

Copyright (c) 2021 Laboratório de Sustentabilidade Aplicada a Arquitetura e ao Urbanismo (LaSUS FAU)



Este trabalho está licenciado sob uma licença [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

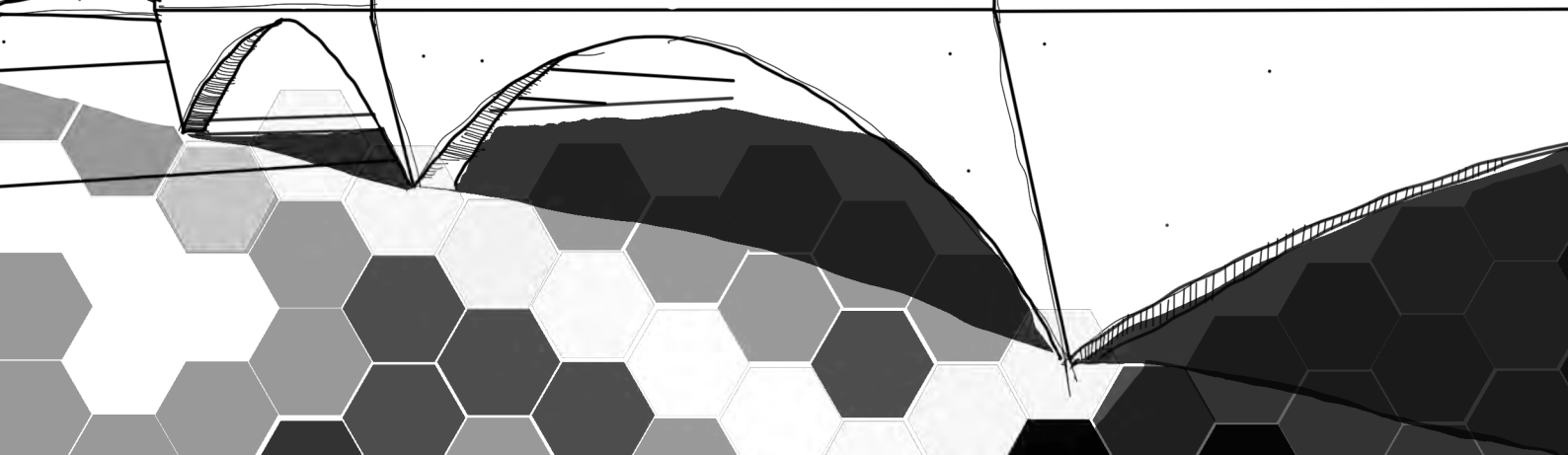
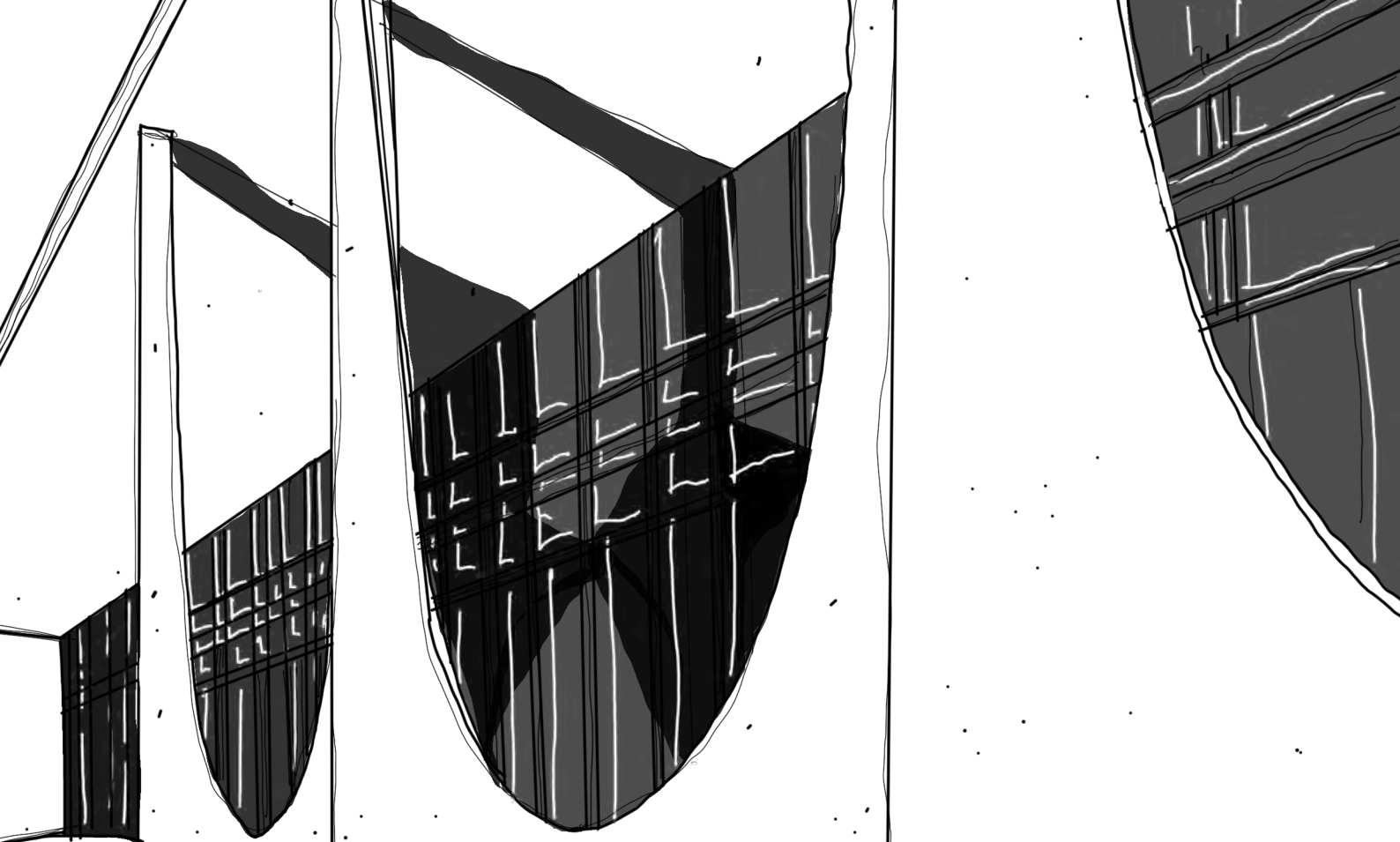
Fonte: <https://livros.unb.br/index.php/portal/catalog/book/107>. Acesso em: 04 jul. 2022.

Referência

GALIMI, Stefano; PANTOJA, João da Costa. Aproveitamento de águas pluviais em edificações públicas: o caso da Procuradoria Geral da República. In: PANTOJA, João da Costa; BUZAR, Márcio Augusto Roma; PORTO, Naiara Guimarães de Oliveira (org.). **Tecnologia, ambiente e sustentabilidade**. Brasília: LaSUS FAU, 2021. p. 181-206. DOI:

<https://doi.org/10.26512/9786599238444>. Disponível em:

<https://livros.unb.br/index.php/portal/catalog/book/107>. Acesso em: 04 jul. 2022.



TECNOLOGIA, AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

Coletânea de Artigos

Organizadores:

João da Costa Pantoja
Márcio Augusto Roma Buzar
Naiara Guimarães de Oliveira Porto



Universidade de Brasília

IX

**APROVEITAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM EDIFICAÇÕES PÚBLICAS:
O CASO DA PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA**

**USE OF RAINWATER IN PUBLIC BUILDINGS: THE CASE OF THE
ATTORNEY GENERAL'S OFFICE**

Stefano Galimi

Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Brasília – DF, Brasil
stefanogalimi.arch@gmail.com

João da Costa Pantoja

Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Brasília – DF, Brasil
joaocpantoja@gmail.com

Resumo: O presente trabalho aborda uma análise dos usos-finais de consumo da água em uma das edificações principais (bloco A) constituinte a Procuradoria Geral da República, obra prima de autoria do Oscar Niemeyer. O sistema de aproveitamento de águas pluviais (AAP), que não foi previsto na concepção arquitetônica do prédio em questão, seria uma solução sustentável na redução do uso da água da rede principal para usos não potáveis da água de chuva. Através de um cálculo feito em base mensal, será verificada a relação entre a área de coleta (cobertura) e o volume ideal da cisterna, a demanda de água requerida para três cenários (Irrigação + Lavagem de pisos, Descarga sanitária e Irrigação + Lavagem de pisos + Descarga sanitária) e o potencial de redução do consumo de água promovido pelo sistema AAP. Para alcançar o objetivo, foi utilizada a normativa brasileira ABNT NBR 15527:2207 e, na hora do cálculo para dimensionamento do reservatório de água de chuva, o método de Rippl. Nesse método, que consiste no balanço de massa, permitindo o uso de dados de precipitação mensal ou diário, é considerada a demanda de consumo dos usuários.

