map of the area was generated to be used as a *map view* of the different aspects such as variables (one by one), synthesis of results, etc.

Afterwards, the dynamic calculation results in an index of suitability, according to spatial units and represented in a ranking of color scheme. For the visualization, a different scheme was adopted for each variable that was altered by the genetic algorithm. The commercial variable was drawn using a brown gradient. The residential variable used a blue gradient. The green areas variable used a green gradient. In these cases, stronger colors indicate higher values. For the final MCA map (index of suitability), a *red to blue* gradient was adopted, in which red indicates low values, yellow indicates medium values and blue indicates high values (Figure 08).

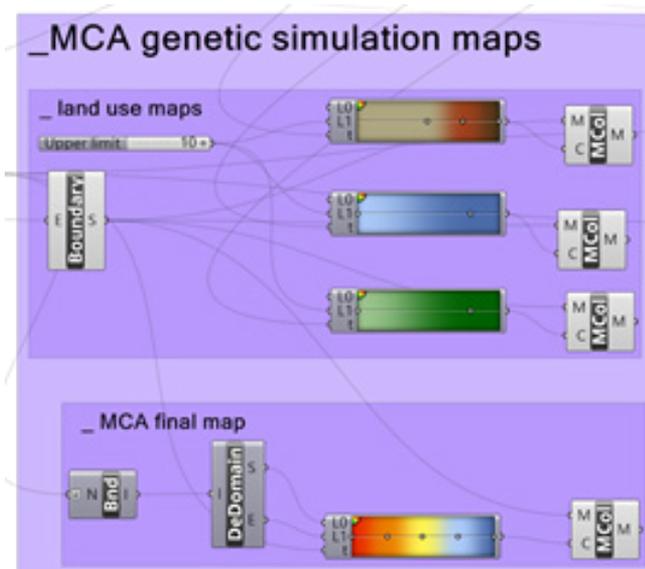


Figure 8: Creating the map view

Source: Authors.

### Genetic simulation experiment

In order to simulate scenarios in UNESCO's buffer area of Pampulha, an experiment of MCA was made using the genetic algorithm. Firstly, a set of weights were defined and settled in Grasshopper. The definition of weights was made by knowledge-driven, with the contribution of academic experts through two rounds of Delphi method (LINSTONE et al., 1975) that is a way to achieve consensus maximization in opinions. The objective pursued was to generate an index of suitability for each territorial unit in a way to increase the quality of the place. Table 2 shows the variables and their respective weights resulted from Delphi method and settled in the combination of MCA.

<b>Commercial</b>	7.8
<b>Residential</b>	7.0
<b>Green areas</b>	5.8
<b>Safety Risks</b>	6.6
<b>Infrastructure</b>	8.4
<b>Bus Stop and Centralities</b>	5.4
<b>Interaction Potential</b>	8.8

