ESTRUTURAS EM MADEIRA: FORMA E MÉTODO

MARCELO AFLALO

ESTRUTURAS EM MADEIRA: FORMA E MÉTODO

Marcelo Aflalo

Versão corrigida

Orientadora: Prof. Doutora Akemi Ino

Tese de Doutorado

para a Universidade de São Paulo - USP

Instituto de Arquitetura e Urbanismo - IAU

Programa de Pós-Graduação em

Arquitetura e Urbanismo

instituto de
arquitetura
e urbanismo
usp são carlos

Grupo de Pesquisa em

Habitação e Sustentabilidade – Habis

dezembro de 2020

Projeto Gráfico/diagramação: Marcelo Aflalo

Revisão: Flora Christina Bender/Marta Aflalo

Impressão: Ipsis Gráfica e Editora

Autorizo a reprodução total ou parcial deste trabalho,
por qualquer meio convencional ou eletrônico,
para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo autor

Aflalo, Marcelo
AAF257 Estruturas em Madeira: forma e método / Marcelo
e Aflalo; orientadora Akemi Ino. -- São Carlos, 2020.
160 p.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2020.

1. Estruturas. 2. Madeira. 3. Metodologia. 4.
Sustentabilidade. 5. Forma. I. Ino, Akemi, orient.
II. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Marcelo Aflalo**

Título da tese: **"Estruturas em Madeira: forma e método"**

Data da defesa: **06/11/2020**

Orientador: Profa. Dra. Akemi Ino

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dra. Akemi Ino
(IAU/USP)

Não votante

Prof. Dr. Joubert Jose Lancha
(IAU/USP)

Aprovado

Prof. Dr. João Marcos de Almeida Lopes
(IAU/USP)

Aprovado

Profa. Dra. Anália Maria Marinho de Carvalho Amorim
(FAU/USP)

Aprovado

Prof. Dr. Phillippe Bernard Blanc
(PUC Santiago-Chile)

Aprovado

p/ **Prof. Dr. Juan Carlos Jeldes Pontio**
(PUC Valparaíso-Chile)

Aprovado

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

Agradecimentos

Prof. Doutora Akemi Ino
Jun. Prof. Dr. Christopher Robeller
Marta Aflalo

Daniella Fassina
João Pini
Pedro Setúbal
Yan Giusti/Corte Recorte

AFLALO, Marcelo. **Estruturas em Madeira: forma e método.**

2020. 160p Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Pelo estágio evolucionário em que a arquitetura se encontra, parece inevitável a adoção de materiais de baixo impacto ambiental e de procedimentos de projeto que atendam a essas novas demandas. Nos últimos 30 anos, a tecnologia aplicada à madeira vem evoluindo para suprir a cadeia construtiva com produtos e técnicas necessárias para ocupar esse espaço e estabelecer novos paradigmas de projeto. No entanto os profissionais, os acadêmicos, o poder público e as escolas não se deram conta desse fenômeno e ainda atuam dentro dos limites convencionais da atividade construtiva, como se tal movimento fosse mera efemeridade.

Não se trata apenas de um movimento de caráter ambiental, embora a tônica principal seja essa, mas também de um movimento na direção da racionalização dos processos de projeto, de fabricação e montagem compatíveis com o século XXI, quando a redução de consumo energético, o ciclo de vida das matérias-primas e a revisão dos princípios que regem a linguagem arquitetônica precisam ser igualmente compatibilizados.

Esta tese se debruça sobre o processo de conexão entre as informações que bombardeiam a cultura moderna, de forma que os produtos gerados façam sentido social, ambiental e economicamente.

A desinformação é a maior responsável pelo atraso e pela baixa qualidade das respostas a tais desafios, e este trabalho visa indicar o percurso, sem, contudo, definir as respostas prontas, que podem esvaziar o processo de pesquisa.

Esse exercício apresenta algumas das ferramentas necessárias para a condução de qualquer pesquisa na área, entretanto está longe de esgotar as possibilidades, porque esse é um momento de rápida evolução e troca de informações em tempo real, único na história da humanidade.

Palavras chave: Arquitetura em madeira, Estruturas de madeira, Metodologia, Sustentabilidade, Forma.

AFLALO, Marcelo. **Wooden Structures: form and method.**

2020. 160p Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Given architecture's current evolutionary stage, the adoption of materials with low environmental impact would seem inevitable as would design procedures to meet these new demands. In the last 30 years, technology applied to wood has been evolving to supply the construction process with products and techniques needed to occupy this space and establish new project paradigms. However, professionals, academics, public authorities and schools have failed to grasp this phenomenon and still act within the conventional constraints of the construction industry, as if this movement were merely transitory.

It is not only a question of an environmental movement, although that is the main thrust, but it's also a movement towards the rationalization of project procedures, of manufacturing and assembly processes compatible with the 21st century, when reduction of energy consumption, the life cycle of raw materials and the revision of principles that govern architectural language need to be made equally compatible.

This thesis addresses the process of the connection between the arrays of information bombarding modern culture, in such a way that the products created make sense - socially, environmentally and economically.

Lack of knowledge is largely responsible for falling behind and for the poor quality of solutions offered for such challenges, and this work aims to indicate the path, without however setting out ready answers, which can undermine the research process.

This exercise presents some of the tools needed to conduct any survey in this field, however it falls short of covering all possibilities because this is a time of rapid evolution and exchange of information in real time, unique in human history.

Keywords: *Wooden Structures, Timber, Methodology, Sustainability, Form.*

AFLALO, Marcelo. **Estructuras en Madera: Forma y método.**

2020. 160p Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Debido a la etapa evolutiva de la arquitectura, parece inevitable la adopción de materiales de bajo impacto ambiental y procedimientos de diseño que satisfagan estas nuevas demandas. En los últimos 30 años, la tecnología aplicada a la madera ha ido evolucionando para abastecer a la cadena de construcción con los productos y técnicas necesarias para ocupar este espacio y establecer nuevos paradigmas de diseño. Sin embargo, los profesionales, los académicos, las autoridades públicas y las escuelas no se han dado cuenta de este fenómeno y siguen actuando dentro de los límites convencionales de la actividad de construcción, como si ese movimiento fuera meramente efímero.

No se trata sólo de un movimiento ambiental, aunque se hace hincapié en él, sino también de un movimiento hacia la racionalización de los procesos de diseño, fabricación y montaje compatibles con el siglo XXI, en el que la reducción del consumo de energía, el ciclo de vida de las materias primas y la revisión de los principios que rigen el lenguaje arquitectónico deben ser igualmente compatibles.

Esta tesis se centra en el proceso de conexión de la información que bombardea la cultura moderna, para que los productos generados tengan sentido social, ambiental y económico.

La desinformación es la mayor responsable de la demora y la baja calidad de las respuestas a tales desafíos, y este trabajo pretende indicar el camino, sin definir, sin embargo, las respuestas estándar, lo que puede reducir la calidad del proceso de investigación.

Este ejercicio presenta algunos de los instrumentos necesarios para realizar cualquier estudio en esta área, sin embargo, está lejos de agotar las posibilidades, ya que se trata de una época de rápida evolución e intercambio de información en tiempo real, única en la historia de la humanidad.

Palabras clave: Estructuras de madera, Madera, Metodología, Sostenibilidad, Forma.

Introdução.	9
1. Contextualização	13
1.1 Premissas	13
1.2 Madeira, inclusive	16
1.3 Origem	17
1.4 Madeira na construção	21
1.5 Industrialização	24
1.6 Produtos de madeira colada	27
1.7 Produtos de madeira não colada	29
2. Método como forma	31
2.1 Processos tradicionais e processos contemporâneos	32
2.2 Estética do processo	37
2.3 Tempo da forma e do processo	40
3. Compreendendo a forma	43
3.1 Desejo da forma	43
3.2 Busca pela forma	51
3.3 Princípios formais	52
3.4 Caminho da forma: princípios formais + princípios ativos	56
3.5 Matriz de desenvolvimento de projeto	58
3.6 Matrizes formais	59
4. Uma forma	65
4.1 Vivendo em um mundo material	65
4.2 Materializando ideias	66
4.3 Interpretando símbolos	66
4.4 Símbolos e arquétipos – o arco	68
4.5 Natureza do arco	70
4.6 Construção do arco	72
4.7 Ativando o arco	75
4.8 Variações sobre uma forma divina	77
4.9 Representação da forma	78
5. Aplicando a forma: projetos e modelagem	79
5.1 Determinando a forma básica	79
5.2 Arranjos	81
5.3 Catenária dorsal	86
5.4 Catenária com seção planificada	98
5.5 Catenária laminada	106
5.6 Catenária dobrada	118
Conclusão	129
Bibliografia	133
Anexos	139

*When I'm working on a problem,
I never think about beauty but when I have finished,
If the solution is not beautiful,
I know it's wrong.*

R. Buckminster Fuller

Introdução

Em seu exercício profissional, o autor, após 40 anos de projetos em que o uso da madeira foi protagonista na estrutura e nos acabamentos, faz-se uma pergunta que lhe provoca reflexão: qual é a diferença entre projetar em madeira ou em outros materiais? Existe alguma diferença? É significativa? E, se for, qual seria o processo específico para isso? Em uma análise mais profunda, essas questões podem ser resumidas em uma interrogação mais ampla: a tecnologia e os processos aplicados à concepção de estruturas de madeira permitem maior autonomia de linguagem formal?

A disciplina de arquitetura é antiga, entretanto distanciou-se da engenharia e da técnica muito recentemente, favorecendo processos e linguagens baseadas em dogmas e preconceitos. A falta de conhecimento técnico limita o processo criativo e todos sabemos o quanto a ignorância impacta na evolução para novos caminhos. As teorias estão adiante das realizações, uma vez que o conhecimento limitado impede essa sincronização. Um estudante de arquitetura, hoje, conhece o processo de projeto baseado em uma única tecnologia dominante que para muitos começa a apresentar sinais de obsolescência e fragilidades.

Ao “aprendiz” são apresentadas formas simplórias de desenho e dimensionamento que o impelem a produzir redundâncias formais e técnicas ou a trabalhar de forma utópica e puramente especulativa. A metodologia científica e experimental raramente aparece na prática, nos cursos e na produção arquitetônica em geral, limitando o verdadeiro exercício da análise de causa e consequência, fundamental ao desenvolvimento de qualquer espécie. Um estudante não sabe de fato o que ocorre na ligação entre um pilar e uma viga de concreto, e as amarrações metálicas que ocorrem escondidas da vista de todos são uma mágica pressuposta e que não lhe diz respeito. A verdadeira interpretação da ideia de uma tectônica pressupõe um conhecimento sobre ligações e conexões entre elementos com funções díspares, as quais têm um desenho particular que muitas vezes define a caracterização e a identidade das edificações.

O trabalho em madeira exige ligações e conexões explícitas e funcionais, cuja beleza é transmitida pela elegância e pela economia com que são resolvidas e pelo desenho dos detalhes funcionais de proteção e acabamento empregados. Tais soluções raramente são reproduzíveis *ad infinitum*, pois as condicionantes variam e ditam novas necessidades.

Com os atuais processos de desenho e fabricação, os custos para ambas as etapas caem consideravelmente, permitindo que uma construção possa ser mais complexa sem ser necessariamente mais onerosa.

Processos e equipamentos originais permitem pensar diferente e não apenas adaptar o existente. Os ganhos da adaptação são relativamente pequenos se comparados a um pensamento novo que tire proveito das tecnologias de desenho, fabricação e montagem, colocando a construção civil mais próxima do século XXI e da industrialização necessária para redução do impacto ambiental e da diminuição de custos que a escala industrial permite.

Como adequar uma enorme quantidade de formandos para ingressar em um mercado de trabalho em transição que, a rigor, nem existe para absorvê-los? No Brasil, em 2020, esse contingente está entre 160.000 e 200.000, para um mercado formal de arquitetos registrados de apenas 182.000, segundo o Conselho de Arquitetura e Urbanismo (CAU/BR, 2019). Como escala comparativa, os Estados Unidos formam cerca de 35.000 alunos por ano que, para se integrarem ao mercado de trabalho, precisam superar um exame de ordem, após cinco anos de experiência profissional.

Pela aritmética simples, vê-se como é mais fácil introduzir mudanças estruturais no ensino de uma escola americana do que nas do Brasil.

Embora este trabalho não verse diretamente sobre o tema educacional, ao discutir processos criativos e tecnologias de desenho, fabricação e montagem, nota-se que as mudanças de paradigmas na educação e na prática profissional serão inevitáveis.

Ao longo deste texto, serão discutidas as razões que o justificam como instrumento de valorização do processo experimental comparativo como busca de respostas cada vez mais vinculadas às evidências demonstradas. É o processo que tem maior peso na evolução da disciplina, e não os achados estéticos que o público geral costuma associar ao produto arquitetônico, e que a maioria dos profissionais acredita ser a razão de sua existência.

Por que madeira? Logo de saída, uma pergunta simples e com várias respostas que indicam a vida em um mundo complexo e multifacetado, no qual crenças, dogmas e orientação têm muito mais voz do que as evidências demonstradas. É curioso notar que um dos pontos de partida deste projeto foi o notório preconceito com o uso da madeira em construções urbanas e de grande escala. Entretanto a questão do preconceito encerra um axioma claro: o preconceito deriva do desconhecimento, logo a simples apresentação desse trabalho joga luz sobre questões básicas na formação dessas crenças e idéias pré concebidas. Isso se dá não apenas com o público geral, mas também com arquitetos qualificados e pilares da nossa identidade cultural.

Ao serem analisados os processos criativos e dinâmicas envolvidas, mais questões são levantadas, entre elas o papel da forma ao longo do processo projetual e onde ela se insere, como ponto de partida ou como resultado de

um processo. A forma é muito cara aos artistas mas também aos técnicos que, por decorrência da separação entre as disciplinas de arquitetura e engenharia, viram-se culturalmente privados do exercício formal criativo. Há uma importante questão ligada à revisão das disciplinas, a grande influência que a tecnologia terá daqui para a frente, devido aos novos aplicativos de desenho e à análise paramétrica, aos novos sistemas de produção e fabricação, e ao papel reposicionado do arquiteto dentro da cadeia produtiva.