Palavras chaves: Água; Sistema de aproveitamento de águas pluviais (AAP); Usos-finais de água; Conservação de água; Procuradoria Geral da República.

Abstract: The present work deals with an analysis of the end-uses of water consumption in one of the main buildings (block A) of the Attorney General's Office, a masterpiece by Oscar Niemeyer. The rainwater harvesting system (AAP), which was not foreseen in the architectural design of the building in question, would be a sustainable solution in reducing the use of water from the main network for non-potable uses of rainwater. Through a calculation made on a monthly basis, the relationship between the collection area (cover) and the ideal volume of the cistern will be verified, the water demand required for three scenarios (Irrigation + Floor washing, Sanitary flush and Irrigation + Water washing) floors + sanitary discharge) and the potential for reducing water consumption promoted by the AAP system. To achieve the objective, the Brazilian standard ABNT NBR 15527: 2207 was used and, at the time of calculation for dimensioning the rainwater reservoir, the Rippl method. In this

method, which consists of the mass balance, allowing the use of monthly or daily precipitation data, users' consumption demand is considered.

Keyword: water, rainwater harvesting system (AAP), end-uses of water, water conservation, Attorney General's Office

1. INTRODUÇÃO

Em geral, no Brasil, a oferta de recursos hídricos demonstra uma situação confortável e satisfatória (ANA, 2013). Apesar disso, a distribuição espacial desses recursos está diferente e desigual, evidenciando uma concentração maior (cerca de 80%) na região hidrográfica amazônica. O crescimento demográfico (IBGE, 2012) e a demanda urbana de água sempre em aumento no Distrito Federal (CAESB, 2008; 2011) começou a gerar um interesse sempre maior voltado para programas de conservação de água. Segundo Gonçalves (2007), a utilização de águas “menos nobres” para fins não potáveis é um conceito importante que atua uma otimização real do consumo hídrico, graças ao auxílio de fontes alternativas.

O aproveitamento de águas pluviais (AAP) é uma estratégia que permite de armazenar a água de chuva captada pelo telhado e de utilizá-la para fins não potáveis. A normativa brasileira ABNT NBR 15527:2007 fornece os requisitos fundamentais para o aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas e prevê o uso exclusivo (após de tratamentos adequados) para descargas em bacias sanitárias, irrigação de gramados e plantas ornamentais, lavagem de veículos, limpeza de calçadas e ruas, limpeza de pátios, espelhos de água e usos industriais.

1.1 Justificativa

A escassez dos recursos hídricos leva à uma certa mudança do próprio regime das águas (tornando-as de domínio publico), focando a atenção na preservação dos cursos d'água e relativa qualidade (FINK & SANTOS, 2003).

O termo “reuso” indica que a natureza do significado se refaz ao próprio uso racional da água (FINK & SANTOS, 2003).

“Reuso de água é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir a necessidade de outros usos benéficos, inclusive o original. Pode ser direto ou indireto, bem como decorrer de ações

planejadas ou não”.

(LAVRADOR FILHO, 1987).

A grande demanda de consumo hídrico que afeta as fontes de abastecimento de água, levou o Ministério do Meio Ambiente – MMA (2014) a recomendar a conscientização de um uso racional dos recursos através dos Programas de Conservação de Água.

A Procuradoria Geral da República, obra realizada em 2002, incentivou o presente estudo, que foi feito para verificar a viabilidade técnica e financeira de aplicação de um sistema de AAP em uma edificação pública. Com certeza, a instalação desse tipo de tecnologia seria ideal numa edificação nova, enquanto os retrofits sempre apresentam uma barreira projetual significativa do ponto de vista econômico.

O próprio sistema de AAP é um conceito simples que, ao invés de deixar a água de chuva escorrer pela sarjeta, permite o aproveitamento da mesma para diferentes usos-finais não potáveis (SANT’ANA & AMORIM, 2007).

A qualidade da água de chuva, que representa um ponto focal nesse estudo, deve ser garantida por meio de filtragens e tratamentos químicos/biológicos.

Mesmo sendo pura, a água pluvial contém impurezas devidas ao contato com o ar e com a superfície de captação (telhado).

“Apesar de ser uma alternativa economicamente viável e sócio ambientalmente correta, o aproveitamento de águas pluviais não deve ser implementado de forma irresponsável. Diversas pesquisas demonstram que a água de chuva carrega poluentes (substâncias tóxicas e bactérias), cuja ingestão ou contato com a pele e mucosas pode causar doenças, que vão desde simples irritações cutâneas a severas infecções intestinais.”

(PRADO & MULLER, 2007. p.1).

Ao tratar esse tipo de tema ligado a aplicações (de sistemas de AAP) para tipologias não-residenciais de estudos de caso, não foram feitas muitas pesquisas nacionais no Brasil. Temos algumas análises dos usos-finais do consumo de água em edifícios públicos feitas por KAMMERS & GHISI (2006), e em edifícios escritórios em Florianópolis (PROENÇA & GHISI, 2010). Um outro estudo em ambiente de escritórios do Complexo Central de Tecnologia do Banco do Brasil, realizado por SANT’ANA (2013), mostra o potencial de redução do

consumo de água (em seus usos-finais) e benefícios gerados pelo uso de três diversos sistemas de AAP.

Para a elaboração do artigo foi realizada uma revisão de literatura específica sobre os tipos de sistemas de AAP, qualidade da água e relativa normativa brasileira.

Portanto, esse trabalho pretende avaliar a aplicação de um sistema de AAP em uma edificação pública do Distrito Federal, a Procuradoria Geral da República, e verificar os usos-finais do consumo predial de água.

2. METODOLOGIA

A Procuradoria Geral da República (PGR) é um conjunto arquitetônico projetado por Oscar Niemeyer em 1996 e realizado em 2002, formado por 6 blocos. A produção artística do arquiteto na capital federal do Brasil, descrita e analisada por várias figuras em nível tanto nacional quanto internacional, ainda não tem muitos estudos sobre as soluções tecnológicas adotadas pelo arquiteto brasileiro (Fonseca, R., 2007). A obra, consta de uma área construída de aproximadamente 70 mil m². Localizada na via L4 sul (Setor de Administração Federal Sul, quadra 04, lote 03) em Brasília, a PGR (Figura 1) se impõe no entorno através da magnitude e da beleza dos dois edifícios principais envidraçados (bloco A e bloco B).

Esses blocos, interligados por meio de uma passarela, abrigam os gabinetes dos procuradores e representam o fulcro de todo o complexo.

Conectados a estes por meio de uma longa passarela, há dois volumes menores que representam o auditório (bloco C) e o restaurante (bloco D).

Um outro prédio, de volumetria circular e próximo do prédio principal, funciona como plenário dos procuradores (bloco E). O último bloco (F), de planta trapezoidal, contém o próprio departamento administrativo e da engenharia da Procuradoria.



Figura 1. Procuradoria Geral da República, fonte: Google Earth

O objeto escolhido para a análise dos usos-finais de consumo hídrico foi o edifício A (Figura 2).



Figura 2. Bloco A do complexo da PGR, fonte: arquivo PGR

A pesquisa foi desenvolvida a partir de duas etapas fundamentais: Visita in loco e entrevista a usuário-chave.

Primeiramente, foi feita uma visita in loco para entender a distribuição espacial do ambiente e ter noção do fluxo/número dos usuários da edificação. Nessa etapa foram obtidas todas aquelas informações úteis sobre os dias (5 dias por mês, de segunda à sexta) e os horários de trabalho (9hs – 17hs), frequências das atividades de limpeza (lavagem de piso, 2 vezes por dia, de manhã e de

noite) e de irrigação (1 vez por dia, no período matutino).

A segunda fase foi desenvolvida através de entrevistas aos usuários-chave da Procuradoria (servidores públicos e funcionários). Após dessa operação, efetuada por meio de uma amostra limitada a um número de quatro usuários, utilizou-se uma frequência de uso das bacias sanitárias relativa a 4 vezes ao dia com um volume de descargas sanitárias de 6 litros por fluxo (valor presumido).

Através da obtenção do arquivo DWG das plantas de arquitetura, foi possível medir as áreas de rega de jardim e de lavagem de piso.

