

## Estudo de detalhamento estrutural da Catedral de Palmas – TO, Brasil. Structural study of Palmas Cathedral, Brazil.

**Igor Lacroix**

UnB – Universidade de Brasília, Brasil  
igorlacroix@gmail.com

**Paulo Henrique Paranhos**

UnB – Universidade de Brasília, Brasil  
taoarquitetura@uol.com.br

**Francisco Leite Aviani**

UnB – Universidade de Brasília, Brasil  
cesco@unb.br

**Neander Furtado Silva**

UnB – Universidade de Brasília, Brasil  
neander.furtado@gmail.com

### Abstract

This article presents a study for the structure of Palmas Cathedral, designed by architect Paulo Henrique Paranhos. The goal is to gather a set of parametric modeling and rapid prototyping techniques, aiming the efficiency and automation of parts of the design and fabrication process for the steel truss that constitutes the coverage of the project in question. It discusses the expansion of the architect's work field. Once the professional holds the application of advanced technologies focusing on construction and manufacturing, will be able to take responsibility for parts of the engineering design.

**Keywords:** Collaboration; Parametric design; Rapid prototyping; Structural design; Steel structure.

### Introdução

O projeto da Catedral de Palmas, de autoria de Paulo Henrique Paranhos, não foi construído, mas desde a década de 1970 continua a ser desenvolvido, como uma espécie de laboratório para experimentações conceituais, formais, plásticas, do arquiteto autor – que nesse momento inicial do processo era estudante do curso de arquitetura da Universidade de Brasília.

De fato, compreende-se uma base colaborativa envolvida nesse projeto, uma vez que diversos profissionais já participaram de etapas diferentes do seu processo. A partir do traço original do autor, já se projetou, por exemplo, um estudo preliminar para participação na Bienal de Arquitetura de São Paulo, em 2003, e agora o projeto é retomado para uma especulação sobre aplicação de técnicas e tecnologias que possibilitam conceber estruturas com nível elevado de complexidade geométrica.

Apresenta-se aqui um estudo de detalhamento das barras e encaixes da treliça espacial que configuraria a cobertura da catedral, fundamentado em um esquema estrutural hipotético. Tal estudo foi organizado por meio de um modelo parametrizado, orientado, a princípio, para a prototipagem rápida, mas que mantém atenção à possível fabricação automatizada.

### Procedimentos metodológicos

Os primeiros traços do autor (Figura 1) demonstram com clareza geométrica, o arranjo de uma superfície regrada que conformaria a cobertura da catedral. Pottmann (2007) define esse tipo de geometria como uma superfície “gerada por uma linha reta em movimento [...] que contém uma família contínua de linhas retas” (p. 311). Tal geometria possibilita



Figura 1: Croquis originais do projeto da catedral

idealizar uma estrutura composta por treliças planas, em movimento radial, conforme os croquis.

A solução estrutural mencionada foi apresentada em etapa posterior do desenvolvimento do projeto (Figura 2), quando modelos 3ds Max foram produzidos pelo projetista Eder Alencar. Nesse momento, configurou-se uma composição de treliças com o objetivo de vencer vãos livres de

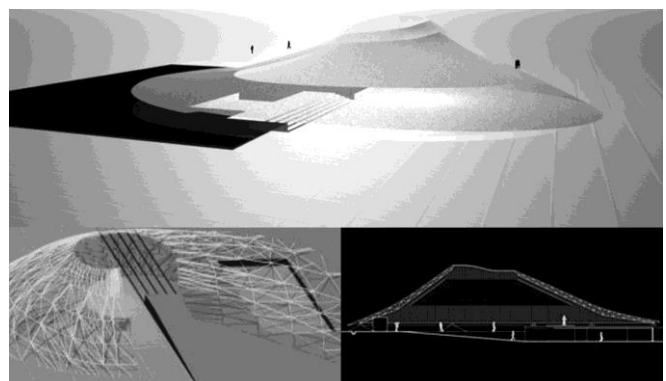


Figura 2: Representações tridimensionais iniciais e corte do projeto

aproximadamente trinta metros. As imagens dessa etapa apresentam um modelo tridimensional de malha triangulada, mas ainda sem precisão construtiva. Já o corte do projeto indica uma configuração inicial da treliça.