**Table 2:** Set of weights  
**Source:** Authors.

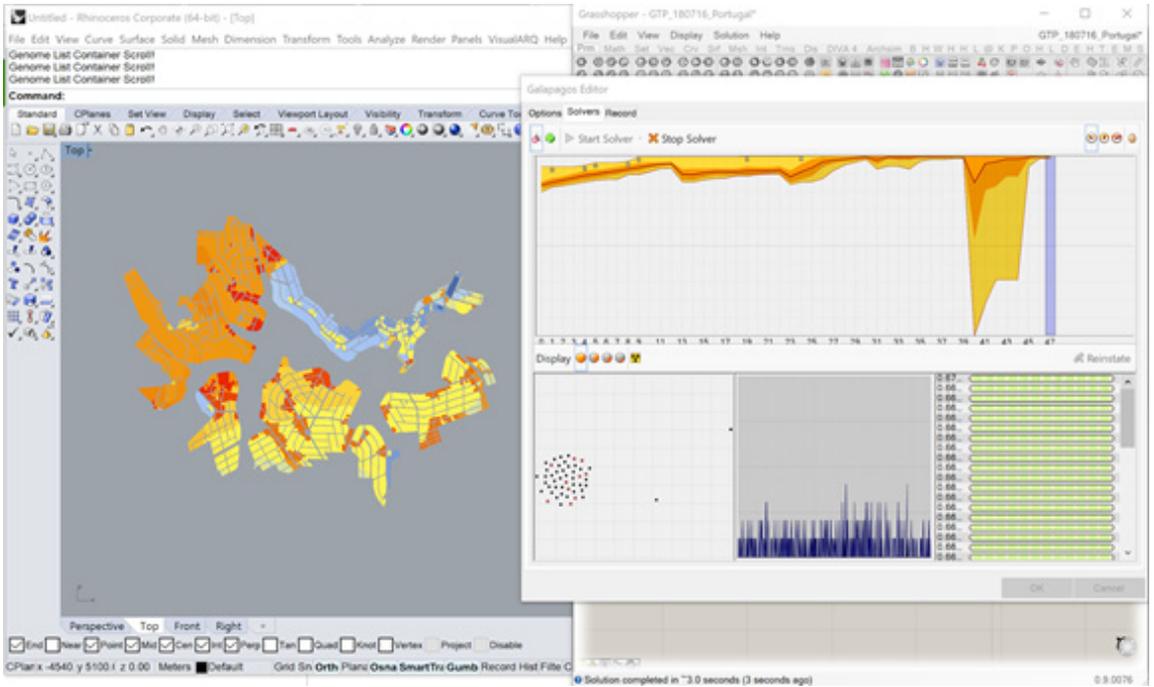
Subsequently, the genetic algorithm changes dynamically the level of adequacy of chosen variables: commercial, residential and green areas. For this alteration, we adopted a strategy that the sum of the three variables had to be 10. In that way, any alteration in one variable implies on altering the others. This was made to avoid the overlaps in maximum value of the three variables in territorial occupation of the same lot, but accepting the combination of them in multiple uses.

The alteration of levels of adequacy was made through the manipulation of the sliders in *gen pool*. The values of the levels of adequacy are defined by a simple multiplication of two sets of *gen pool* (Figure 07). Each *gen pool* has one hundred sliders so that the multiplication of two set results in ten thousand values. These values are randomly assigned to the lots, simulating many possibilities of combinations of variables.

The fitness function of the genetic calculation considered two requirements to achieve the suitability results. The first was the average of the values in all lots, to guarantee equality in territorial distribution. The second was the range of all values (difference between maximum and minimum value), to achieve the better condition in the lot. The objective of the fitness function was to find the highest values of *average* combined (best condition) with lower values of *range* (minimum difference among places). For this, the fitness function equation was defined as:

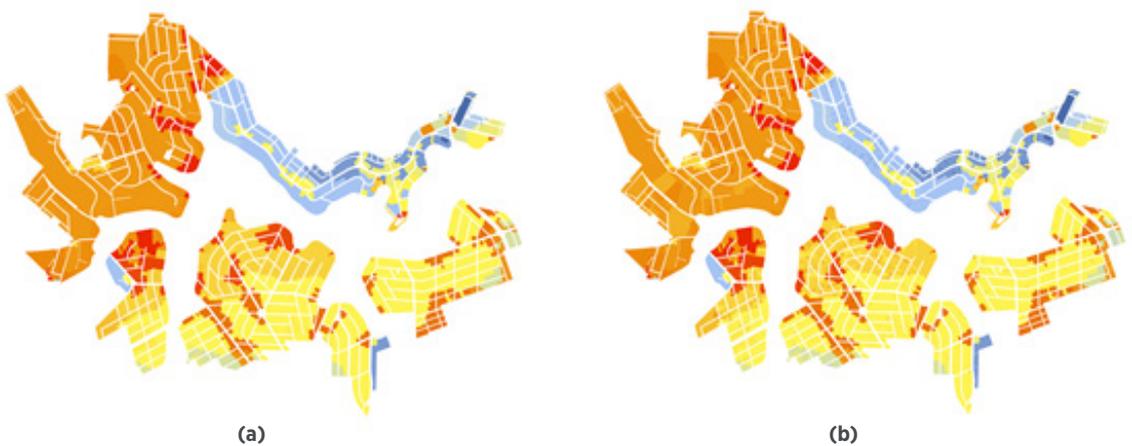
$$\rightarrow (average) - (range)$$

The genetic simulation was performed using an evolutionary solution method. It was produced 49 generations with 99 genome/populations for each one of the 5632 individuals/lots. One mutation was introduced every 10th generation. An increase in the fitness score was observed until the 10th generation. After first mutation, between the 10th and the 20th generation, there was no increase in the results. After second mutation, between 20th and 30th generation, there was a great increase compared with the first mutation, reaching results better than the one from 10th first generation (before first mutation). After third mutation (after 30th generation), the results showed very small increases. In the fourth mutation, after the 40th generation, the results decreased significantly, but in a few generations they again achieved the best results. Figure 09 shows the window during the genetic simulation.