Depois de ter feito o levantamento completo de dados primários e das informações necessárias para o desenvolvimento do artigo, foram escolhidos três cenários de usos-finais de consumo hídrico:

- **Cenário 1** (Irrigação e Lavagem de piso);
- **Cenário 2** (Descarga Sanitária, WC);
- **Cenário 3** (Irrigação, Lavagem de piso e Descarga Sanitária).

Obtidas as médias mensais de séries históricas de precipitação da cidade de Brasília, foi considerado um coeficiente de escoamento (C_e) = 0,7 (LEGGETT et al., 2001) e um coeficiente de filtragem (C_f) = 0,9 de um filtro tipo “Vortex”.

Portanto, com base nesses dados, para conseguir a Oferta de água pluvial no intervalo de tempo t , foi aplicada a seguinte equação 1:

$$Qt = \frac{PPt \times A \times C_e \times C_f}{1000} \quad (1)$$

Onde:

Qt = Oferta de água pluvial no tempo, t (m³)

PPt = Precipitação no tempo, t (mm)

A = Área da superfície de coleta (m²)

C_e = Coeficiente de escoamento da superfície de coleta

C_f = Coeficiente de filtragem

No Cenário 1 (Irrigação e Lavagem de piso) foram consideradas diferentes demandas mensais.

No caso da irrigação, foram considerados somente os cinco meses da época de seca (maio, junho, julho, agosto e setembro), onde a oferta de água pluvial é consideravelmente escassa.

Para a demanda de lavagem de piso, o cálculo foi feito em base a todos os meses do ano (de janeiro à dezembro).

No Cenário 2 (Descarga Sanitária, WC), todos os meses do ano foram utilizados para o cálculo da demanda para consumo predial de água.

Os indicadores de consumo, que permitiram o cálculo da demanda para irrigação, lavagem de piso e descarga sanitária para todos os cenários, foram obtidos através de TOMAZ (2000).

Achada a oferta de água pluvial Q_t (m³) para todos os meses do ano, foram calculados a demanda de consumo hídrico para cada Cenário e a dimensão do reservatório através do método Rippl (NBR 15527:2007). Neste método, onde podem-se usar as séries históricas mensais ou diárias, o volume de água que escoou pela superfície de captação é subtraído da demanda de água pluvial em um mesmo intervalo de tempo t . É um método de cálculo de volume de armazenamento necessário para garantir uma vazão regularizada constante durante o período mais crítico de estiagem observado (SCHILLER & LATHAN, 1982).

Segundo o método Rippl, foi aplicada essa equação 2:

$$S(t) = D(t) - Q(t) \quad (2)$$

$V = \sum S(t)$, somente para valores $S(t) > 0$

Sendo que: $\sum D(t) < \sum Q(t)$

Onde:

$S(t)$ é o volume de água no reservatório no tempo t ;

$Q(t)$ é o volume de chuva aproveitável no tempo t ;

$D(t)$ é a demanda ou consumo no tempo t ;

V é o volume do reservatório;

No Cenário 3 foi comparada a somatória das demandas cumulativas (irrigação, lavagem de piso e descarga sanitária) com a oferta mensal de água de chuva captada pelo telhado.

3. RESULTADOS

Os resultados demonstraram uma demanda predial cumulativa (D_t) com de 115.534 m³/ano para irrigação, lavagem de piso e descarga sanitária. Porém, a oferta cumulativa Q_t com de volume de água de chuva em base anual é de 14.196 m³/ano. Como podemos observar na tabela 1 (Irrigação), a demanda mensal D_t (Irr) para os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro é muito

elevada (4.688 m³/ano) para ser suprida pela oferta Qt (2106 m³/ano).

Tabela 1. Indicadores de consumo mensal para Irrigação

Mês	PP	Irrigação	Indicador	Frequência*	Área	Dias de Uso por mês	Oferta (Qt)	Demanda (Dt Irr)
	mm		litros/m ² /dia	*por dia de uso	m ²	dias/uso	m ³	m ³
Janeiro	270	x	1,5	1	23.500	27	361	-
Fevereiro	213	x	1,5	1	23.500	24	284	-
Março	210	x	1,5	1	23.500	27	280	-
Abril	121	x	1,5	1	23.500	26	162	-
Maio	36	v	1,5	1	23.500	27	48	952
Junho	10	v	1,5	1	23.500	26	13	917
Julho	6	v	1,5	1	23.500	27	8	952
Agosto	13	v	1,5	1	23.500	27	17	952
Setembro	48	v	1,5	1	23.500	26	64	917
Outubro	171	x	1,5	1	23.500	27	228	-
Novembro	220	x	1,5	1	23.500	26	294	-
Dezembro	259	x	1,5	1	23.500	27	346	-
Total	1577						2106	4688

A figura 3 abaixo demonstra a relação entre Oferta Q(t) e Demanda Dt (Irr).

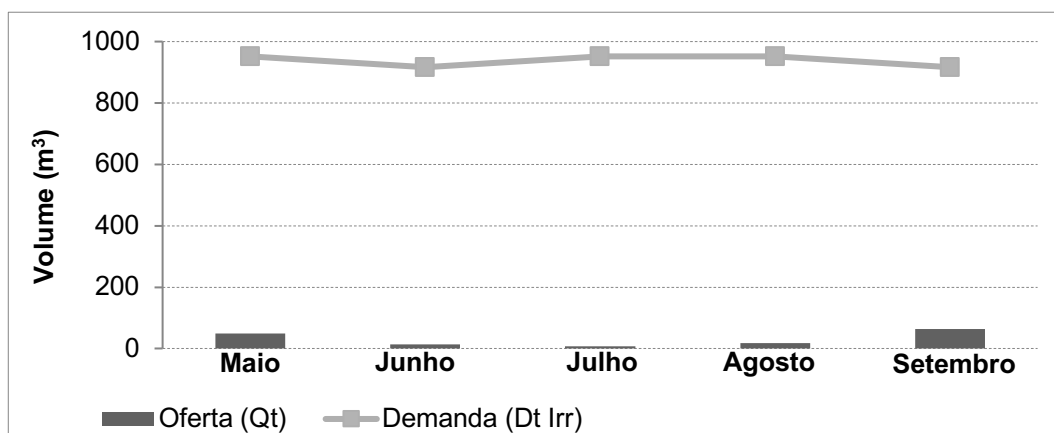


Figura 3. Oferta vs Demanda para Irrigação

A tabela 2 abaixo faz um resumo do consumo de água para lavagem de piso. A frequência de limpeza consta em um uso de 2 vezes por dia, por um total de 5 dias por semana. Com uma área construída da 14.427 m², a demanda de água é muito elevada, totalizando um volume de 11.643 m³.

Tabela 2. Indicadores de consumo mensal para lavagem de piso

Mês	PP	Lavagem de Piso	Indicador	Frequência*	Área	Dias de Uso por mês	Oferta (Qt)	Demanda (Dt Lav)
	mm		litros/m ² /dia	*por dia de uso	m ²	dias/uso	m ³	m ³
Janeiro	270	v	1,5	2	14.427	23	361	995
Fevereiro	213	v	1,5	2	14.427	20	284	866
Março	210	v	1,5	2	14.427	23	280	995
Abril	121	v	1,5	2	14.427	22	162	952
Mai	36	v	1,5	2	14.427	23	48	995
Junho	10	v	1,5	2	14.427	22	13	952
Julho	6	v	1,5	2	14.427	23	8	995
Agosto	13	v	1,5	2	14.427	23	17	995
Setembro	48	v	1,5	2	14.427	22	64	952
Outubro	171	v	1,5	2	14.427	23	228	995
Novembro	220	v	1,5	2	14.427	22	294	952
Dezembro	259	v	1,5	2	14.427	23	346	995
Total	1577						2106	11643

A demanda de consumo de água para lavagem de piso em relação com a oferta é representada através da figura 4.