Embora este projeto tenha um caráter de investigação sobre metodologia, em nenhum momento ele estabelece normas para a disciplina. A única recomendação incisiva é o respeito ao processo de investigação científica como formatação e a recomendação da aceitação dos resultados como resposta às escolhas dos parâmetros de pesquisa. As escolhas seguem um fluxo natural que não confronta o processo, porém dele se alimenta e permite que as descobertas moldem o resultado, sem a pretensão do controle absoluto. Em outras disciplinas, semelhante afirmação pode soar leviana, porém quando o processo criativo dá as mãos ao científico, a previsibilidade deixa de ser o foco principal abrindo possibilidades de interpretações de caráter mais filosófico.

A suposição de que a arquitetura praticada no Brasil carece de identidade é fundamentada nas publicações especializadas e no caráter saudosista dos prêmios internacionais recebidos, todos homenageando um recorte da produção difundida na cultura mundial, todavia obsoleta frente à produção global. Essa afirmação é provocativa e requer reflexão mais ampla, entretanto não é o objeto deste trabalho, por isso a única função desse postulado é como combustível para alimentar a busca por uma revisão do processo criativo com a inserção da pesquisa e do risco como componentes.

Não há, também, nenhuma referência às questões sociais, tão importantes no momento em que o crescimento das desigualdades põe em risco a estabilidade global: está implícito, porém, que os ganhos no processo proposto podem trazer benefícios a todos com a redução de custos e com a percepção de que existem soluções de qualidade construtiva ao alcance de qualquer humano no planeta, sem depender exclusivamente da industrialização e da concentração da tecnologia. Basicamente, o que é proposto leva em conta que, para um mesmo problema, existem muitas soluções com qualidades suficientes para atender às necessidades sociais, sem abrir mão da qualidade estética e do fato de que estamos fincados no século XXI.

Nos capítulos iniciais desta tese encontra-se boa parte do material de referência para contextualizar o momento atual e a necessidade de conciliação entre a construção civil e o impacto ambiental no planeta, à beira de um desastre ecológico produzido por necessidades artificiais, cujo resultado arquitetônico é fruto delas. A história da humanidade demonstra que se acerta no varejo e falha-se no atacado, isto é, as descobertas individuais podem ser brilhantes, todavia sua aplicação generalizada, nem sempre.

A conciliação com a natureza é um pressuposto deste trabalho e não serão discutidas outras alternativas, sendo que a via proposta no primeiro capítulo será a tônica das decisões subsequentes, e o olhar sobre as referências terá necessariamente esse caráter.

A literatura disponível também foi selecionada com algum viés, e os textos que defendem a mitigação dos processos e dos materiais construtivos dominantes foram desconsiderados por serem coniventes com as políticas que negam os impactos causados ao meio ambiente. Não é possível dialogar com semelhantes práticas sem uma significativa redução na produção dessa indústria e a sua consequente substituição por produtos renováveis e de baixo impacto ambiental. Sua convivência é possível e desejável, desde que as proporções que representam dentro da cadeia construtiva sejam reduzidas drasticamente, dando espaço a novos produtos que atendam às necessidades globais.

As divagações sobre o papel da forma a partir do terceiro capítulo atendem à compreensão de que a natureza humana é a de comunicar valores em todas as camadas, independentemente da posição dentro de estrato social, raça, credo ou região: é a expressão do indivíduo ou do grupo que se manifesta de forma irreprimível. Nesse aspecto, tal divagação tem grande importância já que compõe com grande relevância o modelo metodológico pesquisado.

Um objetivo planejado de equilíbrio entre a técnica e a cultura torna esta tese inqualificável, em que ora a tecnologia é a mediadora desse diálogo, ora a cultura toma a frente, e a razão para isso está justamente na reabilitação da fusão entre arquitetura e engenharia. Essa é uma tese subjacente que permeia todo o trabalho e exige complacência do leitor especialista que tenha dificuldades com uma das perspectivas, mas a costura entre as duas vertentes é tecida constantemente, para haver fluência na leitura. As imagens e a diagramação fogem às regras acadêmicas, e não há como não o fazer, uma vez que esse é um processo eminentemente visual em que simples menções deixam vazios imaginários que podem não corresponder aos desígnios do trabalho.

E, por fim, há um componente que envolve o prazer de realizar um documento que contenha todas as vertentes do pensamento do autor e das habilidades que permitem esse exercício.

1 Contextualização

1.1 Premissas

Algumas premissas são necessárias para o desenvolvimento deste trabalho e constituem perguntas básicas para a formulação de um pensamento compatível com a realidade global.

A discussão sobre materialidade, pouco questionada na produção arquitetônica contemporânea, surge como um componente novo no desenvolvimento de metodologias e avaliação de atributos e tecnologia na construção civil. O impacto ambiental da cadeia construtiva e suas consequências sobre o clima da Terra é inegável, e urge pesquisa sobre fontes alternativas e renováveis, sob o risco de inviabilizar a vida no planeta.

O termo “sustentável” apresenta, hoje, conotações e usos que não fazem jus aos princípios da Carta do Clube de Roma, “Limites ao Crescimento”, de 1972, que propunha um equilíbrio global, “um sistema mundial, que seja 1. sustentável sem colapso súbito e descontrolado e 2. capaz de satisfazer as exigências materiais básicas de todo seu povo”. A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Comissão Bruntland, 1987) cunhou a expressão “desenvolvimento sustentável” e tornou-se sinônimo de “um desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades”.¹

O ambientalista Ulrich Groeber, entretanto, indica raízes mais antigas para o termo e para o conceito. Em *Uma história conceitual de desenvolvimento sustentável (Nachhaltigkeit)*, ele argumenta que o termo realmente vem da silvicultura do século XVIII (na época, a madeira era um recurso fundamental com um futuro incerto), em que o nobre silvicultor alemão Hans Carl von Carlowitz menciona a necessidade de um “uso contínuo, constante e sustentado da matéria prima.” (GROEBER, 2007)²

Na realidade, a expansão do uso da terminologia tem a ver com a compreensão das dinâmicas exercidas entre as diversas disciplinas que interagem para a compreensão dos impactos da atividade humana sobre a Terra. Hoje, ela cobre uma grande variedade de temas: escolha dos materiais e sua origem, quantidade de energia necessária para transporte e processamento, processos construtivos, performance térmica, quantidade de energia para manutenção, durabilidade, flexibilidade de uso interno, desmonte, pós uso e reconstrução, não geração de lixo e reciclagem, entre outros itens incorporados regularmente. Somem-se a isso as preexistências relativas a local de construção, legislação, condições geológicas e topográficas, clima, orientação, acesso, vizinhança e inserção urbana.

Esse imenso rol de premissas tende a intimidar arquitetos, construtores e

¹ Our Common Future – Report of the World Commission on Environment and Development, 1987.

² GROEBER, Ulrich, 2007. “Deep roots: A conceptual history of ‘sustainable development’ (Nachhaltigkeit),” Discussion Papers, Presidential Department p 2007- 002, WZB Berlin Social Science Center.

investidores, pouco afeitos aos riscos inerentes à pesquisa e ao pioneirismo, porém o enfrentamento das questões ambientais não permite mais soluções paliativas ou mera mitigação dos impactos produzidos pelos materiais e processos em uso globalmente.

A principal linha de investigação nos processos construtivos hoje em dia são as chamadas **tecnologias construtivas de baixo carbono (TCBC)**³, que incorporam todos os valores da visão mais contemporânea do termo sustentabilidade, com um viés que prioriza a produção e a montagem utilizando tecnologias acessíveis.

Esse é o divisor entre os princípios *low-tech* e *high-tech*. A partir dos anos setenta, a reação ao modernismo dominante na arquitetura global deu-se de diversas formas, algumas por meio da linguagem (pós-modernismo), outras por meio de tecnologia e princípios.

Os defensores da tecnologia a serviço do conforto e da eficiência (*high-tech*) uniram-se em prol da defesa da industrialização e do desenvolvimento de recursos tecnológicos, de aumento do conforto ambiental e da eficiência das edificações (Read – *Renewable Energy in Architecture and Design association*, 2010)⁴. Edifícios emblemáticos da época são o *Reichstag*, em Berlim (*Foster+Partners*) e *Academia Mont-Cenis*, em Hern (*Jourdá e Perraudin*).

Figura 1.1 *Berlin Reichstag*,
Foster+Partners, Berlim, 1999.
Foto: autor

Figura 1.2 *Academie Mont-Cenis*,
Jourdá et Perraudin, Herne, 1999.
Fonte: akademie-mont-cenis.de

Figura 1.3. *Arcosanti Cúpulas*,
Paolo Soleri, Arizona, 1970-2019.
Foto: Cc

Figura 1.4. *Atrium Houses*,
Vandkusten Architects, Albertslund, 2014-2022.
Foto: Vandkusten Cc

Figura 1.5. *Jugendcamp*,
Peter Hübner, Stuttgart, 1993-1994.
Foto: Cornelia Suhan

Pelo lado *low-tech*, ou *no-tech*, como insistia Paolo Soleri, temos Arcosanti, como experiência extrema de comunidade integrada com a natureza, os experimentos em habitações sociais do Vandkunsten Architects, dinamarqueses e de Peter Hübner, com autoconstrução social na Alemanha.

Uma terceira via incentiva um humanismo aplicado à tecnologia como forma de mediar os conflitos entre cultura, comportamento e tecnologia. Após considerar as duas vias dominantes e antagônicas, Stephan Behnisch (GAUZIN-MULLER, 2010), arquiteto alemão, descreve de maneira sucinta o pensamento da terceira via:

“Não quero mudar nosso estilo de vida ou voltar à idade da pedra, mas, se estamos preparados para aceitar que vai fazer mais calor no verão e mais frio no inverno, estou convencido de que podemos atingir um grau aceitável de conforto seguindo as regras da natureza.”

3. TCBC - Terminologia adotada no artigo apresentado no 22nd *International Sustainable Development Research Society Conference* (ISDRS 2016). Trata-se do projeto de pesquisa “Tecnologias Construtivas de Baixo Carbono (TCBC): a madeira e novos paradigmas para a construção civil”, em andamento, coordenado pelo Grupo de Pesquisa HABIS do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP São Carlos.

4 GAUZIN-MÜLLER, Dominique. *Arquitetura Ecológica*, São Paulo: Senac, 2010, pp. 30/31.

Conciliatória, a via humanista aceita também a inclusão da tecnologia, onde necessária, e explora os processos produtivos industriais na medida em que contribuam de forma inclusiva. Esse caráter humanista traz-nos a visão do lugar em que a arte e a tecnologia se encontram na justa medida. A linguagem e o sentido da edificação ganham voz na aplicação de valores autorais determinantes para a diversidade das edificações e, conseqüentemente, das cidades.

Segundo Vilém Flusser, em *O Mundo Codificado*, “Técnica, em grego, technés, significa “arte” e está relacionada a tekton (“carpinteiro”). A ideia fundamental é a de que a madeira [em grego, hylé] é um material amorfo que recebe do artista, o técnico, uma forma, ou melhor, em que o artista provoca o aparecimento da forma” (FLUSSER. 2007)⁵

A indústria do cimento e a metalurgia são responsáveis pelos maiores impactos ambientais em toda a cadeia construtiva e, no Brasil, também por desastres ambientais de grande monta. É, entretanto, virtualmente impossível pensar em construção em grande escala sem a presença de tais materiais, os quais deram identidade ao século XX, seja como tecnologia ou linguagem. Dentro da visão humanista, na qual as contribuições tecnológicas e de materiais consideram realidades locais e regionais, tanto o uso do concreto quanto o de metal têm importante papel a cumprir como fundações e conexões, cujo comportamento mecânico e durabilidade são comprovados em determinadas circunstâncias. O futuro aponta para uma sensível redução do uso de matérias-primas de alto impacto ambiental, pela ampliação da utilização de outras advindas de fontes renováveis e pela combinação de componentes construtivos industrializados que lançam mão de vários processos.

Quando se pensa em redução de impacto ambiental, a métrica para aferição das diferentes estratégias tem como referencial a emissão de carbono e gases de efeito estufa na atmosfera. A madeira não só absorve o CO₂ (dióxido de carbono) como emite O₂ (oxigênio) repondo continuamente o estoque presente na atmosfera. Todos os outros materiais construtivos emitem CO₂ na atmosfera, seja na produção como no transporte e processos, e não repõe O₂ em nenhuma etapa. Logo, diz-se que um determinado material emite certa quantidade de CO₂, contra outro que emite menos ou até absorve CO₂. A questão relativa à essa medida é justamente o volume de variáveis que compõem aquilo que chamamos de concreto ou metal ou madeira, desde a primeira ação de recolhimento do produto da natureza, sua transformação e consumo de energia, água, calor e transporte necessário para sua utilização final. A isso dá-se o nome de Análise do Ciclo de Vida dos materiais, derivado da pesquisa original que resultou no livro *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things* (McDonough e Braungart, 2002)⁶

Por essa métrica pode-se inferir aproximações comparativas ou bastante precisas, desde que se tenham todos os parâmetros de análise. Por exemplo, se uma molécula de

5 FLUSSER, Vilém. *O Mundo Codificado*. São Paulo: Cosac Naify, 2007. 224 p.

6 MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York: North Point Press. 2002

CO₂ é feita de um átomo de carbono e dois átomos de oxigênio, sendo o peso atômico do carbono é 12 e o do oxigênio 16, o peso molecular do CO₂ será 44. Isso significa que 12 Kg de carbono na combustão completa produzirão 44 Kg de CO₂ ou 1 Kg de carbono na combustão completa produzirá 3,67 Kg de CO₂.

A madeira é naturalmente heterogênea e a quantidade exata de carbono em 1 Kg de madeira seca varia dependendo da espécie de madeira, idade da madeira, etc. Em espécies de média densidade, 1 Kg de madeira contém cerca de 450 a 500g de Carbono. Isto significa que 1Kg de madeira contém cerca de 1,65 a 1,80Kg de CO₂. Dessa forma a madeira ou a floresta agem como sumidouros de carbono.