**Figure 9:** Genetic simulation  
**Source:** Authors.

Figure 10 shows the map before the genetic simulation (a) and the map after genetic simulation (b). The map of Figure 10a considers only the four initial variables/layer: Safe Risk, Fragility in Structure, Bus Stop and Interaction Potential. The map of Figure 10b shows all variables/layers, after simulated Commercial, Residential, and Green area territorial occupation. As it's important to analyze the results with more accuracy, details of the parts that changed most were presented (Figures 11, 12 and 13).



**Figure 10:** Maps of Unesco's buffer zone: 4 shp layers (a); 7 layers after genetic simulation (b)  
**Source:** Authors.



**Figure 11:** Detail of Northwest area: 4 *shp* layers (a); 7 layers after genetic simulation (b)  
**Source:** Authors.

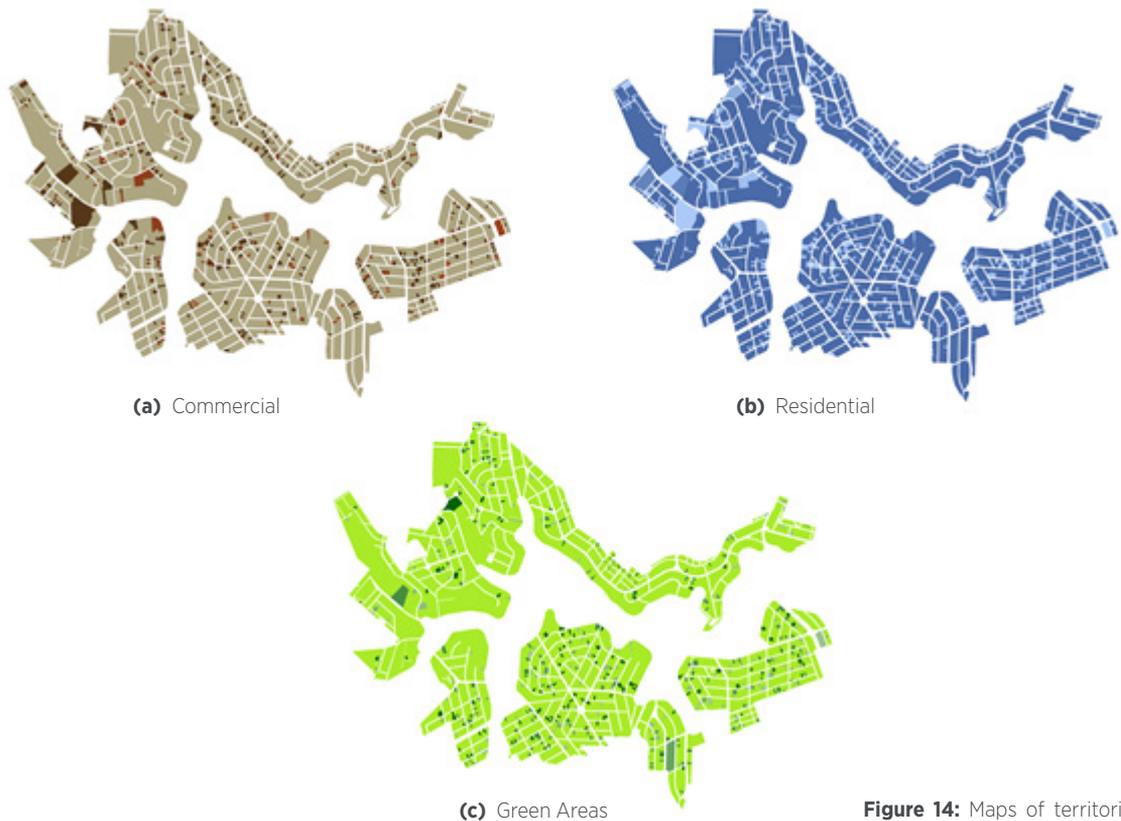


**Figure 12:** Detail of North area: 4 *shp* layers (a); 7 layers after genetic simulation (b)  
**Source:** Authors.



**Figure 13:** Detail of Center area: 4 *shp* layers (a); 7 layers after genetic simulation (b)  
**Source:** Authors.

The genetic experiment indicated similar pattern before and after the simulation. It was observed concentration of changes in individual lots in the West, Northwest, North and Central areas. It is important to remember that the fitness function was intended to equitably distribute the potential transformation in the area, what means that some lots could lose potential in favor of better distribution of resources and to achieve according to the three uses, and it was observed that changes happens in one or two levels in the indexes of suitability and quality of the place. As it was expected, the impact was not enough to meaningful change the index of suitability pattern. This follows what happens in reality, in which land use changes step by step.