Recentemente, a partir das informações herdadas dos modelos 3ds Max referidos, o projeto foi desenvolvido com a intenção de propor uma nova configuração estrutural, idealizando-se a cobertura como uma treliça espacial e não mais como uma organização de treliças planas. Para tanto, considerou-se a aplicação de meios produtivos avançados, de maneira a se prever, inclusive, uma hipotética execução da obra.

Nesse momento, a geometria do projeto foi reconfigurada e ajustes foram feitos para melhor caracterizar a conceituação teórica da proposta. Em termos conceituais, a cobertura da catedral representaria um movimento que se inicia verticalmente, simbolizando a ascensão divina, e termina horizontalmente, sobre o espelho d'água, remetendo à humanização e naturalização da religião.

### Primeira fase do estudo de detalhamento

A primeira etapa do estudo foi idealizar um modelo de treliça espacial adequado à concepção original. A tarefa inicial foi escolher um padrão de “panelização” para a superfície externa da treliça, reinterpretando a superfície regradada. Entre diversas opções foi escolhido um padrão triangular (Figura 3) por alguns motivos fundamentais: primeiro pelo caráter simbólico religioso, segundo pelo reconhecimento comum de que as estruturas triangulares são mais estáveis, terceiro devido às obras de referência de Massimiliano Fuksas – tais como a Feira de Milão, o Palácio da ex-União Militar e, o mais recente, Parque Rlike –, que nos demonstram possibilidades executivas viáveis, principalmente na etapa de detalhamento das peças menores. Tal padrão de triangulação foi gerado por um algoritmo de “panelização” desenvolvido utilizando-se o addon Lunchbox® do Grasshopper®. Ainda, define-se aqui “panelização” como o processo de dividir, em painéis planos menores, uma superfície maior de formato livre. Na linguagem dos softwares seria o processo de subdivisão de uma superfície poliédrica.

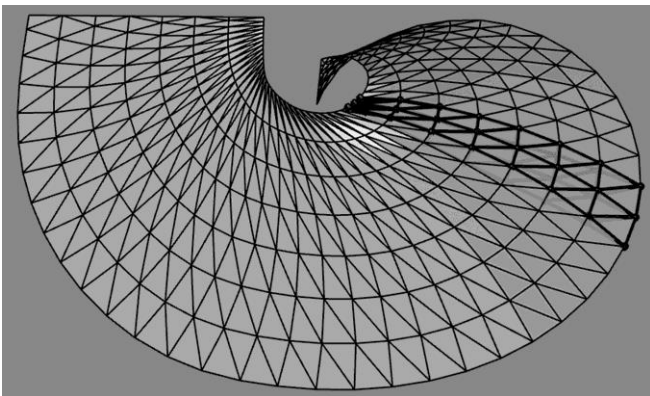


Figura 3: Esquema de “panelização” escolhido e destaque no trecho da treliça a ser analisado na segunda fase do estudo

A tarefa posterior foi idealizar um modelo geométrico para a treliça espacial (Figura 4), possibilitando a configuração geral dos perfis e pontos de encaixe. Para tanto, foram desenvolvidos algoritmos de simulação funicular, de forma a se compreender a atuação das forças gravitacionais sobre a superfície base. Assim, foi possível a concepção de uma treliça espacial capaz de vencer os maiores vãos, mantendo a forma complexa caracterizada pelos croquis originais. A simulação gravitacional foi possível por meio de outro addon do Grasshopper®, chamado Kangaroo®.