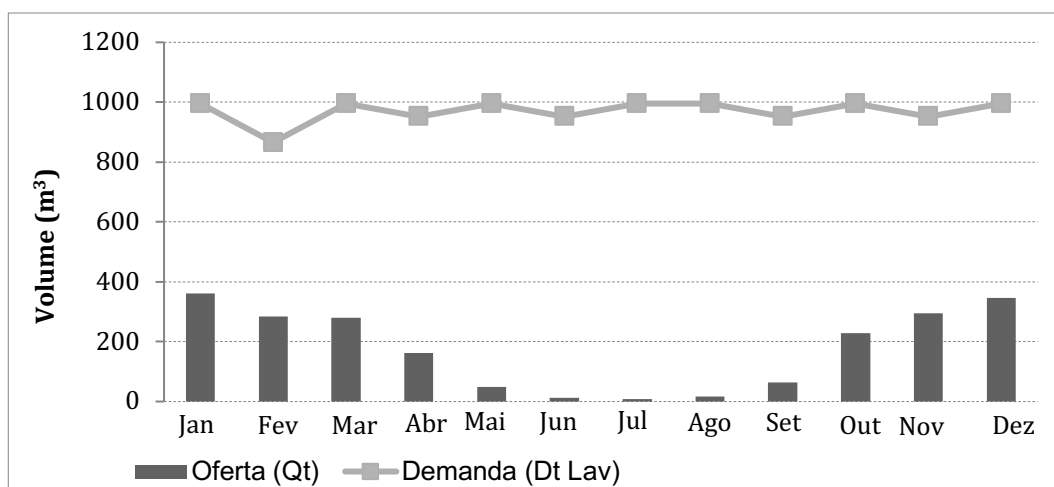


Figura 4. Oferta vs Demanda para Lavagem de piso

Para alcançar os objetivos do **Cenário 1** (Irrigação e Lavagem de piso) foi feita uma somatória das demandas mensais, que, no caso da irrigação, considera somente os meses da estação de seca (de maio a setembro).

Tabela 3. Volumes para dimensionamento do reservatório do sistema

Mês	Demanda Irr e Lav	Oferta (Qt)	D-Q
	m ³	m ³	m ³
Janeiro	995	361	634
Fevereiro	866	284	582
Março	995	280	715
Abril	952	162	790
Mai	1947	48	1899
Junho	1869	13	1856
Julho	1947	8	1939
Agosto	1947	17	1930
Setembro	1869	64	1805
Outubro	995	228	767
Novembro	952	294	658
Dezembro	995	346	649
Total	16331	2105	14226

Portanto, o tamanho do reservatório para água de chuva, obtido em base anual segundo o método Rippl (NBR 15527:2007) para atender a demanda de irrigação e lavagem de piso (Cenário 1), deveria ter uma capacidade de 14.226 m³ de água.

Passando para o **Cenário 2** de descarga sanitária, podemos observar que, na tabela 4, o consumo hídrico para fins não-potáveis em base anual exigido pela demanda (Dt Wc) consta de um volume de 1872 m³. E, como a oferta total de água de chuva (2106 m³) é superior da demanda, a implementação de um sistema de AAP no edifício considerado seria viável do ponto de vista técnico. O gráfico da figura 5 mostra essa relação de Demanda e Oferta.

Tabela 4. Indicadores de consumo mensal para Descarga Sanitária

Mês	PP	Descarga Sanitária (Wc)	Indicador	Frequência*	Usuários	Dias de Uso por mês	Oferta (Qt)	Demanda (Dt Wc)
	mm	fluxos	litros por fluxo	*por dia de uso	peessoa	dias/uso	m ³	m ³
Janeiro	270	v	6	4	290	23	361	160
Fevereiro	213	v	6	4	290	20	284	139
Março	210	v	6	4	290	23	280	160
Abril	121	v	6	4	290	22	162	153
Mai	36	v	6	4	290	23	48	160
Junho	10	v	6	4	290	22	13	153
Julho	6	v	6	4	290	23	8	160
Agosto	13	v	6	4	290	23	17	160
Setembro	48	v	6	4	290	22	64	153
Outubro	171	v	6	4	290	23	228	160

Novembro	220	v	6	4	290	22	294	153
Dezembro	259	v	6	4	290	23	346	160
Total	1577						2106	1872

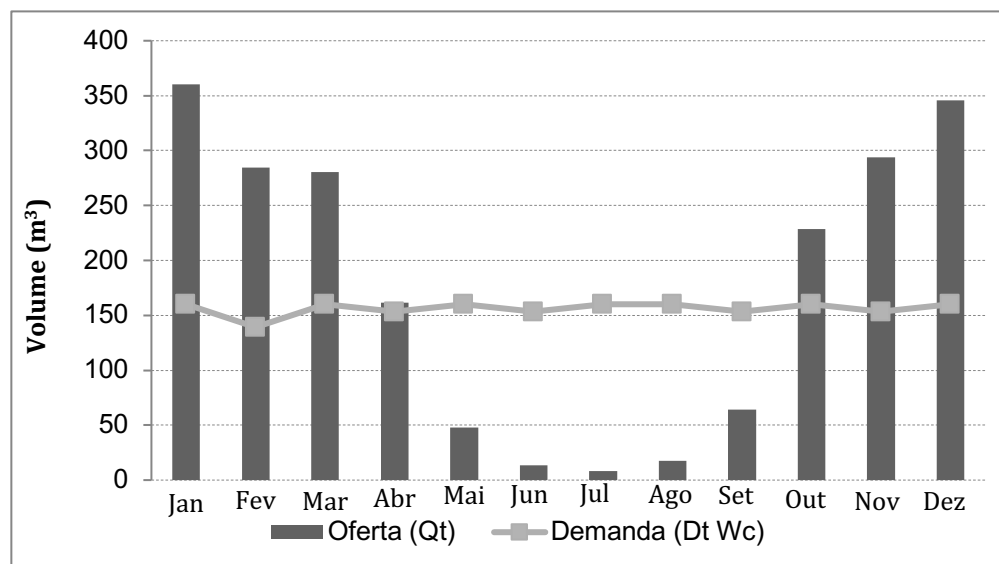


Figura 5. Oferta vs Demanda para Descarga Sanitária

O **Cenário 3** propõe as três demandas de irrigação, lavagem de piso e descarga sanitária para verificar a relação existente com a oferta de água pluvial. A tabela 5, das demandas e das ofertas cumulativas, evidencia uma inviabilidade para aplicação de um sistema de AAP enquanto a somatória das demandas é muito mais elevada da mesma oferta.

Tabela 5. Cenário 3, Demanda cumulativa vs Oferta cumulativa

Mês	Oferta (Qt)	Demanda Irr, Lav, Wc	Qcum	Dcum
	m³	m³	m³	m³
Janeiro	361	1156	361	1156
Fevereiro	284	1005	645	2160
Março	280	1156	925	3316
Abril	162	1105	1087	4421
Mai	48	2107	1135	6529
Junho	13	2022	1148	8550
Julho	8	2107	1156	10658
Agosto	17	2107	1173	12765
Setembro	64	2022	1237	14787
Outubro	228	1156	1465	15942
Novembro	294	1105	1759	17048
Dezembro	346	1156	2105	18203
Total	2105	18203	14196	115534

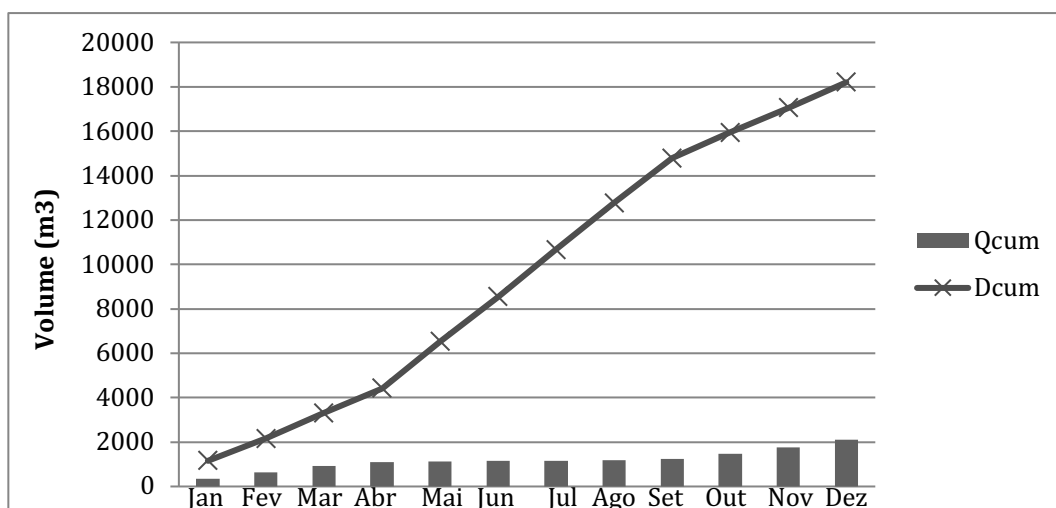


Figura 6. Oferta cumulativa vs Demanda cumulativa para Cenário 3 (Irr, Lav, Wc)

4. CONCLUSÕES

Esse presente trabalho, desenvolvido para três diferentes cenários voltados aos usos-finais do consumo de água não-potável, investiga sobre a relação entre a oferta de água pluvial e a demanda exigida pelos usuários da Procuradoria Geral da República, objeto de análise. O estudo, indicou a viabilidade técnica e a aplicabilidade de um sistema de AAP somente em um dos casos avaliados (Cenário 2). Nas diferentes simulações efetuadas, o aproveitamento de águas pluviais voltado ao consumo de água não potável em descarga sanitária (Cenário 2) resultou ser a melhor opção dos três cenários, enquanto o indicador de consumo em bacias sanitárias demonstrou um índice de consumo para o fluxo de descarga (6 litros por fluxo, com uma frequência de 4 vezes ao dia) que consegue ser suprido pelo volume de água de chuva da oferta.