Segundo o relatório da *Pulp and Paper Resources and Information* de 2019, tendo como base *pinus radiata* da Nova Zelandia, podemos comparar, por aproximação, a equivalência de emissão e absorção de alguns materiais construtivos, no processo de transformação, a partir de um peso padrão, nesse caso, 1 tonelada:

- 1t concreto - **libera** 159Kg de CO₂ na atmosfera
- 1t aço - **libera** 1,24t de CO₂ para a atmosfera
- 1t alumínio - **libera** 9,3t de CO₂ na atmosfera
- 1t madeira - **absorve** 1,7t de CO₂ da atmosfera, para além da energia gasta no cultivo, na colheita e no processamento.

Dessa forma, pode-se projetar o impacto comparativo dos materiais mantendo-se uma equivalência de medida.

A estrutura de uma casa de *steelframe* acrescenta 4,5 toneladas de CO₂ à atmosfera enquanto que a estrutura de uma casa de *woodframe* do mesmo tamanho, absorve 9,5 toneladas de CO₂ da atmosfera, e assim por diante.

Escolher opções de madeira para uma casa média pode retirar cerca de 20 toneladas líquidas de CO₂ da atmosfera, o equivalente a 7,1 anos de uso de um carro a gasolina.

O uso de outros materiais (concreto, aço, tijolo e alumínio) pode adicionar 24 toneladas de CO₂ líquido à atmosfera, equivalentes a 8,6 anos de uso de um carro.⁷

1.2 Madeira, inclusive

Para além do repertório tradicional de benefícios da madeira conhecidos ao longo do desenvolvimento da humanidade, isto é, conforto ambiental, maleabilidade, disponibilidade na natureza e qualidades estruturais, hoje se agregam outros valores mais caros ao momento histórico da humanidade.

Se agora avaliamos as matérias-primas pelo custo e pela facilidade de aquisição, sem a preocupação *a priori* sobre a origem, os processos de fabricação, o transporte, a geração de resíduos, o consumo energético e a qualificação de mão de obra – entre outros fatores pertencentes à cadeia construtiva – precisamos considerar, a partir de agora, tais fatores como prioritários na escolha dos materiais. Verificaremos, assim, a falta de opções de materiais que atendam a esses parâmetros, e a dependência que

⁷ Pulp & Paper Resources & Information <https://paperonweb.com/A1110.htm>, acesso 22/11/2019.

a indústria tem sobre materiais e processos francamente destrutivos e de alto impacto ambiental. A literatura é farta em textos que tratam da mitigação dos efeitos causados pelas indústrias convencionais e não se justifica, para esta tese, descrever os processos de fabricação e os estudos desenvolvidos nessa direção.

A madeira, no presente momento, é a única matéria-prima que atende de forma satisfatória aos requisitos necessários para a implantação de uma indústria construtiva virtuosa e benéfica para o ambiente. Seguindo uma sequência a partir da origem, podem-se avaliar escolhas e metodologias geradas por critérios que em muito antecedem a forma com que um projeto de arquitetura evolui dentro da cultura reinante.

O conceito de sequestro de carbono, isto é, o carbono aprisionado na madeira, que foi absorvido durante a fotossíntese, é antigo, no entanto não disseminado a ponto de pertencer ao vocabulário da comunidade de uma forma geral. Ainda se faz necessário elucidar questões básicas associadas à durabilidade, flamabilidade, desempenho estrutural e manejo florestal junto ao público geral, temas carregados de preconceitos que estigmatizam a madeira como matéria-prima não tecnológica.

1.3 Origem

Podem-se considerar dois grandes universos de recursos florestais hoje disponíveis no mundo: as madeiras nativas de florestas originárias dos diversos biomas existentes nos países e as florestas industriais plantadas com finalidades específicas de uso e manejo.

As **florestas nativas** têm sido responsáveis pela alimentação do mercado construtivo desde o princípio da colonização europeia do continente sul-americano, sempre na forma de um extrativismo predatório, sem preocupações com a recomposição do acervo florestal, ou de um manejo cíclico que permitisse a recuperação das áreas de extração. O corte raso é a norma ainda hoje, seja para a extração de espécies valiosas, seja para instalação de áreas de agricultura de extensão ou atividades pastoris.

Nos países europeus, o manejo florestal responsável é um fato econômico e cultural, uma vez que os recursos naturais sempre tiveram importância relevante nas economias e nas sociedades desde a Idade Média. As florestas europeias são relativamente homogêneas e com pouca diversidade, resultando em uma exploração que já foi predatória, entretanto hoje sustentável e controlável. A paisagem é um elemento cultural de valor turístico que impõe exploração e replantio com o menor impacto visual possível, a ponto de haver um estoque limitado de árvores do qual os proprietários podem dispor para comercialização ou consumo próprio.

As espécies de valor comercial mais comuns incluem abetos, faia, carvalho e pinheiros, com relativa baixa densidade (entre 300kg/m^3 e 700kg/m^3), próxima das madeiras tropicais leves.

Figura 1.6. Mapa consolidado das florestas europeias em 2011
Fonte: European Forest Institute

A natureza de tais florestas é a homogeneidade e a proximidade entre as árvores, as quais não competem entre si para a preservação das espécies, fato comum nas florestas tropicais de alta diversidade. Embora a certificação florestal tenha inegável efeito na legalização dos processos e no manejo comercial dos produtos florestais, ela pouco afeta o parque florestal europeu, o qual já adota a maioria dos procedimentos preconizados pelas certificadoras. São as florestas tropicais, cujo produto é massivamente exportado para os países do hemisfério norte, as áreas que mais necessitam do controle e da certificação de origem, pois são ambientes complexos e extensões incontroláveis. Os mercados do hemisfério norte estão relativamente bem disciplinados e exigem certificação de origem das madeiras provenientes das florestas tropicais da Amazônia e do Congo, alvos preferidos pelos importadores. Como o manejo é feito a partir da matéria-prima importada e certificada, o controle dos processos industriais de produtos florestais nesses países importadores fica mais restrito e administrável. Os invernos rigorosos também impõem um controle natural de xilófagos, que raramente constituem problema para as madeiras utilizadas nas construções, apesar de sua baixa densidade e potencial vulnerabilidade.

Esse conjunto de fatores explica, em parte, o acelerado desenvolvimento tecnológico pelos quais os produtos florestais europeus têm passado, aliados à percepção de que as construções em madeira são duráveis e fazem parte da cultura local. Desde a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997, efetivado em 2005 por 84 países, a Alemanha, a Áustria, a Suíça e a França vêm liderando os esforços na maximização do uso da madeira na construção civil, formulando políticas de fomento e desenvolvimento industrial em massa. (UN Climate Change https://unfccc.int/kyoto_protocol)

As florestas nativas do Brasil representam um desafio cuja escala ultrapassa as fronteiras do País e exige um esforço redobrado para sua conservação e manejo sustentável. Algumas entidades defendem as florestas em pé, enquanto outras ensejam políticas desenvolvimentistas de uma economia florestal mais ampla para fixação do homem e ao mesmo tempo preservação florestal. Ambas as visões enfrentam um embate épico contra a ocupação ilegal, o desmate, os incêndios criminosos, a retirada ilegal de espécies, a mineração ilegal e outras mazelas que perduram pela ineficiência com que são atacadas e debeladas. Seja pela tradição extrativista herdada do período colonial, seja pelo desconhecimento da população agrária e silvícola, ou pela simples incompetência das políticas ambientais, o Brasil vem perdendo área florestal nativa a passo acelerado, prejudicando a criação de uma área econômica cuja prática poderia devolver a recuperação e a integridade das áreas desmatadas.

Tão importante quanto o desmatamento em si é o padrão de tal desmatamento: ele cria descontinuidade de biomas e diversidade florestal, acelerando o processo degenerativo.

As figuras 1.7 e 1.8 mostram o desmate da Mata Atlântica, principal bioma costeiro do Brasil, ao longo de quatrocentos anos e, no outro mapa, em vermelho, as áreas de risco iminente de desmate nos próximos anos (até 2050).

Tendo em mente esse quadro, é de considerar-se um banimento radical do desmate a curtíssimo prazo, entretanto semelhante gesto puniria as poucas empresas que operam de forma legal e sustentável, em áreas certificadas com o selo FSC, apoiadas por organizações internacionais como o WWF Brasil. São empresas que vivem exclusivamente da exportação de toras e produtos florestais de baixa tecnologia e beneficiamento. Considerando que o manejo florestal certificado impõe a retirada das espécies comerciais conjuntamente com outras espécies de baixo valor comercial, para efeito de equilíbrio ambiental, é importante desenvolver uma produção industrial local aproveitando as espécies de baixa densidade, desprezadas por desconhecimento dos mercados compradores. Algumas empresas estudam a laminação de madeiras amazônicas de baixa densidade, agregando valor e desenvolvendo cultura industrial local. A alternativa das madeireiras é o descarte para uso como biomassa, liberando CO₂ de volta à atmosfera.

O mercado consumidor está situado principalmente no Sudeste, onde os mal informados compradores escolhem madeira pela coloração ou pelos nomes populares do momento, em detrimento do desempenho e da durabilidade do produto florestal. Não cabe aqui elaborar muito sobre o nível de desinformação dos usuários e da percepção pública sobre a madeira, a não ser pelo fato de que um dos objetivos deste trabalho é o de demonstrar a viabilidade e a plasticidade da madeira como produto tecnológico sofisticado e durável.

Não faz sentido, contudo, do ponto de vista de eficiência energética, transportar matéria-prima bruta por 8.000km de estradas precárias e sujeitas às cíclicas condições climáticas da Amazônia, para transformá-la e

Figura 1.7. Remanescentes florestais da mata atlântica

Fonte: SOS Mata Atlântica/Inpe, 2018

Figura 1.8. Desmatamento e áreas de risco das florestas nativas

Fonte: CIT – Centro de Inteligência Territorial, 2018

Figura 1.9. Gráfico proporcional de áreas de árvores plantadas no Brasil.

Fonte: IBÁ e PÖYRY, 2018

ÁREAS DE ÁRVORES PLANTADAS NO BRASIL POR ESTADO E POR GÊNERO, 2018

■ Eucalipto *Eucalyptus*
■ Pinus *Pine*
■ Outros *Others*

Madeira extraída total: 267.696.429 m³
Madeira para combustível: 131.419.76
Madeira para uso industrial: 136.276.668 m³

Foram provenientes de florestas plantadas:
- 82,9% do total de madeira extraída (222.066.806 m³)
- 74,6% do total de madeira extraída para combustível (98.098.840 m³)
- 91% do total de madeira extraída para uso industrial (123.967.966 m³)

Figura 1.10 Quantidade de madeira por tipo de Floresta, finalidade e espécie. Fonte: PEVS 2016/IBGE (2017)

acrescentar valor no Sudeste, deixando para trás a possibilidade de agregação de impostos e a possível qualificação de mão de obra e benefícios culturais no local de origem.

Por isso, a discussão volta-se ao papel das florestas plantadas entre os estados das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do País. Majoritariamente destinadas ao abastecimento das indústrias de papel e celulose e constituída por coníferas e folhosas, essa indústria desenvolveu-se a partir da importação de espécies dirigidas primeiramente ao abastecimento de dormentes para a expansão das malhas ferroviárias, no princípio do século XX (Navarro de Andrade em 1903). A Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS) atribui um grande salto na plantação de espécies de eucaliptos a partir dos incentivos fiscais promovidos pelo governo em 1966 e chamou a atenção das indústrias de celulose para a produtividade da família dos eucaliptos, até então concentrada principalmente nos pinus, igualmente exóticos. O naturalista sueco Alberto Löfgren, em sua obra *Notas sobre as plantas exóticas introduzidas no Estado de São Paulo*, datada de 1906, relata que no início da pinocultura no país, havia “16 espécies de Pinus e, também, 55 espécies de Eucalyptus”. A principal razão da introdução do pinus exótico no Brasil foi como uma alternativa à produção de madeira diante da escassez do “Pinheiro do Paraná”, a conhecida araucária (*araucaria angustifolia*) – exaustivamente explorada ao longo de quatrocentos anos de colonização na região dominada pela Mata Atlântica.

As monoculturas de pinus, eucaliptos, teca e outros respondem hoje por escassos 1,5% da área florestal do Brasil e passam por modificações no modelo e na forma do manejo, se comparadas com a prática corrente até o início dos anos 2000. Na região Sul, ainda predomina o plantio do pinus, entretanto, do estado de São Paulo para cima, o eucalipto já domina inteiramente a paisagem. Ao final dos anos 1990, as principais indústrias papeleiras já haviam adequado sua forma de plantio e manejo, adotando práticas de baixo impacto no solo e introduzindo sub-bosques de vegetação nativa, recuperando alguma biodiversidade de flora e fauna.

O aumento da distancia entre as árvores contribui para a produção de produtos de porte maior e mais afeitos ao mercado da construção, com desbastes regulares que diminuem a incidência de nós e desvios de fibras.

A introdução dos sistemas agro-silvo-pastoris, a partir do início do século XXI, estimulou pequenos e médios plantadores a diversificar o uso do solo e a criar novos ciclos econômicos nas áreas rurais.

Entretanto, a falta de um mercado consumidor consolidado e de maior integração entre os produtores ainda provoca desabastecimento esporádico e falta de conformidade entre eles, sem mencionar que, como produto comoditizado, a celulose provoca corridas entre os produtores para abastecer o mercado em momentos de pico, provocando corte raso e total aniquilação dos processos manejados.

1.4 Madeira na construção

Para a construção civil, a madeira raramente teve um papel estrutural significativo no século XX, sendo sempre associada ao uso de construções vernaculares no Sul do Brasil, habitações para a população de baixo poder aquisitivo ou para casas de veraneio para classes abastadas. O interessante em tal observação refere-se à linguagem, e não à materialidade em si. Se, nas habitações populares, as peças são leves e provenientes de árvores locais, as construções abastadas provêm de árvores de grande porte, com peças estruturais valorizadas por robustas dimensões, em sua grande maioria provenientes de florestas nativas amazônicas.