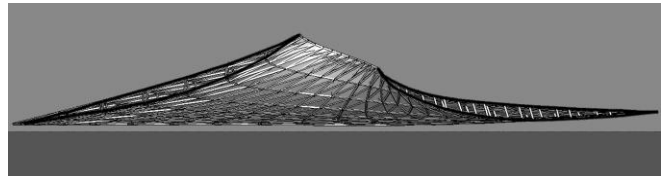


Figura 4: Corte longitudinal da treliça espacial

A última tarefa foi adequar o tamanho das barras ao padrão construtivo local, onde o comprimento máximo fornecido é de seis metros. A triagem de amostras de malhas trianguladas foi feita pela função Galapagos® do Grasshopper®. O algoritmo genético da função possibilitou a escolha do modelo com a melhor performance para o tamanho limite das barras.

Durante essa primeira fase, uma nova renderização da catedral foi feita pelo arquiteto Hermes Romão (Figura 5). Percebe-se na imagem atual uma maior consistência entre a representação gráfica e a possibilidade construtiva, indicando como o projeto evoluiu desde o estudo preliminar.

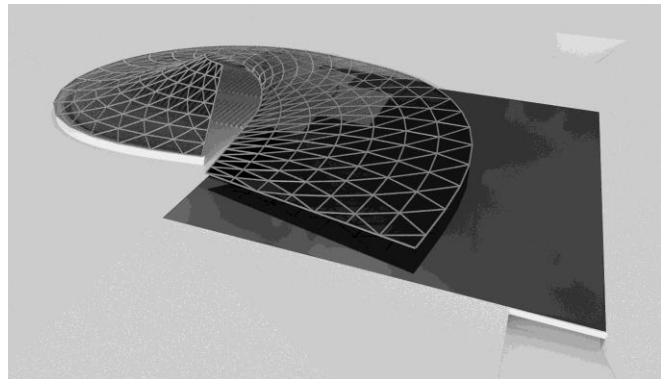
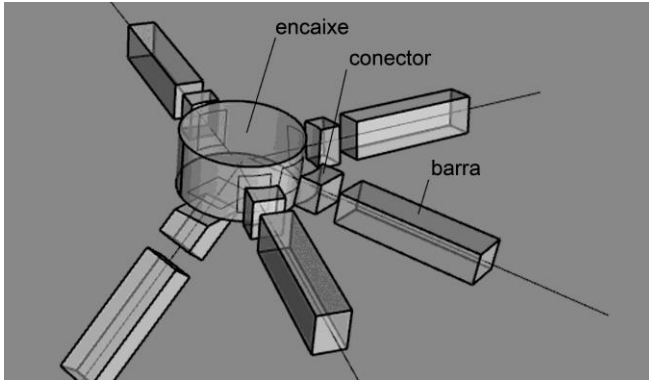


Figura 5: Renderização do modelo tridimensional atual

### Segunda fase do estudo de detalhamento

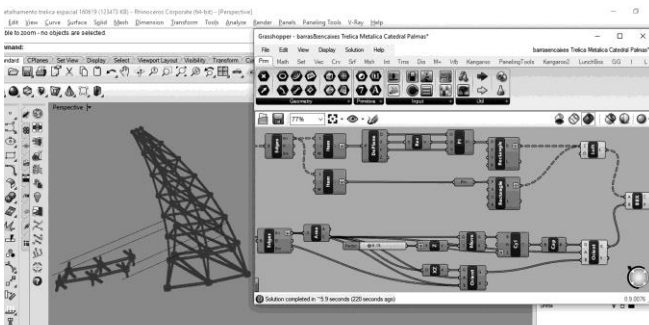
Uma vez concebido o modelo de treliça espacial, partiu-se, então, para a idealização de um possível processo de fabricação de partes de sua estrutura (Figura 6). A primeira decisão foi utilizar tubos retangulares de quinze por vinte centímetros para as barras – configurados pela soldagem de dois perfis “U” enrijecidos – e um sistema cilíndrico calandrado, com sessenta centímetros de diâmetro, para os encaixes, que são providos de conectores soldados ao longo do perímetro externo, em ângulo correto para receber as barras.