Resultados sugerem que o sistema de AAP não seja aplicado para satisfazer a demanda de irrigação de rega e de lavagem de piso (Cenário 1) e a demanda representada pelo Cenário 3 (irrigação, lavagem de piso e descarga sanitária).

Essa questão vem sendo determinada pela superfície de cobertura que, com uma área de 2119,5 m², resulta insuficiente para um aproveitamento exaustivo da água de chuva para usos-finais não potáveis.

As limitações do presente estudo são principalmente devidas a uma entrevista restrita a uma amostra de quatro usuários. Certamente, um número mais elevado de utentes na hora da obtenção de dados primários através de entrevistas, ajudaria aumentar a precisão da análise efetuada neste artigo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não-potáveis**. NBR 15527. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), 2013. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, 2013. Brasília, DF, 2013. P. 37-38.
- CAESB. **Siágua 2008**: Sinopse do sistema de abastecimento de água no Distrito Federal. 19 ed. Brasília: CAESB, 2008. P. 143.
- CAESB. **Siágua 2011**: Sinopse do sistema de abastecimento de água no Distrito Federal. 19 ed. Brasília: CAESB, 2011. P. 152.
- FEWKES, A. **The technology, design and utility of rainwater catchment Systems: A Literature Review**. In: Water Demand Management Org. BUTLER, D.; MEMON, F. Londres, UK: IWA Publishing, 2006.
- FINK, D. R.; SANTOS, H. F. **A legislação de reúso de água**. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reúso de Água, 2003, Barueri, São Paulo: Manole, 2003. P. 261-290.
- FONSECA, R. P. da. **A Ponte de Oscar Niemeyer em Brasília: Construção, Forma e Função Estrutural**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2007.
- IBGE. **Estimativas de população**. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012.
- KAMMERS, P. C.; GHISI, E. **Usos finais de água em edifícios públicos localizados em Florianópolis**, SC. Ambiente Construído, v.6, n.1, p. 75-90, 2006.
- LAVRADOR FILHO, J. **Contribuição para o Entendimento do Reúso planejado da Água e algumas Considerações Sobre suas Possibilidades no Brasil**. São Paulo, 1987.
- LEGGETT, D.; BROWN, R.; BREWER, D. HOLLIDAY, E. **Rainwater and greywater use in buildings: best practice guidance**. London: CIRIA, 2001.
- OLIVEIRA, L. H. De; ILHA, M. S. de O.; GONÇALVES, O. M.; REIS, L. **Projeto Tecnologias para Construção Habitacional mais Sustentável - Levantamento do estado da arte: Água**. São Paulo: USP, 2007.
- PRADO, G. S.; MULLER, M. S. K. **Sistema de aproveitamento de água para**

- edifícios.** Revista *téchne*, 138. Ed. Novembro de 2007. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/128/artigo285704-1.aspx>>. Acesso em: 1 março de 2015.
- PROENÇA, L. C.; GHISI, E. **Water end-uses in Brazilian Office buildings.** Resources, Conservation and Recycling, v.54, n.8, p.489-500, 2010.
- SANT'ANA, D.; AMORIM, C. N. D. **Reuso de água em edificações: premissas e perspectivas para o contexto brasileiro.** Sistemas Prediais, São Paulo, v.2, n.1, setembro, p.32-37. 2007.
- SANT'ANA, D. **Aproveitamento de água pluvial no Complexo Central de Tecnologia do Banco do Brasil.** Terra. Qualidade de Vida, Mobilidade e Segurança nas Cidades, João Pessoa, Paraíba, Editora Universitária da UFPB, p. 701-714, 2013.
- SANT'ANA, D.; BOEGER, L.; VILELA, L. **Aproveitamento de águas pluviais e o reuso de águas cinzas em edifícios residenciais de Brasília - parte 1: reduções no consumo de água.** Paranoá, Brasília, n.10, p. 77-84, 2013.
- SCHILLER, E.; LATHAM, B. **Computerized methods in optimizing rainwater catchment systems.** In: International Conference on Rainwater Cistern System, 1st, 1982, Honolulu, United States. Honolulu: IRCSA, 1982.
- TOMAZ, Plinio. **Previsão de Consumo de Água. Interface das Instalações Prediais de Água e Esgoto com os Serviços Públicos.** Ed. São Paulo: Navegar Editora, 2000.

X

**ANÁLISE DE UMA COBERTURA PARAMÉTRICA DE BAMBU
COMPOSTA POR PARABOLOIDES HIPERBÓLICOS**

**ANALYSIS OF A HYPERBOLIC PARABOLOID PARAMETRIC BAMBOO
ROOF**

Vitor Ramos de Quadros

Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Brasília - DF

vitorquadros.arq@gmail.com

<http://lattes.cnpq.br/2522203679195461>

João da Costa Pantoja

Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Brasília - DF

joaocpantoja@gmail.com

<http://lattes.cnpq.br/6879105340639188>

Resumo: Apesar de ser um material utilizado tradicionalmente de forma milenar na construção civil, o bambu até recentemente era considerado um material de baixa qualidade. Porém, pesquisas e aplicações têm demonstrado diversas vantagens do uso de bambu, principalmente no quesito sustentabilidade. Há grande possibilidade de aplicações tecnológicas neste material tradicional e para este trabalho foram utilizados design paramétrico e softwares de estrutura. Para tanto, uma cobertura de bambu composta por paraboloides hiperbólicos foi analisada e suas possibilidades exploradas.

Palavras-chave: *Guadua angustifolia*, *Bambusa tuldoides*, bambu, Grasshopper, Karamba3D.

Abstract: Although bamboo is a material traditionally used in buildings for thousands of years, it was until recently considered a low-quality material. However, researches and applications have shown that bamboo is a material with several advantages, especially in terms of sustainability. There is great possibility of technological applications in this traditional material, and for this work, it was used parametric design and structural analysis softwares. To do so, a bamboo roof made of hyperbolic paraboloids was analyzed and its possibilities were explored.

Keywords: *Guadua angustifolia*, *Bambusa tuldoides*, bamboo, Grasshopper, Karamba3D

1. INTRODUÇÃO

Até recentemente, o bambu era estigmatizado como “a madeira dos pobres” (Borah, 2015), porém, o bambu é um material de baixo impacto ambiental, leve, renovável e economicamente viável (Minke, 2016). O bambu é uma matéria-prima de alta resistência mecânica, sendo em vários aspectos comparável ao

aço, como na resistência à tração, porém é um material muito mais leve (Carbonari et al., 2017). Se manejada de forma correta, uma mesma touceira de bambu pode fornecer material de forma periódica, podendo chegar a 50 anos, não sendo necessário o replantio, o que garante alta produção de material com baixos danos ambientais, além de baixo custo para obtenção do material cru (Greco & Crombewrg, 2011).

O bambu tem alta taxa de crescimento e, em média, bambus lenhosos podem ser usados para estruturas entre 4 e 6 anos após o plantio e, após a colheita, a touceira fornece material anualmente. Além disso, pode ser cultivado em diversos tipos de solo, inclusive solos pobres, evitando erosões e recuperando áreas degradadas (Arce-Villalobos, 1993). Ghavami (1992) aponta a necessidade e demanda pelo desenvolvimento de tecnologias em materiais de construção civil sustentáveis e renováveis.

Apesar de ser um material tradicional, processos tecnológicos e construtivos tornaram o bambu um material muito atrativo. A flexibilidade das varas e a possibilidade de moldar suas formas, tornam o bambu um material aplicável inclusive em projetos de alta complexidade formal (Figura 1), como os que usam parametrização ou formas orgânicas (Nurdiah, 2016).



Figura 1: Exemplo de construção de alta complexidade construída em bambu. Fonte: <https://www.archdaily.com/905690/bamboo-pavilion-zuo-studio>

2. METODOLOGIA

2.1 Parametrização

O design paramétrico é constituído por quatro elementos: as condições iniciais e parâmetros (conhecido como input), um mecanismo generativo (o

algoritmo), a seleção das variáveis (conhecido como output) e por último a seleção das melhores variáveis (Dino, 2012). O processo paramétrico de design, além de possibilitar complexidade formal, também facilita o estudo e as alterações de projeto de forma instantânea, o que contribui na identificação de problemas e potencialidades na estrutura. Um software de parametrização que é amplamente utilizado é o Grasshopper, plugin da plataforma Rhino 3D. Suas principais vantagens são a interface simples (Figura 2) e a baixa complexidade na criação de algoritmos, não requerendo conhecimento de linguagens de programação (Mirtschin, 2011).