O uso da madeira em obras de caráter não residencial foi pequeno, no entanto estabeleceu parâmetros construtivos de alta qualidade e extrema racionalidade: muitas construções estão ainda em excelente qualidade quase um século depois de feitas. As técnicas empregadas a partir dos anos 1930 no Brasil, trazidas por Erwin Hauff, engenheiro de origem austríaca e formação alemã, que se notabilizou por usar estruturas leves para grandes vãos, modificaram a percepção do uso da madeira como elemento estrutural. Entrincheiradas no Sul e no Sudeste do País, em um nicho industrial de galpões, várias estruturas realizadas em ginásios esportivos e coberturas equestres extravasaram esse nicho e permanecem intatas e em uso constante até o presente, atestando a qualidade e a longevidade do material (BRITO, 2017)⁸. Arquitetos brasileiros conhecidos por sua produção modernista em concreto flertaram com a madeira em construções isoladas dentro da sua produção, como Oscar Niemeyer, Lúcio Costa, Lina Bo Bardi e Carlos Millan. Zanine Caldas e Severiano Porto estão entre as mentes mais inventivas da construção em madeira no Brasil, com obras que mesclam o vernáculo com um autodidatismo orgânico aprendido com o manuseio da matéria-prima, racionalizada na medida correta que o empirismo permite.

Figura 1.11 Comparativo de ganho em estoque de carbono entre florestas plantadas manejadas e florestas nativas sem manejo. Embora este gráfico tenha como referência florestas de coníferas européias, as proporções se mantêm entre as florestas brasileiras nativas e plantadas.

Fonte: Perez-Garcia et al., 2005

Figura 1.12 Estrutura Hauff. "Aspecto de um dos nós que compõem os arcos biarticulados do Ginásio de Esporte do Estádio do Pacaembu."

Erwin Hauff, São Paulo, 1939

Fonte e Foto: Sandro Fábio Cesar

⁸ BRITO et al, Leandro. *Avaliação de estruturas de madeira da Hauff e sucessoras consolidadas em São Paulo e Minas Gerais*, Brasil, 2017

Figura 1.13 *Residência Zézito*,
Zanine Caldas, Brasília, 1989.
Foto: Joana França

Figura 1.14 *Campus da Universidade do Amazonas*, Severiano Porto,
Manaus, 1970-1980.
Foto: ©Severiano Porto

Figura 1.15 *Catetinho*,
Oscar Niemeyer, Brasília, 1960
Foto: Gonzalo Viramonte

"Reza a lenda que os rascunhos da primeira morada de Juscelino Kubitschek, o Catetinho, foram rabiscados por Oscar Niemeyer, num guardanapo do extinto Juca's Bar, numa noite de 1956, no Rio de Janeiro. Ali mesmo, sensibilizados com a distância que separava JK de seu sonho, quase utopia, uma "vaquinha" foi realizada entre os amigos do presidente e, do montante, deu-se início à construção, imortalizada entre suas matas, regatos e fontes de água cristalina de: o Palácio de Tábuas."⁹

Nos anos 1950, a laminação de peças de pinus e eucalipto produzidas por engenheiros e especialistas oriundos da Hauff resultaram na fundação da Esmara, em Porto Alegre e, mais tarde, da Laminarco em 1965, em São Paulo. Esse componente industrializado e com grande potencial arquitetônico foi apresentado a um universo de arquitetos modernos ávidos por novas alternativas construtivas.

Entretanto a produção arquitetônica dos últimos quarenta anos, embora relevante, ainda está concentrada em residências de alto padrão, fora das áreas mais urbanizadas. Existem poucas obras de madeira nesse contexto, principalmente na área da educação e cultura. Existe uma grande resistência ao uso da madeira de uma forma geral, em parte por nossa herança ibérica, onde a madeira tem um papel coadjuvante e, por outro lado, pela total ignorância quanto aos atributos do material, principalmente dos materiais tecnológicos engenheirados. Não cabe estender a discussão por um viés cultural, assunto relevante que exigiria um empenho específico, mas considerar o papel que a ignorância tecnológica tem na formação dos mitos que envolvem a madeira na nossa cultura.

- Madeira queima facilmente
- Madeira apodrece (água e insetos).
- Madeira envelhece mal

Existem outras representações regionais associadas a questões locais e acontecimentos traumáticos que ajudam a perpetuar os mitos. Se o equivalente ocorre com o concreto ou o metal, o material não absorve a culpa pelo fato, como acontece com a madeira. É de se supor que a ignorância geral sobre o concreto e os metais seja maior do que o desconhecimento de um material familiar que todos já pegaram na mão desde tenra idade. Talvez a própria familiaridade seja a razão dos preconceitos.

Analisem-se os itens acima e tente-se entender a razão e a solução para a superação dos preconceitos.

A madeira queima, isso é um fato, porém qualquer tentativa de queimar um tronco de diâmetro acima de dez centímetros com uma pequena chama pontual demonstrará que o tronco demorará muito para entrar em combustão. A madeira maciça tem combustão lenta e previsível e, ao contrário dos mate-

⁹ Lucio in the Sky. Blog acesso 7/3/2019. <https://luciointhesky.wordpress.com/2012/08/30/catetinho-o-palacio-de-tabuas/>

riais construtivos não combustíveis, suporta temperaturas muito mais altas antes de perder suas características estruturais. Os metais deformam (perdem sua capacidade estrutural) em temperaturas variáveis e, no caso do aço, entre 650°C e 1100°C, dependendo da composição e dimensionamento do componente estrutural. O concreto, material plástico que via de regra é utilizado para fins estruturais associado ao uso de barras de aço, greta e racha em temperaturas muito mais baixas, em torno 80°C, em muitos casos expondo o metal interno à ação do calor e das intempéries. Já a madeira passa por um fenômeno em que a camada de brasa e carvão serve como isolante térmico, protegendo o interior do material e a sua capacidade estrutural por períodos relativamente longos. As normas construtivas exigem que seja adicionado ao cálculo estrutural um percentual de queima que torne o processo previsível e prolongue o tempo de fuga dos ambientes em chamas. Essa percepção de **flamabilidade versus desempenho** tem sido a tônica das discussões sobre as novas diretrizes técnicas e sua aplicação para fins construtivos em geral.

A sueca Birgit Östman é hoje a mais profícua especialista na área e vem estudando, há meio século, a ação do fogo sobre a madeira, sobretudo sobre as novas composições engenheiradas. É uma defensora dos princípios passivos de desenho arquitetônico para a proteção ao fogo e responsável pelo conceito de desempenho quanto aos materiais construtivos em geral. Os princípios são simples, e a solução depende essencialmente de detalhes elaborados em projeto para atenuar a expansão dos focos de incêndio. As diretrizes procuram atender tanto aos usuários (patrimônio humano) quanto aos bens (patrimônio material) e são baseadas no acrônimo REI, que especifica as condições mínimas de projeto estrutural. (Östman, 2016)¹⁰

requerimentos de desempenho para estruturas expostas ao fogo

A fim de minimizar os efeitos das chamas sobre a madeira, existe uma nova classe de retardantes de combustão, em substituição aos derivados do altamente tóxico bromo, que são à base de água e outros compostos não tóxicos.

A liderança na pesquisa nessa área é dominada pelos países bálticos e escandinavos, cujas legislações são muito rígidas quanto ao impacto ambiental do eventual descarte da madeira depois do uso.

Figura 1.16 Efeito do fogo sobre seção de madeira maciça. Ilustração: autor

Figura 1.17 sistemas passivos de prevenção à propagação do fogo. Fonte: Östman NFPA Symposium 18.4.2016

Figura 1.18 Diagrama de desempenho ao fogo. Fonte: Östman NFPA Symposium 18.4.2016

¹⁰ Östman NFPA Symposium 2016-04-18

Figura 1.19 *Residência com mais de 400 anos em Vrin, Suíça.*
Foto: autor

Figura 1.20 *Fachada em madeira, Klaus, Áustria.*
Foto: autor

Fig. 1.21 *Balloon frame, atribuído a Augustine Taylor, cerca de 1833*

Fig. 1.22 *Sears Roebuck & Co., Magnolia home, modelo popular entre a classe média ascendente, cerca de 1920.*
Foto: Rosemary Thornton/Wikicommons

Como todo material orgânico, a madeira está sujeita à **decomposição** por ação da água e de xilófagos em geral, e o conhecimento sobre o comportamento de cada espécie é fundamental para a defesa contra a decomposição precoce e o prolongamento indefinido da matéria-prima. Estruturas bem protegidas e com o uso de espécies locais adaptadas duram mais de cinco séculos, como atestam construções alpinas, japonesas e até mesmo catedrais europeias. Existem produtos hidrorrepelentes de baixo impacto ambiental, porém nada substitui a proteção passiva através do desenho preventivo, da escolha correta das espécies e do conhecimento antecipado do comportamento do material escolhido. O detalhamento exaustivo com aplicação em protótipos ou baseado em soluções comprovadas é a melhor opção preventiva e de longa duração recomendada.

Para uma sociedade que hipervaloriza a juventude sob todos aspectos, o envelhecimento é inaceitável e os materiais orgânicos que sofrem com a ação do tempo são desconsiderados como opção permanente. As sociedades que utilizam a madeira há várias gerações estão acostumadas com o envelhecimento natural e tiram partido dos padrões cromáticos decorrentes da chuva e da neve. Em geral, as fachadas europeias não recebem nenhuma forma de tratamento.

1.5 Industrialização

O que distingue a produção dos pioneiros em madeira da produção contemporânea é o grau de industrialização alcançado ao longo do século XX. Se a industrialização, que permite a racionalização dos insumos e dos processos, é determinante para a construção do *zeigeist* contemporâneo, então a tecnologia é igualmente importante para viabilizá-la. A racionalidade dos processos e as novas técnicas empregadas colocam a produção de obras em madeira em um patamar coerente com nosso tempo, porém a nova linguagem ainda busca uma autonomia formal e um descolamento da linguagem adotada com outros materiais.

A presença da madeira na industrialização antecede a de outros materiais como o concreto. Contemporânea do aço, teve seu primeiro impulso com a introdução do *Balloon frame*, introduzido no mercado norte-americano no início do século XIX e utilizado até hoje, em autoconstrução e por empresas especializadas. Durante o século XX, ganhou popularidade como produto de catálogo das lojas Sears Roebuck & Co., com exemplares vendidos desmontados, entregues e erguidos, ainda em uso e em perfeita qualidade.

Para os arquitetos europeus, oriundos da Bauhaus, a industrialização ganhou contornos mais autônomos. Walter Gropius, fundador da icônica escola, já havia emigrado para os Estados Unidos e, juntamente com Konrad Wachsmann, arquiteto e carpinteiro alemão, desenvolveu a *Packaged House*, modelo habitacional para as massas, que cabia desmontada em um caminhão médio.

Marcel Breuer, outro egresso da Bauhaus, igualmente se aventurou em estudos e projetos pré-fabricados em madeira, com linguagem e processo construtivos muito à frente de seu tempo. A *Plas 2 Point House* exibe uma fundação

leve, apoiada somente em dois pontos, passível de ser construída em terrenos planos ou suavemente inclinados. Com a tecnologia de recorte por CNC, esse modelo faria sentido mesmo 80 anos após sua concepção.

Breuer desenvolveu outro projeto *avant la lettre*, as *Bambos Houses*, pré-fabricadas com painéis de madeira e perfis metálicos, uma linguagem que seria adotada e construída pelo casal Charles e Ray Eames na conhecida *Case Study house N°8*, de 1949. Sua experiência com construções em madeira não se limitou aos estudos mas também a um conjunto de casas de veraneio em Cape Cod, na costa leste dos Estados Unidos, que adotam sistemas construtivos mais convencionais.

Jean Prouvé foi outro arquiteto europeu que investigou os princípios da pré-fabricação em madeira e aço, permeando seu grande conhecimento e treinamento em metalurgia com princípios sociais e consciência econômica apurada pela devastação provocada pela Segunda Guerra Mundial. A série de construções conhecidas como “casas desmontáveis” avançou por pelo menos quatro décadas de pesquisas e variações, e é frequentemente retomada como referência e releituras.

Nos Estados Unidos, por volta do final dos anos 1930, a experiência com produtos industrializados, notadamente as chapas de compensado (*plywood*), surgiram com a promessa de uma obra rápida que pudesse suprir a alta demanda por casas de perfil popular e de classe média. A *FPL unithouse* (*The US Forest Products Laboratory*) foi um bem-sucedido modelo de casas baseadas em chapas de 1.22 x 2.44 metros, padrão até hoje adotado no mercado americano. Em 1936, o arquiteto Richard Neutra desenhou uma casa para a Evans Plywood Company, em que se propunha um plano de locação de terrenos para a construção de casas desmontáveis, as quais poderiam ser relocadas junto com os proprietários.

As pesquisas sobre pré-fabricação em madeira arrefeceram em meados do século XX, sendo retomadas no início do século XXI, com o desenvolvimento das novas tecnologias em madeira e o uso corrente dos produtos engenheirados.

Para a construção civil, os produtos engenheirados de madeira abriram portas até há pouco desconhecidas na concepção, na fabricação e na montagem de obras em madeira. Produtos engenheirados [neologismo traduzido do inglês *engineered*] são componentes construtivos criados pela combinação de pequenos segmentos de madeira, recompostos em dimensões e direções que tiram proveito do comportamento das fibras naturais e estabelecem formalmente um distanciamento com as árvores de origem, permitindo desempenhos comparados aos do concreto e do aço, com peso até três quartos abaixo dos materiais de referência. Englobados pelo termo, estão produtos cuja origem remonta a tempos medievais e produtos recém inventados, fruto de pesquisas nas áreas da bioquímica e da física. Todos eles fazem sentido em função de seu tempo e lugar e colocam o arquiteto diante de um catálogo de possibilidades, as quais dependem de análise profunda das premissas sustentáveis já apontadas.