**Figura 6:** Esquema das conexões entre barras e encaixes

Tal decisão foi tomada a partir de dois fundamentos: primeiro, uma limitação comum do contexto produtivo brasileiro que é a predominância do corte bidimensional, já que não se encontra usualmente maquinário além dos três eixos de movimentação; depois, um pré-dimensionamento empírico para a treliça espacial metálica, levando-se em consideração cargas médias e vãos entre encaixes variando em torno de quatro metros. O pré-dimensionamento foi fundamentado em Rebello (2010), a partir do gráfico (p. 157) que apresenta a variação de altura da treliça espacial em relação ao vão adotado. Conforme o gráfico, a treliça teria uma altura aproximada de um metro e cinquenta centímetros.

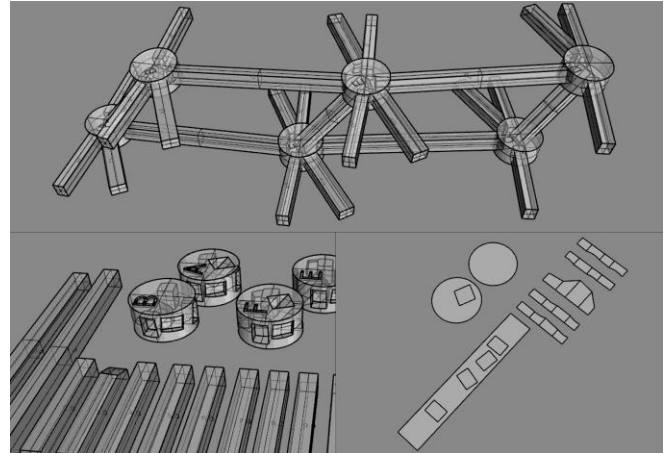
A segunda decisão foi trabalhar apenas com a seção de maior vão da estrutura, basicamente para poupar os algoritmos de cálculos extensos, retirando-a do contexto vizinho. A partir daí, iniciou-se o desenvolvimento de novos algoritmos para parametrização dos elementos que compõem a treliça. A primeira tarefa foi criar um algoritmo de interseção entre as barras e os encaixes (Figura 7), de forma a gerar os planos tanto de gravação das chapas a serem calandradas para os encaixes, quanto de recorte das chapas a serem dobradas para os conectores. Esse algoritmo possibilita alterar tanto o tipo de perfil das barras – permitindo adequar qualquer tipo de perfil fornecido, seja ele I, Z, T, ou tubulares redondos, quadrados, retangulares –, quanto propriedades dos encaixes, como diâmetro da peça, espessura da chapa etc.



**Figura 7:** Algoritmo de interseção entre barras e encaixes

A segunda tarefa foi montar um algoritmo para identificação automatizada de todas as peças, sejam barras ou encaixes,

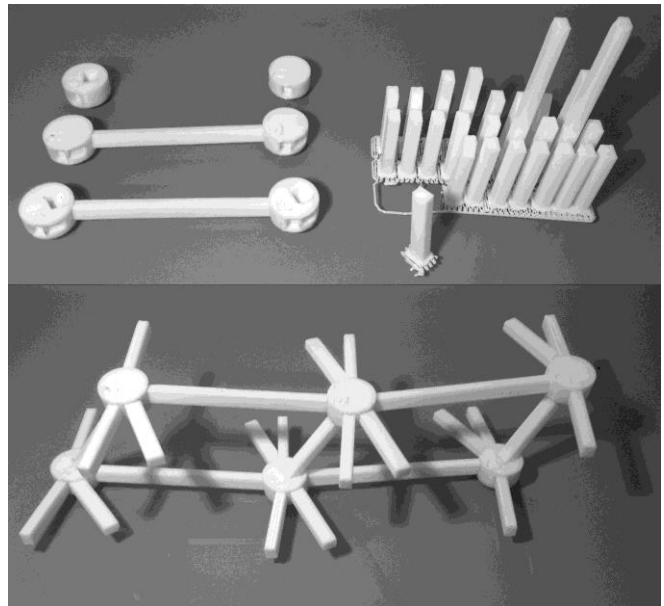
e planificação de todas elas. Tal processo simula a fabricação com os materiais reais em escala 1:1, uma vez que planifica as geometrias das peças separadas tanto dos encaixes, quanto dos conectores. Portanto, a maior parte do processo de produção dos encaixes seria personalizada de forma automatizada (Figura 8), com exceção da última etapa, que seria a montagem e soldagem das partes constituintes, a



**Figura 8:** Identificação e planificação automatizada das geometrias de peças a serem calandradas e dobradas

ser produzida artesanalmente, peça por peça.