**Figure 14:** Maps of territorial occupation after genetic simulation

**Source:** Authors.

It is possible to observe some aspects when analyzing the resulting maps. Firstly, on the Commercial map (Figure 14a), the occurrence of commercial use is concentrated in specific lots/units, mainly located in the west. On Residential maps it is observed the distribution of occupation in all area, with greater intensity than the other uses. On Green Areas map, the occurrence is interspersed and heterogeneous all over the buffer zone, in low intensity.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The MCA is a traditional and useful method to support the spatial planning process, from the landscape and environmental scale to urban and architectonic scale, as it's quite useful whenever the researcher needs to define suitability and vulnerability, presented as spatial indexes to land changes in projects or policies.

The use of MCA for the "if-then" simulation, presented in this paper

based on “knowledge-driven” but also as “objective-driven” evaluation, has a great potential. The challenges to studies are the methods of changing parameters and methods to calculate synthesis. Changes in the level of adequacy have potential as a good strategy for the “if-then” simulation using MCA. Knowing that, these changes are often a complex calculation, the use of genetic algorithm, based on “fitness function” using genetic methods, indicate potential as methodology approach.

The research evaluated a Grasshopper® algorithm modeled to be the engine of the simulation of different levels of adequacy in a MCA. The experiment demonstrated the ability of the tool for calculating “if-then” simulations. In the experiment, the objective was to simulate land use change based on commerce, housing and vegetation to achieve a spatial equilibrium of land use in order to have not only environmental quality but also urban facilities. The fitness function had to change the distribution of land use (commerce, housing and vegetation) but considering the attractiveness and vulnerabilities defined by the variables. Attractiveness was defined by centralities represented in integration potential that results from accessibility on roads and concentration of commerce and services, also by transportation represented by bus stops. Vulnerabilities were defined by safety risks due to crimes, dark areas and concentration of people on roads; and also vulnerabilities due to lack of urban infrastructure represented by problems of flood, sanitary and sewage fragilities and tropical diseases (dengue and spotted fever - *febre maculosa*).

The objective of this research was to evaluate the applicability of the genetic algorithm based on fitness function in the “if-then” simulation, as a possibility of “objective-driven evaluation” in Multicriteria Analysis. The main issue was to choose the driven variables, the characterization of its performance (behavior function), the set of the weights, and the formulation of the fitness function (objective to be achieved by simulation).

There are limitations of immediate applicability, because it is an exploratory study. It fulfills the task of thinking about the potentialities of associating MCA with PM/GA to obtain answers that result from the comparison of many possibilities and that it is possible to draw the best scenario that best suits a specific objective function. However, for real applicability, it would be necessary to revise the list of variables worked and eventually the defined objective function (in this case equitable distribution of land use). As an exploratory study, it is a first step that awakens to new possibilities, already proving the potentialities of the models used in an integrated way.

There are foreign groups doing simulations of potential land uses by integrating variables, such as Zaha Hadid’s studies on the “Adaptive Urban Fabric” (Kartal MasterPlan, Zaha Hadid Architects, 2006), but for them the simulation predicts installation of uses in unoccupied territories, which function as an ideal surface and those without roughness of an existing occupation. Thus, for Brazilian case studies that do not deal with the sprawl of new occupations, but rather with the search for a balance in land use, new constraints would have to be incorporated so that the study was not a mathematical, numerical and spatial approach.

The experiment presented good results and its use proved to be of great potential. The algorithm was very robust and present the results in short time, what means that further exploration can be added to it, in order to model the complexity of reality. New explorations, considering others variables, new goals and fitness function may be undertaken in future investigations.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Contribution to the project CNPq Universal Demand Call 1/2016, Process: 401066/2016-9, and Fapemig PPM-00368-18.