Figura 1.23 *Packaged House, General Panel system*, Gropius/Wachsmann, 1942
Foto © Jörg Zimmermann, Stylepark

Figura 1.24 *Plas 2 Point House*, Marcel Breuer, 1943
Fonte: Home Delivery, MoMA

Figura 1.25 *Bambos Houses*, Marcelo Breuer, 1927
 Fonte: Bauhaus Dessau Foundation 3D model

Figura 1.26 *CSH#8* Charles e Ray Eames, Los Angeles, 1949.
 Fonte: architecture-history.org

Figura 1.27 *Super-Plywood Model House*, Richard Neutra 1936.
 Fonte: Luckhaus photos

Figura 1.28 *FPL Unit House*, 1938.
 Fonte: USDA Forest Service

Figura 1.29 *La Maison Démontable* BCCÓ, Jean Prouvé e Pierre Jeanneret, 1941/1943
 Fonte: Jean Prouvé - Architect for better days, Phaidon

1.25

1.26

1.27

1.28

1.29

Os produtos engenheirados podem ser classificados em dois grandes grupos: colados e compostos sem cola, em qualquer caso a agregação ocorre mecanicamente. Existem novos produtos, ainda inclassificáveis, que estão longe da distribuição universal e que, em comum, têm o fato de serem compostos por vários elementos ou mesmo outros materiais. Serão denominados, para efeito desse trabalho, de compósitos.

1.6 Produtos de madeira colada

GLULAM ou MLC: (Madeira Lamelada Colada). Foi utilizada na Europa a partir dos anos 1940. Em 1861, foi aplicada na sala de reunião do King Edward College em Southampton, Inglaterra, e patenteada em 1901, na Suíça. Seu uso foi disseminado após a introdução do adesivo phenol-resorcinol à prova d'água, criado em 1942. A introdução de adesivos de poliuretano (PU) à base d'água, de baixa toxicidade e baixo impacto ambiental, amplificou o interesse pela tecnologia, expandida largamente através da Alemanha, da Áustria e da Suíça, apoiada por pesquisas industriais e acadêmicas ao longo dos anos 1980 e 1990 do século XX. O MLC permite peças laminadas de grande comprimento e seções delgadas que, em arco, vencem vãos superiores a 45m e necessitam de fundações menores devido a seu relativo baixo peso. O processo de fabricação é dividido em quatro etapas:

(1) seleção e preparo das peças, que deverão ter poucos defeitos e umidade ideal em torno de 12%, com fibras pouco inclinadas em relação ao comprimento. Em geral são madeiras de densidade entre 330kg/m³ e 750kg/m³, o que no Brasil representam os pinus e eucaliptos respectivamente;

(2) colagem das pontas através de juntas tipo finger, formando régua longas, que deverão (3) receber cola, empilhadas e prensadas por aproximadamente uma hora, dependendo das dimensões e do tipo do adesivo.

(4) passarão, em seguida, por acabamento e usinagem para ajustes dimensionais e geométricos.

Figura 1.30 Processo de fabricação de MLC.
Ita Construtora
Fotos: autor

Figura 1.31 CLT.
Foto: autor

Figura 1.32 LVL Tishlerei Mohr. Foto: autor

Figura 1.33 LVL. Fonte: Baubuche

CLT: *Cross Laminated Timber* (Madeira Lamelada Colada Cruzada). É o grande responsável pela mudança de percepção dos investidores e construtores mundo afora. É um produto típico “pós Protocolo de Quioto”, quando os países europeus passaram a estimular o uso intensivo da madeira como forma de estocar CO_2 em produtos florestais. Constituído por painéis de grandes dimensões (3m por 16m, em alguns fabricantes) de madeira colada cruzada, isto é, em lâminas perpendiculares umas às outras, sempre em número ímpar, de 3 a 9 lâminas. É recomendado para construções rápidas, substituindo pilares e vigas como elementos estruturais, uma vez que atuam sob compressão, com as cargas distribuídas homogeneamente pelas placas. Por suas características, a montagem de edificações em altura faz-se de forma extremamente rápida e com poucos trabalhadores, muito qualificados. As placas são projetadas e dimensionadas pelo fabricante em função da forma de atuação, posicionamento e cargas incidentes. A espessura e o número de lâminas são determinados para cada tipo de placa e todas as aberturas e rebaixos para elétrica, hidráulica e demais itens de infraestrutura são usinados pelo fabricante, em uma mesa CNC (controle numérico computacional). Os painéis são enviados por ordem de montagem: em função das grandes dimensões e da logística de transporte, são empilhados e fixados por parafusos inclinados, a começar pela caixa de circulação vertical. Toda a estrutura é revestida para a proteção das placas contra intempérie e incêndio, com material mineral. Até o presente momento, a madeira utilizada vem da família dos pinus, com baixa densidade, em função do peso e do manuseio em obra.

Alguns estudos apontam para o uso de madeiras de média densidade, como o eucalipto que, por sua natural resistência, pode produzir painéis mais esbeltos e equivalentes em peso.

LVL: *Laminated Veneer Lumber* (Madeira Laminada Colada). É um compósito de madeira engenheirada, de alta resistência, usado principalmente para aplicações estruturais. É comparável em resistência à madeira maciça, ao concreto e ao aço, e é fabricado por meio da união de folhas de madeira fina descascadas ou cortadas rotativamente e agregadas com cola sob calor e pressão. O LVL

foi desenvolvido na década de 1970 e é atualmente utilizado para aplicações estruturais permanentes como vigas, cordas de treliças e pilares. Assemelha-se a uma placa de compensado, usualmente com lâminas finas de 3mm de espessura alinhadas no sentido longitudinal, coladas e prensadas. Permite estruturas esbeltas e elegantes, rivalizando com o aço em termos de linguagem.

1.7 Produtos de madeira não colada

NLT: *Nail Laminated Timber* (Madeira Lamelada Pregada)

Parte da família dos produtos compostos de madeira maciça, o *Brettstapel*, madeiras laminadas pregadas ou cavilhadas, é um produto laminado mecanicamente para criar um elemento estrutural sólido. Os painéis e vigas em NLT são criados pelo alinhamento de madeira serrada fixada com pregos. Tipicamente usado como pisos e telhados, o NLT também pode ser usado para paredes, poços de elevadores e poços de escadas.

DLT: *Dowell laminated timber* (Madeira Lamelada Cavilhada)

Trata-se de uma tecnologia ancestral que vem sendo redescoberta como uma alternativa industrial. Não requer maquinário sofisticado de produção e pode ser adaptada a condições e espécies locais, favorecendo a dispersão da técnica sem concentração em poucos produtores. Aplica-se a qualquer tipo de madeira com capacidade estrutural e aceita até mesmo a combinação de espécies com comportamento similar.

Nos anos 1970, o engenheiro Julius Natterer desenvolveu um sistema que prescinde dos pregos para ativar a ligação mecânica entre as peças de madeira em que longas cavilhas, com uma taxa de umidade abaixo das peças a serem unidas, absorvem a umidade ambiente e expandem, tornando o produto resultante em estrutura passível de suportar grandes cargas.

Esse produto, hoje conhecido globalmente como DLT, tem grande popularidade entre os países da Europa Central e passou a ser comercializado em grande escala a partir de 1999, quando uma empresa alemã colocou no mercado o *Dübelholz*, ou madeira cavilhada, envolvendo a inserção de buchas de madeira de densidades mais altas em furos pré-perfurados perpendiculares às madeiras a serem unidas. Com esse processo industrial, o *Brettstapel* pode ser inteiramente feito com madeira maciça de baixa densidade, com o potencial de se estender até 8 metros, utilizando painéis de 600 mm de largura e 80-300 mm de espessura.

Figura 1.34 e 1.35 Diagramas DLT.
Ilustrações: autor

Figura 1.36 DLT composto com concreto
Fonte: Structurecraft

As peças a serem unidas, de madeira macia (geralmente abeto), são secas a um teor de umidade de 12-15%. As cavilhas de madeira de folhosas mais densas são secas até atingirem um teor de umidade entre 4% e 8%. Quando os dois elementos são combinados, o conteúdo de umidade diferente resulta na expansão das cavilhas para alcançar o equilíbrio de umidade que mantém as colunas juntas.

A madeira completamente seca expande-se e contrai-se com a temperatura e os níveis de umidade. Com essa disposição de postes e cavilhas perpendiculares, é importante notar que a exposição a variações excessivas de temperatura ou umidade no local pode, ao longo do tempo, resultar em contração e expansão e, potencialmente, em separação ao longo do eixo das cavilhas. Isso compromete a resistência do *Brettstapel*, e a questão é às vezes abordada com a reintrodução de cola ou pregos entre as colunas. Embora isso resolva a questão da separação, significa que o produto não é mais 100% madeira.

Em 2001, uma empresa austríaca, Sohm HolzBautechnik GmbH¹¹, desenvolveu um sistema de inserção de cavilhas de madeira em ângulo através das partes em formações "V" e "W", o que proporcionou um sistema de junção muito rígido que praticamente eliminou o potencial de aberturas de movimento entre as partes, garantindo, uma vez mais, um produto de madeira 100% sem adesivos ou ferragens. Outros fabricantes têm meios diferentes para lidar com a questão, incluindo cavilhas de condução através de camadas rotativas de placas, embora essa seja talvez a mais inovadora.

As pesquisas com peças maciças em madeira composta avançam em grande velocidade para atender às questões locais específicas, de processo de fabricação, redução de custos e facilidade de montagem. Também tem sido levado em conta o ciclo de vida de tais produtos, desde a origem até a destinação final.

Para este trabalho, a investigação de algumas das inovações tecnológicas caras e restritivas faz pouco sentido por dizer respeito ao âmbito industrial cuja escala de produção não corresponde às premissas adotadas.

Valem aqui os valores preconizados por Stephan Behnisch e as premissas do trabalho coletivo do **Habis**, grupo de pesquisa em habitação e sustentabilidade do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP, em São Carlos, que investiga as Tecnologias Construtivas de Baixo Carbono (TCBC), como forma de acessibilizar métodos construtivos em que a madeira convive com outros materiais e com processos de baixo impacto ambiental. Essa tese comunga e se alimenta dessas pesquisas coletivas e se insere no processo de investigação e difusão desses resultados.

Figura 1.37 Paineis cavilhados diagonais
Fonte: autor

¹¹ <http://www.sohm-holzbau.at/>, http://www.brettstapel.org/Brettstapel/What_is_it.html

Figura 2.1 Viaduto nº 11, SPR, Serra do mar, 1899.
Fonte: De Santos a Jundiá: nos trilhos do café com a São Paulo Railway, 2005.

2 Método como forma

No Brasil, ao alvorecer do século XX, com o advento da indústria metalúrgica, a madeira perde parte de seu papel como gerador da forma, ou melhor, como razão estrutural. Viadutos e seções da ferrovia São Paulo Railway, outrora em madeira, começam a ser substituídos por estruturas em concreto e metal. A tecnologia metalúrgica trazida pelos ingleses interfere diretamente nas escolhas formais dos equipamentos e da infraestrutura da ferrovia, das estações e das composições dos trens.

Figura 2.2 Cambota/cimbramento para viaduto nº 13, SPR, Serra do mar, 1899.
Fonte: De Santos a Jundiá: nos trilhos do café com a São Paulo Railway, 2005.

À madeira resta servir de suporte ao cimbramento de túneis e viadutos. Parece um uso pouco nobre, mas são complexas conquistas de engenharia que pavimentaram a autonomia que a madeira tem hoje como material tecnologicamente desenvolvido à luz das novas técnicas e dos processos industriais de fabricação, usinagem e montagem. Os limites formais deixam de ser técnicos, para recair sobre outros valores, os quais dependem da interpretação de cada autor.

Gasto de energia, transporte, movimentação e ciclo de vida, atributos impen-sáveis há 30 anos, estão sendo incorporados ao vocabulário dos arquitetos contemporâneos assim como os atributos do concreto e do aço foram incorporados ao longo do período moderno.

Para esta pesquisa, serão levados em conta os novos atributos, sob o risco de tornar-se um instrumento retórico, de vida curta. Significa que a incorporação das novas tecnologias andará lado a lado com as técnicas tradicionais, não excludentes, que dependem de contextualização para ganhar em eficiência. Em um mundo de alto consumo, eficiência torna-se um atributo essencial e não limitador, apenas acrescenta um desafio ainda maior. Há uma beleza intrínseca em tornar o desenho e a incorporação dos novos atributos parte do processo de projeto, a “estética da responsabilidade” atuante com respostas à altura dos requisitos contemporâneos.

2.1 Processos tradicionais e processos contemporâneos

A distinção entre as disciplinas de engenharia e arquitetura é recente, principalmente no estado de São Paulo, com pouco mais de 70 anos de vida acadêmica autônoma. A Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU) foi fundada em 1948. A Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro é a mais antiga do Brasil, de 1816, dentro da Escola de Belas Artes. A realidade é que os cursos de arquitetura incorporavam conhecimentos de engenharia que foram desaparecendo ao longo dos ajustes curriculares da maioria das escolas, e o ensino da madeira, como forma estrutural, é virtualmente inexistente na formação de arquitetos e engenheiros. O desenho tradicional como ferramenta de comunicação passou a ter caráter menos semântico e mais sintático, uma vez que se tornou um código para iniciados assim como em outras atividades profissionais. Para a elite dos profissionais da área e, portanto, de seus seguidores, a criatividade é o elemento mais importante do processo de projeto, e a abordagem exploratória, pesquisa em última instância, é o ponto de partida projetual.

O projeto arquitetônico é complexo, pois envolve soluções técnicas e artísticas, resultado da manipulação criativa de diferentes elementos, como funções, volume, espaço, textura, luz, materiais, componentes técnicos e custos, desempenho e tecnologia construtiva. Não há um método único para resolver problemas, pois cada caso é único e precisa de soluções específicas. No processo de criação arquitetônica, não há métodos universais entre profissionais, mas alguns procedimentos comuns. Na prática, algumas atividades são realizadas pela intuição, de forma consciente, e outras seguem padrões ou normas. O padrão de pensamento dos projetistas é: raciocínio, memória, evolução de ideias, criatividade e experiência.