Durante essa segunda etapa do estudo de detalhamento, houve a produção de um protótipo em escala 1:25, constituído por peças separadas, montadas entre si com encaixe simples. O modelo palpável (Figura 9) foi fabricado pelo método de adição de plástico PLA, utilizando-se uma impressora doméstica de pequeno porte, da marca UP 3D®. A definição de fabricação aditiva foi encontrada em Kolarevic (2001), que descreve o processo como a “formação gradual



**Figura 9:** Modelo palpável com peças de encaixe, em plástico PLA

pela adição de material camada a camada” (p. 272).

### Próxima fase do estudo de detalhamento

A partir do aprofundamento das soluções estruturais, vislumbrou-se a necessidade de duas cintas (Figura 10), em estrutura metálica reforçada, nas faixas perimetrais da treliça, onde se localizariam as esperas para os apoios verticais da cobertura. Tais cintas ainda estão sendo detalhadas, bem como o desenho dos apoios que distribuiriam as cargas para as fundações.

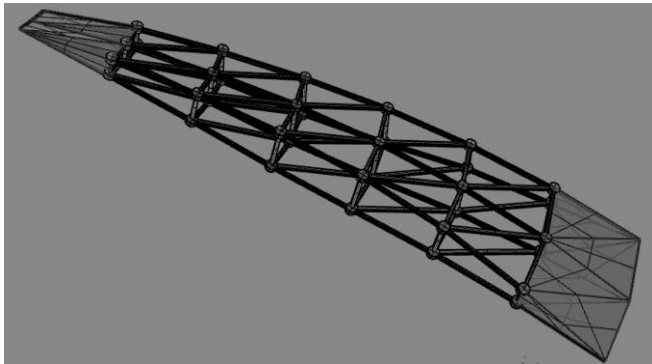


Figura 10: Destaque das cintas perimetrais de enrijecimento

## Resultados

O primeiro resultado foi um encadeamento de algoritmos orientados para a automatização de certas partes de um hipotético processo de fabricação da Catedral de Palmas. Tais algoritmos foram desenvolvidos para a interseção, identificação, planificação, gravação e corte bidimensional de peças. Os resultados gerados foram testados por meio de simulações funiculares e de protótipo em escala reduzida.

Os algoritmos referidos possibilitaram a elaboração de um sistema generativo que permitiu, por sua vez, a evolução do processo de detalhamento estrutural, mantendo informações em constante transformação, independente de alterações que pudessem surgir durante o processo. Então, outro resultado foi o modelo generativo produzido para organizar as informações para a construção.

O último resultado foi a previsão de um esquema básico de fabricação digital das peças em questão, considerando-se as aplicações tanto para modelos reduzidos, quanto para peças funcionais.

O conjunto desses resultados possibilitou a roteirização de um processo de produção digital, objetivando a automatização do máximo de etapas, desde o projeto à fabricação.

## Discussão

O presente estudo encontra-se em um estágio inicial do processo de detalhamento estrutural. Evidente que as poucas consultas de engenharia, promovidas ao longo dessa pesquisa, não abrangem um trabalho executivo completo. Todavia, a pretensão é a possibilidade de ainda simular com

precisão a melhor distribuição de cargas, conforme a engenharia específica para o caso.

Considera-se, ao mesmo tempo, que o uso de outros softwares mais especializados em metalurgia, tais como CATIA® ou Generative Components®, possam encontrar soluções mais avançadas e atingir um nível de detalhamento mais aprofundado. O que seria ideal para processos de produção mais automatizados e que tenham à disposição maquinário mais desenvolvido.