## REFERÊNCIAS

- BÄCK, Thomas; FOGEL, David B.; MICHALEWICZ, Zbigniew. **Handbook of evolutionary computation**. CRC Press, 1997.
- BONHAM-CARTER, Graeme F. **Geographic Information Systems for Geoscientists; modelling with GIS**. Ottawa, Pergamon, 1994. 398 p.
- DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; JÚNIOR, José Antonio Valle Antunes. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Bookman Editora, 2015.
- DODGSON, John S. et al. Multi-criteria analysis: a manual. 2009.
- EASTMAN, J. R. et al. Raster procedures for multicriteria/multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 61, n. 5, p. 539-547, 1995.
- FLORIO, Wilson. Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: duas experiências com estudantes de arquitetura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 6, n. 2, p. 43-66, 2012.
- HINGSTON, Philip F.; BARONE, Luigi C.; MICHALEWICZ, Zbigniew (Ed.). **Design by evolution: advances in evolutionary design**. Springer Science & Business Media, 2008.
- HUGGETT, Richard. **Systems analysis in geography; contemporary problems in geography**. Oxford: Clarendon Press, 1980. 208 p.
- JANKOWSKI, Piotr; RICHARD, L. Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 21, n. 3, p. 323-340, 1994.
- LEACH, Neil. Digital cities. **Architectural Design**, v. 79, n. 4, p. 6-13, 2009.
- LINSTONE, Harold A. et al. (Ed.). **The delphi method**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1975.
- MICHALEWICZ, Zbigniew; FOGEL, David B. **How to solve it: modern heuristics**. Springer Science & Business Media, 2013.
- MOTTA, Sílvia R.; MOURA, Ana Clara M.; RIBEIRO, Suellen R. Ampliando do *data-driven* e *knowledge-driven* para propor o visual-driven na análise de multicritérios: estudo de caso de modelagem em Grasshopper+Rhino3D. **Revista Brasileira de Cartografia** (2017), Nº 69/8, Edição Especial "Geovisualização, mídias sociais e participação cidadã: apoio à representação, análise e gestão da paisagem": 1456-1475.
- SCHUMACHER, Patrik. Parametricism: A new global style for architecture and urban design. **Architectural Design**, v. 79, n. 4, p. 14-23, 2009.
- SIMON, Dan. **Evolutionary optimization algorithms**. John Wiley & Sons, 2013.
- ZAHA HAHID ARCHITECTS. **Kartal Masterplan**, 2006. Available in: <http://www.zaha-hadid.com/masterplans/kartal-pendik-masterplan/>.
- MOTTA, Sílvia Romero Fonseca; MOURÃO, Ana Clara Moura; GALVÃO, Ana Clara Zandonaidi; RIBEIRO, Suellen Roquete; KATO, Julia Marion Florencio; **Simulation of Scenarios and Urban Analysis Using Parametric Modeling and Genetic Algorithm Based on Multicriteria Analysis**, p. 397-402. In: São Paulo: Blucher, 2017.
- MOURA, Ana Clara Mourão. Learning topics in urban planning at UFMG: geoprocessing to support analysis, planning and proposal of the urban landscape at neighborhood scale. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 7, 2013.
- \_\_\_\_\_. Aplicação do modelo de polígonos de Voronoi em estudos de áreas de influência de escolas públicas: estudo de caso em Ouro Preto-MG. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v. 3, n. 2, 2009.
- \_\_\_\_\_. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 13, p. 2899-2906, 2007.
- PEFFERS, Ken et al. A design science research methodology for information systems research. **Journal of management information systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.
- ROCHA, Nicole A.; SENA, Ítalo S.; CASAGRANDE, Pedro B.; CASTRO, Marina M.; FONSECA, Bráulio M.; MOURA, Ana Clara M. Studies of volumetric relation between vegetation and buildings using LIDAR data and NDVI to propose urban parameters. **Revista Brasileira de Cartografia** (2017), No 69/8, Edição Especial "Geovisualização, mídias sociais e participação cidadã: apoio à representação, análise e gestão da paisagem": 1456-1475.

Silvio Romero Fonseca Motta  
silvio@pucminas.br

Ana Clara Mourão Moura  
anaclara@ufmg.br

Suellen Roquete Robeiro  
suellen\_ribeiro15@yahoo.com.br