Esse pensamento consta da publicação "O Processo de projeto em Arquitetura: da teoria à tecnologia" (KOWALTOVSKY 2011)¹ e reflete a visão contemporânea da produção arquitetônica no Brasil e na maior parte do mundo. Para os autores, "é essencial que a busca por novas formas seja para resolver problemas funcionais, técnicos, sociais, urbanos e estéticos, de maneira inteligente e ambientalmente responsável." O artigo compila ainda uma grande quantidade de métodos e processos explorados, principalmente durante a segunda metade do século XX, com abordagens que analisam desde funções cerebrais até fórmulas amplamente adotadas como a "solução criativa de problemas (CPS, *creative problem solving*), padrão da formação de uma geração de arquitetos, designers, publicitários e demais áreas criativas, que ainda dominam o ambiente profissional contemporâneo. "O princípio da solução criativa de problemas é alternar fases convergentes e divergentes de pensamento, nas quais ocorrem oito etapas: analisar uma situação; reconhecer um problema; identificar o problema; fazer suposições; gerar alternativas; escolher uma alternativa; implementar a solução e controlar." Acontece que, em arquitetura, se o objetivo é a evolução global do pensamento, os métodos objetivos tendem a ser restritivos, e o foco acaba por incidir em apenas um aspecto determinante. A ruptura, com uma sistematização sob variáveis precisas, é fundamental para uma abordagem criativa do processo, sempre tendo como ponto de partida um leque muito mais amplo de variáveis. Os sistemas e os métodos que partem de variáveis preconcebidas inibem o reconhecimento de possibilidades ao longo do processo e, assim, do aproveitamento de todo o potencial criativo e do inesperado. O mesmo artigo reduz as dezenas de metodologias de promoção do processo criativo a seis teorias aplicáveis aos conceitos necessários ao desenvolvimento de uma arquitetura exploratória, como demonstra o quadro abaixo.

Processo de geração de ideias	Método para geração de ideias
Combinação	Lista de atributos TRIZ (teoria da solução inventiva de problemas)
Associação	Brainstorming Mapa mental
Comparação	Analogia Biomimetismo

Os seis métodos listados estão entre os mais utilizados por todas as disciplinas que requerem ações criativas na resolução de problemas. Os métodos que

¹ KOWALTOVSKY, Doris C.C.K. et al (org), *O Processo de projeto em Arquitetura: da teoria à tecnologia*. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

utilizam a combinação para geração de ideias, entre eles o TRIZ dos anos cinquenta, têm em comum o objetivo de resolver as contradições de projeto sem que as decisões tomadas gerem outros problemas. O pensador Vilém Flusser vê nesse princípio uma contradição inerente ao processo criativo, na medida em que, ao criar-se um objeto para vencer um problema, tem-se um objeto (uma solução, um objeto cultural), uma nova questão a ser superada. Quanto mais se prosseguir removendo obstáculos (problemas) “mais a cultura se torna objetiva, objetual e problemática” (FLUSSER, 2007)². Já os processos associativos procuram remover a inibição e a autocensura por meio de geração de ideias espontâneas e intuitivas para, em um segundo momento de análise, selecionar as mais viáveis. Já a comparação associativa e analógica procura os pontos em comum entre problemas conhecidos e desconhecidos.

A analogia envolve a transferência de conhecimento de uma situação familiar (fonte) para uma situação a ser elucidada (alvo), incluindo três etapas

(i) seleção: definido o problema, seleciona-se um campo-fonte para gerar a analogia;

(ii) mapeamento: a fonte e o problema têm seus conceitos mapeados para as interferências;

(iii) avaliação: adaptam-se as interferências conforme os aspectos do problema. (KOWALTOVSKY 2011)³

O **biomimetismo** interessa particularmente a este projeto na medida em que deriva dos processos analógicos e retira sua fonte da natureza e do comportamento orgânico. A crítica mais comum em relação a essa metodologia aponta que ela resulta em “soluções suficientemente boas, mas não projetos ótimos”. Tal pensamento carrega uma observação simplista e pretenciosa, dentro de uma ótica de domínio e superação sobre o mundo natural e falha ao não perceber o impacto dessas decisões sobre o meio ambiente. O método não se resume simplesmente às analogias formais, conforme a crítica sugere, porém aprofunda-se na sistematização em etapas, sobre os mecanismos naturais e seu contexto, seu funcionamento e estratégias, e as diversas possibilidades a serem testadas.

Entre todos os materiais da cadeia construtiva, a madeira é a que mais exige uma abordagem compreensiva, pois é uma matéria-prima *sui generis*, com requisitos variáveis em função do uso, da espécie, do local e da forma. O modelo tradicional de projeto tende a não compreender as variáveis, por não se limitarem aos métodos necessários. A precisão geométrica é perfeitamente viável no processo projetual com a madeira, no

² FLUSSER, Vilém. *O mundo codificado: por uma filosofia do design e da comunicação*. São Paulo: Cosac Naify 2007.

³ KOWALTOVSKY, Doris C.C.K. et al(org). *O Processo de projeto em Arquitetura: da teoria à tecnologia*, São Paulo: Oficina de textos, 2011.

entanto o comportamento e o desempenho do material não são tão previsíveis como os outros produtos industrializados da cadeia construtiva. Se o detalhamento tem um papel relevante na qualificação dos bons projetos de arquitetura, na madeira a qualidade do detalhe pode significar a exequibilidade e a durabilidade da obra.

Da mesma forma que a tecnologia alterou significativamente a percepção da madeira por meio dos meios de fabricação engenheirados, as ferramentas e os processos de projeto também se beneficiaram de recursos digitais e analógicos que têm impacto na linguagem e na comunicação de ideias.

A representação gráfica bidimensional característica dos projetos de arquitetura é um código elaborado para a interdisciplinaridade, já que as disciplinas interagem sobre bases elaboradas em sequências formatadas para que a contribuição de cada uma interfira o mínimo possível sobre as outras. Semelhante modelo codificado alija não iniciados na compreensão dos projetos em sua totalidade e é característica da produção do século XX, quando houve a separação formal dos cursos de engenharia e arquitetura. A história, todavia, demonstra que outras formas de representação gráfica e o uso de recursos tridimensionais através de modelos universaliza a compreensão do projeto e reproduz com mais fidelidade o comportamento e o funcionamento dos projetos de forma geral.

Leonardo Da Vinci foi sem dúvida o retrato da Renascença e incorporou o espírito artístico e científico da época. Em seus apontamentos, encontram-se reproduções de ideias em que a representação gráfica se dá de forma natural em três dimensões, contendo todos os elementos necessários para a compreensão do objeto, seu dimensionamento e sua construção. A evolução da representação científica e técnica manteve a representação de elementos gráficos com sombreados naturalistas, adotada como norma por explicitar intenções projetuais claras e sensações que só podem ser compreendidos na íntegra graças a esses recursos.

Mesmo a produção brasileira valeu-se dessa forma de representação nas obras em madeira, basicamente porque a interlocução com os montadores especializados dá-se de forma muito mais eficiente com a representação tridimensional.

A emergência de produtos digitais de construção (modelagem), análise e fabricação elevou o grau de liberdade projetual a níveis de extrema sofisticação e velocidade, não sem um alto preço: a penosa curva de aprendizado e a dificuldade de compreensão dos recursos ilimitados de criação. Para as gerações mais velhas, parece impossível recuperar o tempo perdido e para as gerações mais novas lhes falta a experiência necessária para alimentar os aplicativos com os dados necessários.

Não se questionam aqui os valores do aprendizado por meio das ferramentas tradicionais de conceituação, mas advoga-se maior liberdade gráfica para expor claramente características únicas de projeto. Em algumas etapas, é imprescindível a utilização de códigos convencionais de representação, e os modelos tridimensionais aliados às ferramentas de visualização aproximam o público da linguagem arquitetônica, diminuindo a distância que separa o leigo do expert, tornando a prática e o ensino mais acessíveis.

Figura 2.3 *Codex Atlanticus*, Leonardo Da Vinci.
Fonte: © Veneranda Biblioteca Ambrosiana

Figura 2.4 *Cathedral of Santa Maria del Fiore*
Fillipo Brunelleschi. Fonte: Medium, arte,
Shubhashish Dev

Figura 2.5 House&Atelier Bow-wow. 2005.
Fonte: Graphic Anatomy Atelier bow-wow

As ferramentas digitais de modelagem e análise estão alterando o fluxo de projeto e trazendo uma experiência nova aos projetistas, esgarçando os limites entre as disciplinas de arquitetura e engenharia e provocando mudanças profundas no ensino e na prática. Ao arquiteto cabe agora antecipar o impacto da obra futura dentro do processo de criação e gerenciar o processo de projeto desde a criação até a fabricação. A pesquisa e o desenvolvimento, figuras típicas do processo industrial, começam a fazer parte do modelo de negócio dos grandes escritórios globais, que possuem vínculos estreitos com consultores de todas as áreas. Dentro da cadeia construtiva da madeira tal processo precisa ser acionado desde o primeiro momento criativo, estabelecendo os parâmetros que antecedem o fluxo de projeto regido pelo modelo de informação construtiva, o BIM (building information model). Aqui entra um discurso frequente nesta tese: o produto formal passa por variações ao longo do processo, que precisam ser ajustadas e, eventualmente, sugerirão caminhos não antecipados. É a estética do processo em curso.

Figura 2.6 Casa Hélio Olga,
Marcos Acayaba, 1987.
Fonte: acervo Helio Olga de Souza

2.2 Estética do processo

O projeto da residência Pio IX, elaborado pelo autor em 1996, ilustra de forma didática essa primeira aproximação, ainda que empírica, com o fluxo de projeto contemporâneo.

Antecedendo às premissas de implantação, havia uma determinante para todas as decisões de projeto: produção de lixo zero e sem descarte. As características do terreno em declive acentuado e solo estável sugeriam uma implantação descolada do solo, com fundações pontuais que eliminavam os instáveis muros de arrimo, permitiam tubulões sem necessidade de fôrmas, preservavam a permeabilidade do solo e facilitavam o acesso de materiais. A estrutura, em eucalipto de reflorestamento, era uma variável incógnita, sem referências confiáveis e recentes, cujo fornecimento determinava peças de no máximo 4m de comprimento e 12cm x 12cm de seção. A pré-fabricação era um pré-requisito para evitar as perdas em loco, e o próprio sistema estrutural deveria servir como andaime para a progressão da obra.

Os desenhos de produção foram elaborados a partir de croquis dimensionalmente ajustados e adaptados ao sistema produtivo de cada fornecedor, de estrutura, de fechamentos e de cobertura. Cada equipe trabalhou isoladamente, em sequência, sem a necessidade de uma infraestrutura local de hospedagem e guarda de material, evitando assim uma construção/abrigo temporário, tendo sido alugado somente um banheiro químico de apoio. Cada equipe foi gerida pela empresa responsável, sem a necessidade do emprego de mão de obra não qualificada, incluindo, aí, o recolhimento de impostos e encargos trabalhistas. Os desenhos iniciais foram produzidos manualmente, os da estrutura, com a utilização de aplicativos especializados e alguns detalhes resolvidos durante a execução da obra, dentro de parâmetros pré-estabelecidos. Muitos desenhos foram elaborados em modelos tridimensionais a pedido das equipes de montagem. A fim de facilitar o sequenciamento das instalações, foram feitos dois modelos construtivos em escalas diferentes, utilizando o próprio eucalipto, para avaliação das soluções adotadas.

Figura 2.7 Progressão do processo de projeto residência Pio IX.
Acervo: autor

Figura 2.8 Análise de deformações estruturais geradas pelo Karamba.
Fonte: autor

A primeira figura da estrutura é chamada "unifilar" e serve de guia para a interpretação, pelo algoritmo do *Karamba*, dos parâmetros nele inseridos representados pela imagem 2. Os parâmetros inseridos são referentes ao dimensionamento atribuído às linhas unifilares, que serão submetidos a parâmetros de carga vertical homogênea, amplificada 50 vezes. A deformação indica onde as cargas impostas provocam maiores impactos, e a superposição da figura 2 com a figura 3, deformada, permite que os ajustes estruturais possam ser comparados com o desenho anterior, como na figura 4.

Em processo análogo, um projeto elaborado pela Escola Politécnica de Lausanne descreve a metodologia aplicando apenas os recursos digitais disponíveis, em uma sequência lógica exemplar. A premissa é o componente mínimo, cuja geometria possibilita a extrusão da estrutura em apenas um sentido, mas produz uma forma razoavelmente rígida em todos os eixos, travada por tirantes horizontais junto ao solo.

A sequência **-Conceito > Elaboração formal > Protótipo em escala > Análise estrutural > Componentes > Fabricação > Montagem-** contempla os elementos essenciais aos projetos contemporâneos, incluindo fabricação e montagem. Importante notar que, em todo o percurso, as únicas representações bidimensionais são a apresentação do componente e o desenho de fabricação que, em última análise, é um código de instruções digital paramétrico, um algoritmo.

Figura 2.9 Imagens extraídas de École Polytechnique Fédérale de Lausanne
 Fonte: <https://www.epfl.ch/labs/ibois/projects/completed-projects/modular-timber-structure/>

Como experiência pessoal do autor, os quase trinta anos que separam suas primeiras incursões na pré-fabricação em madeira até o presente, ficou clara a necessidade de estabelecer um método de trabalho que acomode as variáveis orgânicas da matéria-prima e as recentes interpretações do impacto da construção civil no meio ambiente. Com ferramentas como as existentes hoje, é possível estabelecer um fluxo de projeto que considere um crescente número de variáveis, sem abdicar do direito e da necessidade de um projeto autoral e de formas significativas com comunicação de valores culturais.

2.3 Tempo da forma e do processo

Projetar é a única maneira de gerir o tempo⁴

O tempo manifesta-se de diversas formas ao longo do pensamento criativo e avança em infindáveis e intrincadas determinantes que podem resultar nas mais variadas soluções. Como nenhum processo resiste a tantas possibilidades, escolhas são feitas a partir de critérios ou premissas baseadas em hipóteses formais ou conceituais.