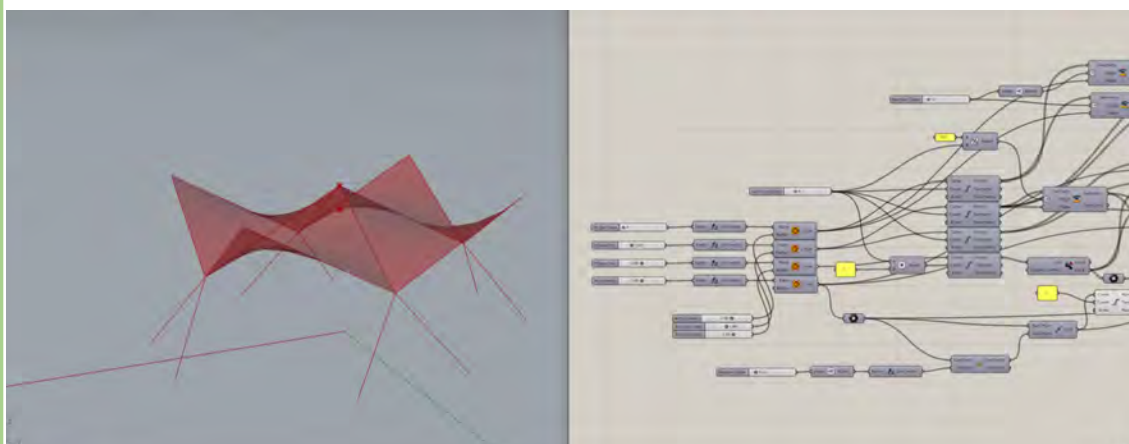


Figura 2: Interface de código e exemplo de modelagem do Grasshopper. Fonte: Autor.

Outro aspecto positivo do Grasshopper é a sua integração com outros plugins que expandem sua capacidade. Uma dessas possibilidades é a análise do desempenho de estruturas a partir do plugin Karamba 3D, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (FEM). Neste software, a integração com o Grasshopper é direta, por meio de componentes como os da Figura 2. Os componentes da própria modelagem são conectados ao do Karamba 3D, e linhas tornam-se vigas, pontos tornam-se apoios e malhas tornam-se cascas (Figura 3). Posteriormente, são atribuídas as cargas de projeto, as seções transversais, os materiais e as condições de contorno. Por fim, é feita a junção de todos os parâmetros e geradas as análises da estrutura. A partir desses resultados, o projetista é capaz de interpretá-los e otimizar a estrutura, de forma que qualquer parâmetro pode ser alterado e novos resultados reavaliados (Preisinger & Heimrath, 2014).

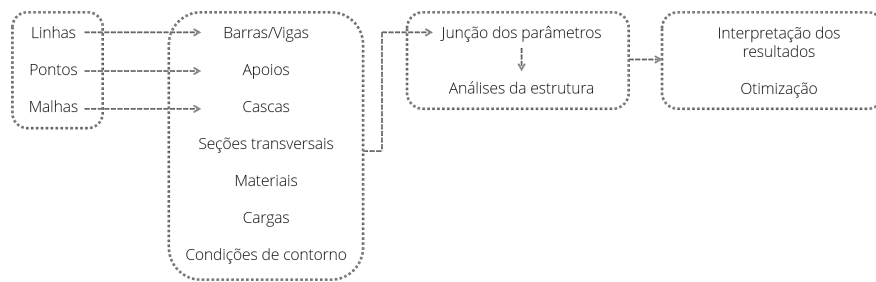


Figura 3. Processo de análise de estruturas a partir do Karamba 3D. Fonte: Autor.

2.2 Paraboloides Hiperbólicos

Um tipo de estrutura altamente vantajosa e que é compatível com a parametrização são os paraboloides hiperbólicos. Minke (2016) os define como formas com curvaturas duplas em diferentes direções. O autor ainda aponta que há possibilidade de a área curvada da estrutura ser composta por linhas retas ou parábolas (Figura 4), e que apesar de maior dificuldade de execução na utilização de parábolas, seu desempenho estrutural é superior. Um grande nome da arquitetura quando se cita este tipo de estrutura é o arquiteto Felix Candela. Um dos motivos para Candela utilizar este tipo de forma é o fato de ser possível executar estruturas em casca em que os efeitos de flexão são minimizados (Draper et. al, 2008).

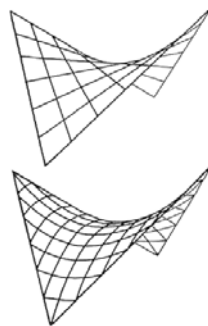


Figura 4: Paraboloides hiperbólicos com elementos retos ou curvos. Fonte: Minke, 2016.

3. ESTUDO DE CASO

Para determinar a potencialidade da associação entre parametrização, o Método dos Elementos Finitos e as estruturas de bambu, foi analisado um estudo de caso composto por uma cobertura de quatro paraboloides hiperbólicos. Para a modelagem, foi utilizado o software paramétrico Grasshopper, vinculado à plataforma do Rhinoceros 3D. Após a modelagem, foi utilizado o software de

análise estrutural Karamba 3D que utiliza a formulação baseada no do Método dos Elementos Finitos (FEM). A partir dos dados gerados, foi possível realizar a análise do comportamento da estrutura e propor alterações na estrutura a partir da mudança de parâmetros.

4. RESULTADOS

A fim de realizar uma verificação estrutural de um parabolóide hiperbólico em estrutura de bambu, foi modelada uma cobertura existente. Trata-se de uma cobertura dividida em 4 paraboloides em vão livre (Figura 5), projetada por Gernot Minke e construída com a ajuda de estudantes durante uma oficina ministrada por Minke em Candelária, Colômbia (Minke, 2016).



Figura 5: Estrutura em bambu utilizada para o presente estudo de caso. Fonte: Minke, 2016.

Foram determinadas dimensões fictícias como inputs para fins de estudo. O modelo foi gerado através de pontos, linhas, formas e planos com um algoritmo no Grasshopper (Figura 6). A partir de 3 círculos divididos em pontos e um ponto central para a cumeeira, a estrutura foi replicada e assim criaram-se os paraboloides hiperbólicos (Figura 7). Foram adotados os seguintes valores para as dimensões dos círculos que compõem a geometria, da base para o topo, em diâmetros e alturas (eixo z):

1. $D = 5\text{m}$, $z = 0\text{m}$
2. $D = 3.6\text{m}$, $z = 1\text{m}$
3. $D = 5\text{m}$, $z = 2\text{m}$

4. D = Nó (cumeeira): $z = 2\text{m}$

Assim como na estrutura de Minke, a malha aplicada aos parabolóides do modelo foi com padrão 8 x 8 de ripas que acompanham a curvatura da estrutura (Figura 7).

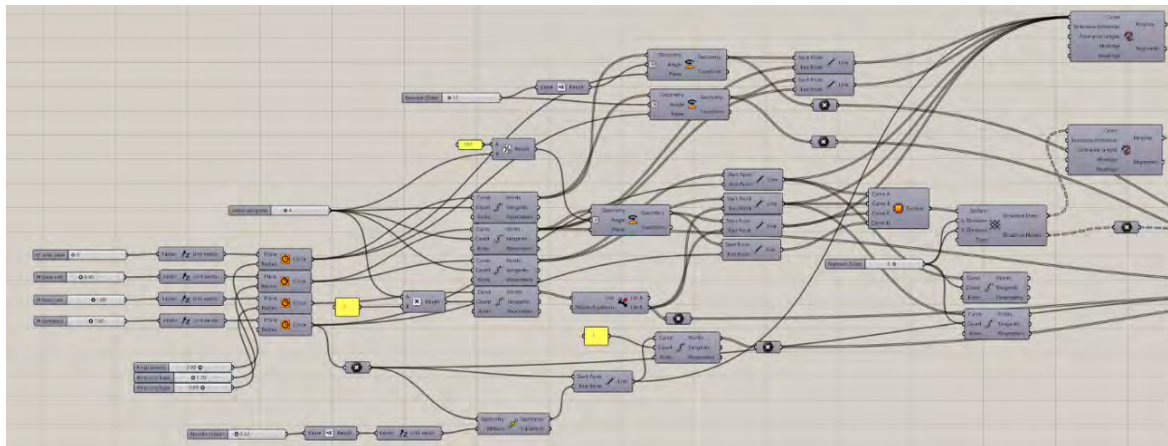


Figura 6: Código desenvolvido para a modelagem da geometria. Fonte: Autor.