No entanto, o foco da especulação não está necessariamente no uso do melhor software, nem na definição da melhor solução de engenharia, mas na construção de um raciocínio executivo que aproveite mais do potencial industrial. A intenção é promover o uso de soluções personalizadas, uma vez que tecnologias capazes de lidar com esse tipo de demanda estão à disposição para a construção civil, no âmbito brasileiro. Em outras palavras, independente da utilização do software Rhinoceros®, ou do estágio em que se encontra o projeto de engenharia, o objetivo deste artigo é considerar um sistema que possa se adaptar ao longo de todo o processo, desde a arquitetura à construção.

Mesmo que o modelo geométrico seja alterado, por exemplo, devido a ajustes das distribuições de cargas, ou se trechos da treliça necessitarem de reforços por meio de novas barras, subdividindo-se ainda mais os vãos, compreende-se que o sistema generativo desenvolvido possibilita atualizar todas as informações automaticamente, independente da modificação dos parâmetros. Ainda, compreende-se que o desenvolvimento de um algoritmo de produção sempre pode melhorar, atingindo níveis cada vez maiores de automatização.

O sistema generativo seria a síntese do que Fraile (2014) propôs como “uma série de algoritmos generativos” (p. 8) que geram as formas arquitetônicas a partir de informações, tais como: condicionantes ambientais, econômicas, construtivas etc. Observando mais especificamente a prática profissional, Oliveira (2011) apresenta um conceito equivalente ao de sistema generativo quando menciona o “modelo iterativo” (p. 460) como resultante do projeto paramétrico. Alinha-se com a referida autora quando propõe que “o uso crescente de tecnologias CAAD (computer aided architectural design) proporciona o desenvolvimento de ferramentas que contribuem para o aumento da produtividade e a melhoria da qualidade dos projetos” (Oliveira, 2011, p. 467). De fato, contribui também para a melhoria da construção, montagem, fabricação, e maior precisão em etapas artesanais.

Para exemplificar a flexibilidade do sistema generativo, considera-se, por exemplo, que o esquema de identificação das peças se encontra em estágio primário, porque foi testado apenas no protótipo. Prevê-se que todos os conectores precisam ser identificados, bem como todas as chapas que compõem os encaixes, além das barras. Tal esquema deve, de fato, ser compatibilizado em conjunto com

o fabricante, uma vez que a complexidade da fabricação de milhares de peças, em lotes separados, para posterior soldagem artesanal, deve ser programada com as escalas de produção da fábrica; entre outros fatores que ainda não foram considerados.

Ainda, o design de todas as peças pode ser melhor detalhado, já que as soluções adotadas aqui foram as mais pragmáticas. E, evidente, que o presente estudo se restringiu apenas ao detalhamento da treliça metálica, restando ainda os detalhes das esquadrias de alumínio, da vidraria e do forro, que dariam acabamento refinado à estrutura um tanto bruta.

De qualquer maneira, por mais simples sejam as soluções adotadas aqui, já se apresenta o potencial de utilização das metodologias de produção digital em arquitetura e como elas podem constituir solidez para o profissional que precisa solucionar problemas complexos de construção. A quantidade de peças a serem detalhadas tornaria inviável o projeto individual de cada uma delas. Portanto, torna-se necessária a automatização por meio do projeto paramétrico.

Quem melhor define parametrização é Kolarevic (2003) afirmando que “no projeto paramétrico, são os parâmetros de um projeto específico que são declarados, não seu formato” (p. 17-18). Já Woodbury (2010) conceitua a modelagem paramétrica como o processo em que “partes de um projeto relacionam-se e alteram-se em conjunto de forma coordenada” (p. 11).

Ressalta-se, ainda, a importância da prototipagem rápida nesse processo, como uma etapa de auxílio nas tomadas de decisão do projetista. A execução de um modelo palpável lança o desafio de pensar construtivamente, obrigando o profissional a pensar em soluções de viabilização executiva.