O tempo também se manifesta de forma mais semântica, quando se apresenta nas diversas leituras que temos para representar o próprio tempo. A velocidade (estações de trem e aeroportos), a contemporaneidade (o presente, o passado e o futuro), as estações do ano (a casa de verão e a casa de inverno), o distante e remoto, a contemplação e a atividade, todos representam noções de tempo e espaço que começam em Stonehenge e hoje permeiam as cidades futuristas da Ásia e Oriente Médio. Não cabe aqui uma exploração profunda dos mecanismos de escolhas semânticas, já que isso envolve uma digressão sobre estilos e outros valores com pouco peso sobre este trabalho, mas com as questões pragmáticas, associadas às premissas aqui contidas há de se fazer um parêntese antes das próximas etapas.

Um dos paradigmas que norteiam os processos construtivos que estão sendo desenvolvidos mundo afora diz respeito a velocidade de fabricação e montagem. Mais do que um fetiche capitalista de "tempo é dinheiro", a velocidade é uma forma concreta de redução de desperdício e energia, questões afeitas ao universo sustentável, que redundam em economia em todos os sentidos, inclusive o financeiro.

Tome-se um processo de concepção de uma obra contemporânea em madeira. Desde os rabiscos iniciais, o processo assume a dianteira nas decisões formais. Qual o comprimento ideal para transporte? Quantos funcionários são necessários para movimentar os componentes? Qual o melhor aproveitamento com o menor custo de componentes para fabricação? É possível combinar duas ou mais tecnologias para viabilizar a construção? Pode ser feita por um único fornecedor ou será necessária a combinação de fabricantes?

Essas perguntas típicas determinam o componente preponderante na montagem do edifício. Note-se que a palavra usada aqui é montagem, e não construção. É presumível que em um curto espaço de tempo as construtoras se tornem montadoras e gerenciadoras de processos e de fornecedores de componentes, seguindo o modelo industrial da linha de montagem da indústria automobilística. Os componentes são produzidos em fabricantes externos, seguindo normas de projeto específico, integram todos os elementos necessários à montagem e reduzem ao máximo a quantidade de interfaces necessárias à montagem pela gerenciadora/montadora. Um painel de um automóvel integra todos os velocímetros, equipamentos de entretenimento, ar condicionado, air bags, porta luvas, iluminação, ignição, direção, caixa de fusíveis e

Figura 2.10 Stonehenge, Inglaterra.
Foto: autor

Figura 2.11 Brock Commons, Vancouver,
Acton Ostry Architects. 2017.
Fonte: naturallywood.com

⁴ STILEINDUSTRIA, Design research Journal, Italia, EditorialeDomus, Março 1996

outros itens necessários ao funcionamento do conjunto. À montadora caberá somente a fixação de meia dúzia de parafusos e acoplamento de contatos elétricos e ar condicionado. Uma operação que era feita em 20 ou 30 etapas reduz-se a duas operações de poucos minutos. Hoje, um tijolo de alvenaria tem seis interfaces, portanto seis possibilidades de erro humano, já que não possui guias e gabaritos de montagem que facilitem a mão de obra de construção.

Todos os fatores são considerados na equação do desenho contemporâneo de uma construção, entretanto isso não significa uma redução do papel do arquiteto na concepção de uma linguagem estética, assim como os carros não são iguais apesar de utilizarem o mesmo processo e, em muitos casos, os mesmos fornecedores e fabricantes de componentes.

Esses conceitos foram delineados claramente pelos autores Stephen Kieran e James Timberlake no livro *Refabricating architecture*⁵, de 2003, que utiliza justamente a analogia da indústria automobilística e tece comparações com a arquitetura de Le Corbusier e sua "máquina de morar". O texto enumera componentes complexos como banheiros e cozinhas vistos não como ambientes, mas kits prontos para uso em edificações planejadas para isso. Na transição entre construção e montagem, os conflitos são maiores do que os sucessos pela falta de sintonia entre projeto, fabricação e montagem. Se na construção civil os parâmetros de tolerância estavam na casa dos centímetros, na montagem os parâmetros são os milímetros. Tudo se traduz em tempo.

Como visto anteriormente, a evolução dos programas de desenho e análise permite antecipar conflitos e facilitar a troca de informações entre os participantes do projeto em qualquer momento, em tempo real, afetando toda a cadeia construtiva e os valores considerados. A importância do tempo no conceito dos projetos e no produto final é tão grande que, em muitos casos, a construção e os componentes agregados chegam ao gaveteiro repleto de talheres e toalhas dos banheiros, pois a concentração de entregas em um único ponto economiza transporte, **gasto energético** e facilita a logística contábil da entrega.

Se "tempo é dinheiro" foi o paradigma do século XX, em um momento crucial para a espécie humana, como o atual, "tempo é energia" corresponde melhor aos valores pelos quais trabalhamos e as metas que precisamos atingir.

Figura 2.12. *System3*, MoMA, New York
Oskar Leo Kaufmann und Albert Rűf, 2008
Fotos: Adolf Bereuter
Diagramas: OLK/Rűf

⁵ KIERAN Stephan, TIMBERLAKE James, *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*, New York, McGraw Hill, 200.

Um **projeto** de arquitetura e construção convencional tipicamente corresponde a 30% do tempo total de uma obra cuja duração média é de 2 anos. Nos 70% correspondentes à **construção**, esse modelo resulta em 30% de desperdício em matérias primas variadas, devido ao mau planejamento e a má gestão de processos. Dentro de uma nova realidade industrial que permeia todas as disciplinas e exige uma colaboração intensiva, a chamada indústria 4.0, a inversão dessa equação passa a fazer mais sentido, onde 70% do tempo é investido em projetos, processos e fabricação, restando 30% para uma montagem planejada e sem desperdícios.

O diagrama abaixo, elaborado pelo arquiteto Hermann Kaufmann, mostra o comparativo entre uma obra em madeira cuja produção adota o modelo convencional e uma obra em madeira com um fluxo de trabalho cooperativo, onde a participação dos envolvidos ocorre mais cedo, reduzindo drasticamente a necessidade de redesenho e compatibilização de projetos (KAUFMANN) 2018)⁶.

Figura 2.13. Equipe técnica de projeto em Foster+Partners
Fonte: Toolkit, Diogo Brito

Processo similar ocorre com a maioria dos grandes escritórios globais de arquitetura que trabalham com modelos de produção similares e já possuem equipes multidisciplinares desde o início da concepção, mantendo controle e responsabilidade ao longo de todo o processo, até o final da obra.

A ruptura com o modelo convencional de produção e projeto é condição obrigatória para fazer frente aos desafios da implantação de uma cadeia construtiva responsável, capaz de atender às demandas de moradias e obras públicas de forma exponencial, com redução de energia, desperdício e boa qualidade construtiva.

6 KAUFMANN, H.; KRÖTSCH, S.; WINTER, S. *Manual of Multi-Storey Timber Construction*. Detail Business Information, Munich, 2018.

3 Compreendendo a forma

3.1 Desejo da forma

Embora a tese central deste trabalho gire em torno do uso da madeira como veículo de metodologia projetual, é preciso discutir antes a necessidade e o desejo da exploração formal como elemento de construção de uma linguagem arquitetônica, independentemente de sua materialidade. A presunção da forma é fundamental para a consequente aplicabilidade do material e para escolha da tecnologia adequada.

Em primeiro lugar, é necessário que a exploração formal seja desejável. Semelhante constatação óbvia não é tão simplista assim, uma vez que os dogmas de linguagem e a cultura tendem a interpor-se entre o resultado e o desejo formal.

Em depoimento recente, o arquiteto dinamarquês Bjarke Ingels (BIG – Bjarke Ingels Group) cita como motivação para sua pesquisa formal a estagnação em que a outrora inventiva arquitetura dinamarquesa se encontrava¹.

O desejo pela busca formal é ancestral e remete às primeiras construções humanas, erguidas em um momento em que a humanidade passou a entender conceitos básicos de estabilidade estrutural e controle da materialidade e a associar essas noções a valores abstratos menos tangíveis. A função da forma aborda questões que vão muito além da tecnologia e do uso objetivo das edificações, então é natural que a discussão avance igualmente sobre o território.

Desde a emergência do período moderno da produção arquitetônica, a supressão do ornamento e a busca por uma expressão estrutural verdadeira formularam teorias e correntes dogmáticas que frequentemente se contradiziam, embora revelassem proximidade inequívoca. A “Forma segue a função”, expressão icônica que traduz o espírito moderno, nasceu de um arquiteto, Louis Sullivan, cuja visão compreendia uma integração entre o papel social e cultural da arquitetura. Segundo ele, “diferentes construções associam materiais diferentes, que incluem todas as coisas orgânicas e inorgânicas, todas as coisas físicas e metafísicas, todas as coisas humanas e super-humanas e todas as verdadeiras manifestações da mente, do coração e da alma”². Tal manifesto permeou mais de um século de produção arquitetônica, alimentando dogmas que nunca compreenderam a verdadeira natureza conciliatória dessa visão tão generosa. A forma segue um emaranhado de valores culturais e o consenso que muitos teóricos da arquitetura, a despeito de suas diferenças, têm como base:

Em primeiro lugar, que as sociedades são definidas por culturas unitárias; em segundo, que as formas físicas são precedidas por um princípio fundamental ou causa, uma causa de origem objetiva ou subjetiva –a forma como as coisas são construídas

Figura 3.1 Construções típicas em Copenhagen.
Fonte: urbanitarian.com

Figura 3.2 *The Mountain*, BIG, Copenhagen, 2008.
Fonte: www.big.dk/#projects

¹ "The Art of Design", episódio 4, BjarkeIngels: Architecture, 2017. Netflix.

² SULLIVAN, Louis H., *The Tall Building Artistically Considered*, Lippincot's Magazine 57 (março 1896), MIT, Domínio público

e usadas ou da maneira como são percebidas– mas nunca pelas duas simultaneamente; e, em terceiro, que a forma incorpora ou responde a um único significado ideal, identidade ou possibilidade.(MOUSSAVI,2009)³

A rapidez com que as culturas e, conseqüentemente as cidades, mudaram em função do acelerado crescimento demográfico fez com que os arquitetos respondessem a essas demandas de maneiras diferentes, moldando a arquitetura e os processos segundo suas conveniências locais. No entanto, a cultura urbana hoje está longe de ser considerada homogênea ou universal, e as cidades acumulam camadas de valores culturais de enorme complexidade para respostas simples e repetitivas. Para representar a realidade, a arquitetura não pode apoiar-se em valores culturais simplistas ou binários, ela tem de variar conforme a pluralidade e a mutabilidade da própria realidade em que se insere.

A dicotomia entre cultura e forma é tão antiga quanto a cultura ocidental. A forma é inerente ao processo construtivo e ao pensamento moderno, imbuída de valores muitas vezes contraditórios, sempre em busca de uma relevância funcional e uma expressão linguística. Nesse arcabouço, arte e técnica tornam-se instrumentos culturais e ideológicos com enorme impacto na linguagem e nos processos, provocando uma renúncia ao aprendizado natural e à autenticidade.

Aristóteles via nos objetos materiais, compostos por matéria (passiva) e forma (ativa), a expressão da realidade, ou seja, expressão ou sentido residem dentro da forma, antes mesmo da matéria. Na década de 1980, Peter Eisenman sugeriu uma “autonomia da forma” como um índice mediador entre as formas existentes e a cultura. Essa ideia permitiria que os arquitetos pudessem descolar-se das formas pré-existentes, livres de um julgamento de valor ou gosto. Mies Van Der Rohe não via, como aponta Michael Hayes (1984)⁴, a arquitetura como sendo um instrumento da cultura nem uma forma autônoma, mas uma terceira via em que ela opera de forma autônoma, entre a cultura e a forma, como mediadora. A questão, ainda segundo Hayes, é que a forma é, *a priori*, um princípio abstrato que dá expressão e significado à matéria e conseqüentemente à cultura. A produção moderna derivou para objetos que ora representavam a forma como um objeto físico, independente do contexto e uso, ora como objetos de uso, independente da forma como foram produzidos.

A arquitetura é tanto causa como consequência da produção cultural, na medida em que representa um sentimento da época ou quando causa um sentimento a partir de sua própria natureza.

Vitruvius definia a arquitetura pela tríade *firmitas* (que se refere à estabilidade, ao caráter construtivo da arquitetura), *utilitas* (que originalmente se refere à ideia

3 MOUSSAVI, Farshid, The Function of Form. Barcelona, Harvard University School of Design e Actar, 2009, p.7.

4 HAYES, K. Michael, Critical Architecture: Between Culture and Form, Perspecta 21: The Yale Architectural Journal, 1984.

de comodidade e, ao longo da história, foi associada à função e ao utilitarismo) e *venustas* (associada à beleza e à apreciação estética). Essas definições ainda hoje fazem sentido à luz de conceitos modernos como tipologia, função e tectônica.

A tipologia é frequentemente associada à função ou ao caráter estrutural do edifício (tectônica) e tende a transformar-se em um catálogo formal de soluções de composição arquitetônica, uma espécie de estrutura profunda na linguagem arquitetônica. A tipologia, se entendida como ordem, é também um fator inibidor, na medida em que media soluções para adequá-las a materialidades e processos preconcebidos, resultando na falta de comunicação de significados. Segundo Kate Nesbitt, “a comunicação de significado também é parte do “tipo” devido à redundância nele da forma, seja enquanto repetição de formas básicas, seja de elementos invariantes (arquétipos)” (NESBITT 2006)⁵. Giulio Carlo Argan (1909-1992) defende uma vaguidade ou generalidade da tipologia como o resultado da sobreposição de modelos de referência, ou seja, a tipologia não provém de uma única forma, mas da soma de formas similares nas quais são eliminadas as características particulares de cada edificação. O tipo básico resultante deve ser entendido “como um princípio que contém a possibilidade de infinitas variações formais e modificações estruturais do tipo”, um ponto de partida, não de chegada. O passado, origem dos modelos tipológicos, não pode condicionar a criação do presente, mas é “essencial reclamar o direito a conhecer toda a experiência acumulada do passado para sermos capazes de imaginar formas que se mantenham válidas no futuro”.(NESBITT, 2006)⁶

A abordagem intuitiva formal não leva em conta a metodologia científica, com investigação de causa e efeito a partir de pressupostos. Ela se insere na tradição modernista tardia, em que os valores são puramente estéticos e se retroalimentam disso continuamente.