Figura 7: Processo de modelagem da cobertura. Fonte: Autor.

Após a finalização da geometria básica, o modelo foi analisado utilizando-se o plugin Karamba 3D, vinculado ao Grasshopper. Utilizou-se o Método dos Elementos Finitos para a análise da estrutura, conectando diretamente a geometria da estrutura em parâmetros (Figura 8).

Apesar de já existirem alguns materiais com características pré-carregadas no software Karamba 3D, não há nenhum tipo de estrutura de bambu disponível. Portanto, foi necessário determinar um material customizado para realizar esta análise. Para este trabalho foi adotado o bambu colombiano *Guadua angustifolia* como material, devido à maior disponibilidade de pesquisas de caracterização desta espécie em relação a outras.

Foram utilizados os seguintes dados da Universidade Técnica de Aachen (Rottke, 2002): Módulo de elasticidade = 1800 kN/cm^2 , tensão de cisalhamento = 2 kN/cm^2 e tensão de escoamento = $2,26 \text{ kN/cm}^2$. Para a massa específica, foi adotado $7,43 \text{ kN/m}^3$ (Morita, 2011).

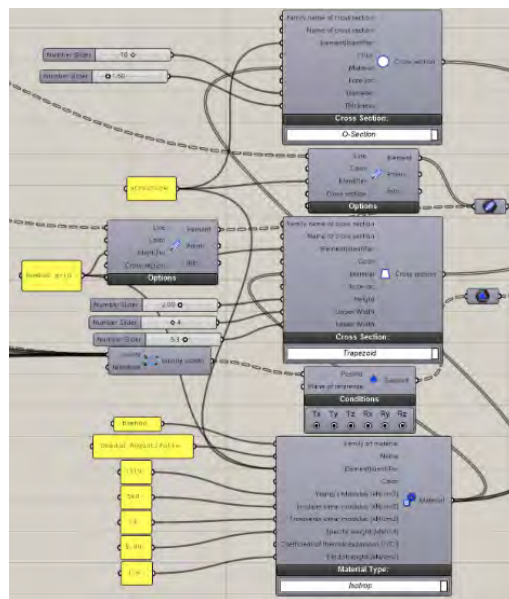


Figura 8: Utilização do Karamba 3D para determinação dos parâmetros da estrutura. Fonte: Autor

Como seções transversais, foram adotados valores médios para colmos inteiros de *Guadua angustifolia* (Ghavami, 1992), com diâmetro externo de 12 cm e espessura de 1,5 cm. Para as ripas, foi adotada seção trapezoidal de 1,5 cm de altura, base menor de 3,53 cm e base maior de 4,6 cm; considerando um colmo de bambu rachado em oito partes iguais. Para cargas, foi considerada a gravidade, o peso próprio do bambu e um carregamento uniformemente distribuído de 2kN/m. Cargas de vento foram desconsideradas para este trabalho. Foi feita a junção de todos os parâmetros. A partir disso, foi possível visualizar graficamente o comportamento da estrutura, inferir as informações do modelo, além de determinar o deslocamento máximo da estrutura (Figura 9).

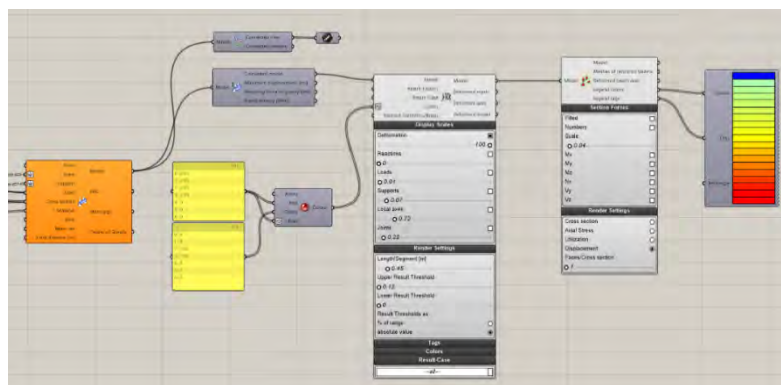


Figura 9: Junção dos parâmetros e análise do comportamento da estrutura no Karamba 3D. Fonte: Autor

Foram encontrados 594 apoios e 1045 elementos no modelo. O valor do deslocamento máximo da estrutura encontrado foi de 0,07 cm, demonstrando

que há estabilidade na estrutura. Os deslocamentos foram demonstrados por meio de cores, e seu espectro de intensidades está representado na Figura 10.

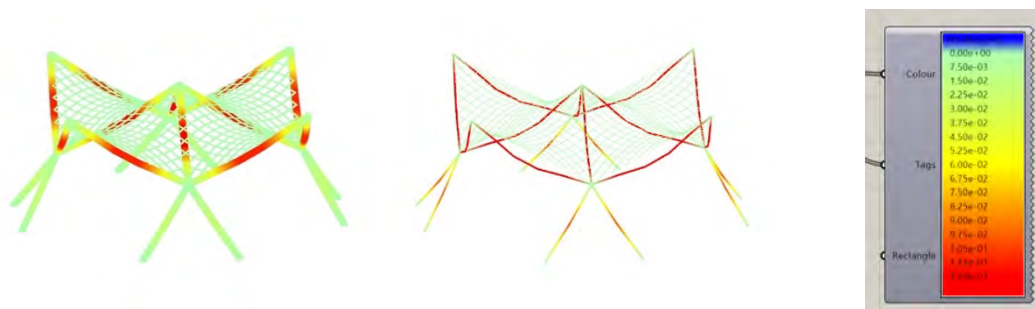


Figura 10: Comportamento da estrutura representado por deslocamentos e espectros de cores. Fonte: Autor

Este processo é útil para identificar os pontos mais vulneráveis e o comportamento da estrutura, a fim de otimizá-la, atingir as dimensões de projeto pretendidas e utilizar a menor quantidade de material possível para determinado projeto, dessa forma diminuindo seu custo. Neste caso, é possível perceber que os apoios encostados ao solo são o ponto mais estável, e apesar de não haver grandes deslocamentos, as barras que apoiam a malha dos parabolóides sofrem maiores deslocamentos. Diminuindo a quantidade de apoios desta cobertura, e mantendo as mesmas dimensões, seções e material, é possível identificar a estabilidade da estrutura em cada caso (Figura 11). A cobertura com 2 apoios apresenta deslocamento máximo de 0,44 cm e com 3 apoios de 0,15 cm, como mostram as Figuras 11 e 12. As intensidades dos deslocamentos estão representadas pelo mesmo espectro de cores da Figura 10. A medida em que se adicionam apoios, o deslocamento máximo vai diminuindo, até se estabilizar. A Figura 12 mostra essa variação, e foi possível identificar que o menor deslocamento máximo é de 0,07 cm, e que a estabilidade da estrutura é atingida com 4 apoios. Isso significa que qualquer apoio a mais adicionado à estrutura de 4 apoios não terá efeitos em seu deslocamento máximo.

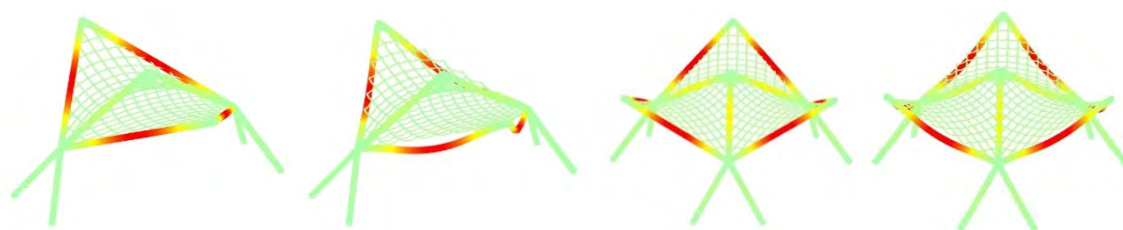


Figura 11: comportamento da estrutura utilizando 2 e 3 apoios. Fonte: Autor.