Bertho (2011) demonstra essa tese por meio da aplicação de protótipos em escala reduzida, no canteiro de obras, para visualização por parte de operários. As entrevistas que a autora realizou, diretamente com construtores e trabalhadores do campo da construção civil, demonstram, por exemplo, que o protótipo “seria muito útil no canteiro, pois permite a visualização de detalhes que não podem ser compreendidos com a planta 2D” (Bertho, 2011, p.453-454). Concorde-se também com Pupo (2011) quando considera que a prototipagem rápida é uma ferramenta que permite “ultrapassar os limites da complexidade, alcançando com muito mais eficiência as necessidades e exigências do ser humano” (p.484).

## Considerações finais

Enfim, o que se pretende discutir é a maneira como o papel do arquiteto pode se ampliar devido à utilização de novas técnicas de projeto, tornando-o cada vez mais presente, por exemplo, durante as etapas de concepção e detalhamento estrutural. O escopo de trabalho se amplia, bem como a responsabilidade técnica, em um processo de requalificação profissional, o que possibilita vislumbrar como a arquitetura

pode evoluir, em termos de suas aplicações dentro do campo da construção civil, e como essa evolução tende cada vez mais à interdisciplinaridade.

Oosterhuis (2012) corrobora esse ponto de vista quando propõe um reposicionamento social do arquiteto que detém o conhecimento sobre parametrização e fabricação digital. Para o arquiteto holandês, quando os profissionais têm “controle total e plena confiança que seus dados estão corretos e precisos, eles precisam assumir a responsabilidade pela engenharia da geometria, e naturalmente precisam ser pagos proporcionalmente por tal responsabilidade” (Oosterhuis, 2012, p. 419).

No entanto, deve-se ter em vista o contexto nacional, antes de se assumir uma perspectiva internacional. No Brasil as tecnologias mais avançadas estão localizadas em pontos específicos, não são bem distribuídas pelo território. Mesmo assim, por mais básico seja o estágio de avanço tecnológico de determinada localidade, o que se percebe é ainda uma subutilização dos recursos, por parte dos projetistas e da construção civil em geral. O modelo padronizado é o que prevalece na maioria dos casos. Todavia, o interessante a se notar é o potencial de aplicação desse tipo de tecnologia mesmo para soluções que não envolvam a complexidade geométrica.

## Referências

- Bertho, B. C., Bonaldo, T. C. G., Granja, A. D., & Celani, M. G. C. (2011). A prototipagem rápida: do processo de projeto ao canteiro de obras. In: D. C. C. K. Kowaltowski, D. C. Moreira, J. R. D. Petreche, & M. M. Fabricio (Eds.), *O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia* (p. 443-454). São Paulo, SP: Oficina de Textos.
- Fraile, M. (2014). El nuevo paradigma contemporâneo: del diseño paramétrico a la morfogénesis digital. Disponível em: <http://ariel-amadio.com/docencia/wp-content/uploads/2013/08/El-nuevo-paradigma-contempor%C3%A1neo.-Del-dise%C3%B1o-param%C3%A9trico-a-la-morfog%C3%A9nesis-digital-Marcelo-Fraile-.pdf>
- Kolarevic, B. (2001). Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age. *ACADIA*, 2001, 268-277.
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. New York & London: Taylor & Francis.
- Oliveira, M. R., & Fabricio, M. M. (2011). Projeto paramétrico e prototipagem rápida: casos em instituições internacionais. In: D. C. C. K. Kowaltowski, D. C. Moreira, J. R. D. Petreche, & M. M. Fabricio (Eds.), *O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia* (p. 455-469). São Paulo, SP: Oficina de Textos.
- Oosterhuis, K. (2012). Simply complex: toward a new kind of building. *Frontiers of architectural research*, 1(4), 411-420.
- Pottmann, H., Asperl, A., Hofer, M., Kilian, A. (2007). *Architectural geometry*. Exton, PA: Bentley Institute Press.
- Pupo, R., & Celani, M. G. C. (2011). Prototipagem rápida e fabricação digital na arquitetura: fundamentação e formação. In: D. C. C. K. Kowaltowski, D. C. Moreira, J. R. D. Petreche, & M. M. Fabricio (Eds.), *O processo de projeto em arquitetura: da teoria à tecnologia* (p. 470-485). São Paulo, SP: Oficina de Textos.