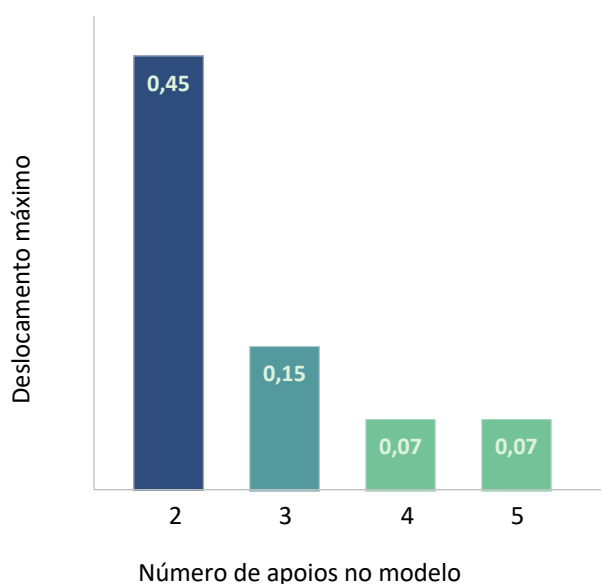


Figura 12: Relação número de apoios do modelo por deslocamento máximo da estrutura, utilizando *Guadua Angustifolia*

Utilizando-se a mesma composição de cobertura, foi verificada a possibilidade de utilizar outra espécie de bambu na estrutura. Para tanto, foi escolhida a espécie *Bambusa tuldoides* para essa análise. Foram utilizados dados de Silva (2019): Módulo de elasticidade = $3411,3 \text{ kN/m}^2$, tensão de cisalhamento = $0,12 \text{ kN/cm}^2$, tensão de escoamento = $15,3 \text{ kN/cm}^2$, diâmetro externo = $4,5 \text{ cm}$ e espessura = $0,6 \text{ cm}$. Se adotada estrutura idêntica à de *Guadua angustifolia*, o deslocamento máximo da estrutura é de 1 cm , com 4 apoios. A mesma análise feita com a estrutura em *Guadua Angustifolia* foi feita para a de *Bambusa Tuldoides*, de forma que se verifique em que composição de projeto o deslocamento máximo se estabiliza. Os valores encontrados estão na Figura 14, e é possível observar que o menor deslocamento máximo e a estabilidade da estrutura é no modelo com 6 apoios (Figura 13), onde o deslocamento máximo é de $0,6 \text{ cm}$. Portanto, uma possível alteração de projeto seria de uma estrutura de 4 apoios de *Guadua Angustifolia* para uma de 6 apoios em *Bambusa Tuldoides*, considerando que há uma diferença de $0,53 \text{ cm}$ para o deslocamento máximo entre uma estrutura e outra.

Com esta mudança, o número de elementos da estrutura aumenta de 1045 para 1828 e o número de apoios de 594 para 1039. Estes dados podem ser utilizados para comparação de custos entre as duas espécies em uma cobertura de mesmo diâmetro e altura. A partir disso, cabe ao projetista a decisão de qual

tipo de estrutura utilizar, levando em consideração questões econômicas, práticas e estéticas para determinado projeto.

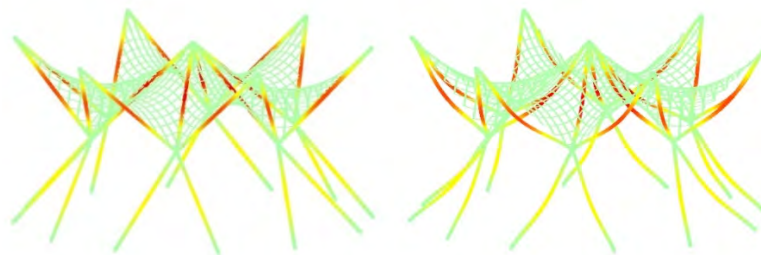


Figura 13: Estrutura em Bambusa Tuldoides, com 6 apoios, apresenta menor deslocamento máximo com o mínimo de apoios. Fonte: Autor

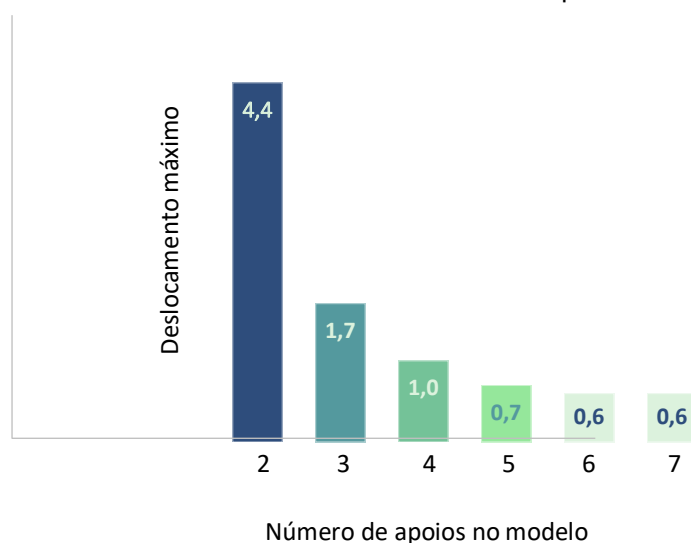


Figura 14: Relação número de apoios do modelo por deslocamento máximo da estrutura, utilizando Bambusa Tuldoides. Fonte: Autor

5. CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

Foi possível observar as potencialidades do bambu associado a softwares paramétricos e de análise estrutural. Apesar da utilização somente dos processos apontados aqui não serem suficientes para determinar a viabilidade e estabilidade de uma estrutura, foi possível observar que o uso dessas ferramentas indica as potencialidades e vulnerabilidades da estrutura, e possibilitam ao projetista otimizar ou mesmo adaptar a estrutura a partir dos dados gerados. Além disso, esses processos podem ser realizados por profissionais com conhecimentos mais básicos em cálculo e são de rápido aprendizado. O uso dessas ferramentas não dispensa a necessidade de um calculista e uma análise mais aprofundada, porém são de grande auxílio para a concepção de projeto e para a visualização do comportamento de determinada

estrutura. A utilização de uma estrutura de bambu é um desafio a mais, tendo em vista que o material ainda carece de informações e ensaios de caracterização, além da disponibilidade destes dados não contemplarem todas as espécies de bambu utilizadas em estruturas. Apesar das dificuldades, o uso de materiais sustentáveis em estruturas, como é o caso do bambu, são de extrema importância. É importante a desmitificação da crença de que são materiais precários e que não dialogam com tecnologias contemporâneas e projetos de maior complexidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arce-Villalobos, O. A. (1993). **Fundamentals of the design of bamboo structures**. Tese de Doutorado. Technische Universiteit Eindhoven.

Borah, S. U. K. (2015). **Bamboo for economic prosperity and sustainable development with special reference to northeast India**. International Research Journal of Management Sociology & Humanities, 6.

Carbonari, G., Junior, N. S., Pedrosa, N. H., Abe, C. H., Scholtz, M. F. & Acosta, C. C. V. (2017). **Bambu—O aço vegetal**. Mix Sustentável, 3(1):17-25.

Dino, I. (2012). **Creative design exploration by parametric generative systems in architecture**. METU Journal of Faculty of Architecture, 29(1):207-224.

Ghavami, K. (1992). **Bambu: um material alternativo na engenharia**. Revista do Instituto de Engenharia, (492): 23-27.

Draper, P., Garlock, M. E., & Billington, D. P. (2008). **Finite-element analysis of Félix Candela's chapel of Lomas de Cuernavaca**. Journal of Architectural Engineering, 14(2), 47-52.

Greco, T. M. & Crombewrg, M. (2011). **Bambu: cultivo e manejo**. Florianópolis: Insultar, 184p.

Minke, G. (2016). **Building with Bamboo. Design and Technology of a Sustainable Architecture** Second and revised edition. Berlin, Basel: Birkhäuser. 160 p.

Mirtschin, J. (2011). **Generative Models Utilized for Superior Design Development**. Proceedings of IASS 2011.

Morita, B. S. (2011). **Análise da estabilidade dimensional e resistência**

mecânica em bambu *Guadua angustifolia* pós-processos de tratamentos químicos e térmico. 2011 84 p.

Nurdiah, E. A. (2016). **The potential of bamboo as building material in organic shaped buildings.** Procedia-Social and Behavioral Sciences, 216, 30-38.

Preisinger, C. & Heimrath, M. (2014). **Karamba - A Toolkit for Parametric Structural Design.** Structural Engineering International, 24(2):217–221.

Rottke, E. (2002). **Mechanical properties of bamboo.** RWTH Aachen University. Faculty of Architecture. Aachen, North Rhine-Westphalia, Germany. Section, 3, 11.

Silva, F. R. D. (2019). **Sistema de Cobertura com Feixe de Bambusa tuldoides.** Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129 p