Se o objetivo é a forma como expressão de valores, a simbologia pode ser preconcebida ou ressignificada *a posteriori*, entretanto seu valor como ícone não muda. Todo artefato humano tem o poder de transformar-se em ícone, independentemente de sua motivação ou vocação original. Os arquitetos que apregoam as virtudes da tecnologia tendem a atribuir valor icônico a esses produtos em um nível de veneração incompatível com valores ambientais e científicos.⁷ O valor icônico é dado pelo contexto cultural associado ao sentimento humano, o que traz novamente a questão do valor simbólico dos objetos e sua compatibilidade com o *zeitgeist*. Colquhoun cita E.M. Gombrich (*Meditações sobre um cavaleiro de pau*), o qual afirma que as formas em si são relativamente vazias de sentido e é o inconsciente que atribui associações de sentido.

5 NESBITT, Kate. *Uma nova agenda para a arquitetura: Antologia teórica 1965 – 1995*. São Paulo: Cosac Naify, 2006. p.51

6 NESBITT, Kate. Argan: Sobre a tipologia em arquitetura, in *Uma nova agenda para a arquitetura: Antologia teórica 1965 – 1995*, São Paulo: Cosac Naify, 206. p270.

7 NESBITT, Kate. Alain Colquhoun: Tipologia e metodologia de projeto, in *Uma nova agenda para a arquitetura*. p.277

Pela sua materialidade evidente, a arquitetura ocupa um espaço visual proeminente entre as artes, todavia há quem duvide de seu papel como linguagem. Seu papel como signo depende dos atributos formais para que seu significado seja compreendido e de um acordo cultural que a valide. Na medida em que o significante – o edifício – não estabelece sentido, não se completa simbolicamente. Existem obstáculos para que o sentido não se realize e, segundo Agrest e Grandel-sonas, a responsabilidade é atribuída à ideologia (AGREST, 2006)⁸, vista pelos autores como a teoria adaptada ao meio, fruto da ingerência das formações sociais e da manutenção das instituições. Ela opõe-se à “teoria pura”, sem obstáculos ao verdadeiro conhecimento, talvez um paralelo com a “pesquisa pura”, em oposição à “pesquisa aplicada”, responsável pelos grandes saltos científicos e culturais do passado recente. Em teoria, todos os edifícios são portadores de significados, e os que não os possuem falham na comunicação ou na falta de atributos contratados socialmente. Ao falar-se em olhar para o passado para vislumbrar um futuro, tem-se de aprender a ler e dominar o significado das decisões de projeto e dominá-lo como linguagem, portanto como uma ferramenta de comunicação.

Não existe de fato uma dissociação entre forma e sentido, significado e significante, que constituem o signo. São indissolúveis. As teorias que afirmam que o projeto moderno era destituído ostensivamente de valores subjetivos falham ao reconhecer que as mudanças sociais e culturais atribuíram sentidos ao longo do tempo, fora do controle de seus autores. Esse corolário de sensações foi extensivamente recolhido, pesquisado e mapeado por inúmeros trabalhos nos últimos anos e para o presente projeto é suficiente saber que todo espaço ou edificação (significante) provoca sentidos (significados), além da esfera da pretensão de seus criadores. Na construção da convenção, arbitram-se significados formais (a língua arbitra uma palavra para designar um sentido, mas é o som que determina uma impressão marcante, segundo o linguista suíço Ferdinand de Saussure, 1857 - 1913), todavia é o uso constante e a apropriação coletiva que vão dar sentido e identidade às formas. Embora neste capítulo o foco nos materiais tenha menor relevância, é importante situar sua presença nas abordagens fenomenológicas, as quais abrangem a consciência e seus objetos.

A fenomenologia, definida inicialmente por Edmund Husserl (1859-1938), posteriormente expandida por outros autores como Maurice Merleau Ponty (1908-1961) e Christian Norberg-Schulz (1926-2000), interpreta a demarcação do lugar como o ato arquetípico da construção e a verdadeira origem da arquitetura. Além da ênfase no lugar, a tectônica tem grande relevância porque, segundo Schulz, o detalhe explica o ambiente e manifesta sua qualidade peculiar”.⁹ Dentro dessa visão, “qualidade ambiental” é definida por um conjunto de valores muito amplo, o qual tem diferentes significados para diferentes usuários. O sentido “funcional” é

8 AGREST, Diana, *Semiótica e arquitetura*, in *Uma nova agenda para a arquitetura*. p.130

9 NORBERG-SCHULZ, Christian. *O fenômeno do lugar*, in *Uma nova agenda para a arquitetura*. p.443

limitante quando as necessidades não se baseiam apenas em critérios funcionais analíticos mas em dados culturais e de vivência, um retorno às coisas mais mundanas. Definir o “espaço” funcional e o “caráter” atmosférico aponta para uma visão mais holística e interdependente entre esses aspectos e borra as demarcações teóricas empregadas pelo pensamento moderno. Embora “espaço” aponte para uma tridimensionalidade, é o “caráter” que melhor concretiza os valores expostos pelo conjunto arquitetônico.

Materialidade, luz, cores e formas definem valores como “protetor”, “solene”, “prático”, que transcendem os contratos sociais e os significados semióticos e universalizam a linguagem. Resgatar os valores perdidos ao longo da recente intervenção no planeta é a senda a ser trilhada, e isso inclui a liberdade de escolha formal e a materialização dentro de valores ambientais saudáveis. Como nota Juhani Pallasmaa¹⁰, avaliando o empobrecimento do significado intrínseco da arquitetura, tanto a pobreza formal quanto o excesso vazio e o abstrato intelectualizado contribuem para esse fenômeno.

A forma, como entendida hoje, não pode mais ser pensada apenas como o invólucro, o conceito do “galpão decorado” de Robert Venturi. Ela é interior e exterior, estrutura, conexões e pele, como em um corpo biológico em que todos os elementos agem de forma integrada e são interdependentes. O esqueleto é uma referência como analogia para as estruturas, e a biologia está representada em muitas construções, desde as temporárias tendas beduínas até as sofisticadas membranas tensionadas de Frei Otto. O termo “exoesqueleto” (literalmente “esqueleto externo/exterior”), cada vez mais frequente no vocabulário arquitetônico, tem em sua descrição biológica a melhor definição da arquitetura holística procurada pelo mundo contemporâneo: uma película resistente porém flexível, que cobre o corpo de muitos animais e protistas (organismos que não pertencem nem ao reino animal nem ao vegetal), e fornece proteção aos órgãos internos e suporte para os músculos, evitando também a perda de água.

O *exoesqueleto* ou *exoestrutura* cria uma continuidade superficial e tectônica, analisada adiante, mas, por ora, verifica-se sua presença ilustrativa em duas obras em que essa condição se revela claramente: a torre John Hancock Center, em Chicago (SOM, 1968), e a residência Hélió Olga, em São Paulo (Marcos Acayaba, 1990). Isso leva a entender o papel que cada uma dessas camadas tem na determinação da forma, tanto *a priori*, de forma preconcebida, quanto *a posteriori*, quando o processo leva ao produto final e carrega um aprendizado incorporado.

A estrutura precisa ser compreendida no sentido tectônico da palavra, como explicita o crítico Kenneth Frampton:¹¹

10 PALLASMAA, Juhani. , in Uma nova agenda para a arquitetura. p.483.

11 FRAMPTON, Kenneth. Rappel à l’ordre, Argumentos em favor da Tectônica, in Uma nova agenda para a arquitetura. p.561.

Figura 3.3. John Hancock Center, SOM, Chicago, 1965.
Fonte: www.som.com

Figura 3.4. Residência Helio Olga, Marcos Acayaba, São Paulo, 1990.
Foto: autor

Figura 3.5. *Hangar Orvieto*
P.L. Nervi, Torino, (1947-54).
Foto: cc

Figura 3.6. *Kimbell Art Museum*,
L. Kahn, Fort Worth, 1972
Foto: autor.

“Proveniente do grego, a palavra tectônica deriva de *tektonikós*, que significa carpinteiro ou construtor. Esta, por sua vez, provém do sânscrito *takasan*, que se refere ao ofício da carpintaria e ao uso do machado. Esse significado sofre uma evolução posterior, assumindo uma noção mais genérica de construção e, por fim, o termo latino *architectus* deriva do grego *archi* (pessoa que tem o poder de comando) e *tékton* (um artesão ou construtor)”.

Embora Frampton defenda que a essência da construção é mais *ontológica* do que *representacional*, isto é, mais “coisa” e menos “signo”, não há como separar as duas visões, uma vez que a percepção não está sujeita a controles rígidos de leitura. Em sua defesa, Frampton entende que o sentido de “tectônica” é amplo e precisa ser fragmentado para cobrir esse espectro e identifica três condições distintas: o *objeto tecnológico* (um instrumento de viabilização), o *objeto cenográfico* (alude a um elemento ausente ou escondido) e o *objeto tectônico*, visto por ele tanto como um *objeto técnico-estrutural*, como um *símbolo-estrutural*.

Se a arquitetura moderna buscou na depuração formal um reducionismo que favorecia os processos industriais, em grande parte ela anulou a poética inerente à ideia simbólica da estrutura como objeto narrativo das construções. Não é o caso de obras como as de Pier Luigi Nervi ou mesmo a produção de Renzo Piano ou Louis Kahn, em que o discurso estrutural e o espaço resultante dialogam harmonicamente e se completam, sem abandonar sua contemporaneidade ou seu caráter funcional, pilares do modernismo. Não se mencionam também Viollet-le-Duc ou Eiffel por uma questão de linguagem, mas é reconhecida sua influência em toda a arquitetura posterior do século XX. Importante citar Frampton para entender o papel da materialidade nas decisões formais e sua relevância nos conceitos estruturais:

Semper dividiu a forma construída em dois procedimentos materiais separados: a tectônica da estrutura, em que elementos de comprimentos variados são combinados para abarcar um campo espacial, e a *estereotômica* da massa comprimida que, embora possa incluir o espaço, é constituída pelo empilhamento de unidades idênticas. No primeiro caso, o material normalmente usado ao longo da história é a madeira ou seus equivalentes como o bambu. No segundo caso, um dos materiais mais comuns é o tijolo, ou os equivalentes aptos à compressão, como a rocha, a pedra ou a terra prensada e, mais tarde, o concreto armado.¹²

Enquanto os materiais do primeiro caso tendem para o aéreo, o imaterial, no segundo, tendem para a escuridão do subsolo, a materialidade da massa, e geram opostos gravitacionais e de linguagem/função.

Outro elemento tectônico primordial é a junção, a articulação, o que leva de volta às questões antropomórficas do esqueleto. Frampton cita filósofos como Schelling e arquitetos como Bötticher, que entendiam que “o inorgânico não tinha nenhum sig-

¹² idem, P561 – Gottfried Semper (1803-1879).

nificado simbólico e, por isso, a forma estrutural somente podia adquirir valor simbólico por sua capacidade de engendrar analogias entre a forma orgânica e a tectônica”.¹³

O nó, a ligação, denota a capacidade de unir elementos flexíveis ou estáticos, que Semper classificava como o elemento básico da arte de construir. Há uma grande preocupação entre alguns dos arquitetos cuja produção marcou o século XX, como Frank Lloyd Wright e Louis Khan, na exposição das juntas, que, na visão deles, assegurava a integridade da existência da forma total e não apenas da estrutura. Na arquitetura oriental, em cuja materialidade a madeira encontra protagonismo, a junção sempre foi a essência da qual nascem os projetos. Uma expressão contemporânea desse pragmatismo são os escritórios da Tamedia, em Zürich, de Shigeru Ban, de 2014. Se a junta aparece de forma explícita ligando segmentos nas estruturas tradicionais, é no trabalho de Jørn Utzon ou Eladio Deste que essa conexão se dá por meio da transição entre o terreno e a própria estrutura/cobertura/concha.

Seguindo esse raciocínio, chega-se à pele, vista aqui não como revestimento, mas como continuidade estrutural, quando não a própria estrutura. A arquitetura contemporânea repousa firmemente na tecnologia e, por meio dela, pode-se evoluir formalmente e tectonicamente sem um descompasso simbólico. Nos exemplos de Utzon e Khan, semelhante continuidade ambivalente entre pele e estrutura reflete bem o pensamento de Greg Lynn¹⁴ e do movimento conhecido como *folding*, ou dobramento.

Com o questionamento do movimento moderno e o consequente desdobramento no pós-modernismo e no desconstrutivismo, a exposição das contradições internas da arquitetura e das inúmeras complexidades decorrentes dessa leitura levou a uma busca por caminhos que pudessem hospedar e absorver ambivalências. As soluções dobradas ou maleáveis encontram paralelo na cultura gastronômica, que entende que as misturas de componentes podem resultar em continuidade homogênea, mesmo que a massa seja heterogênea em sua composição. Disso resultam atributos como fluidez, viscosidade e maleabilidade, presentes na cultura arquitetônica, no entanto sem a função *a priori* de acomodar velhas contradições.

A continuidade superficial integrada à estrutura não é nova e nem estranha ao modernismo. Vide o terminal TWA de Eero Saarinen ou mesmo boa parte da obra de Oscar Niemeyer. Em construções mais recentes, o Centro Pompidou em Metz, de Shigeru Ban ou o Mercat Santa Caterina em Barcelona, do EMBT, fazem uso da continuidade dobrada para abrigar atividades díspares e contraditórias em uma malha fluída em que a permeabilidade interna funde-se com a permeabilidade externa e expande, assim, a continuidade.

¹³ Idem, P563.

¹⁴ LYNN, Greg. Curvilinearidade arquitetônica: O dobrado (folded), o maleável (pliant) e o flexível (supple). O campo ampliado da arquitetura p29-51.

Figura 3.7. *Tamedia office building*, Shigeru Ban, Zurich, 2014. Foto: autor

Figura 3.8. *Bagsværd Church*, Jørn Utzon, Copenhagen (1968-76). Foto: cc.

Figura 3.9. *Capela Atlântida*, Eladio Dieste, Atlântida, Uruguai, 1958. Foto: cc.

Figura 3.10. Terminal TWA, Eero Saarinen, EUA, 1962. Foto: Mikiko Kutayama.

Figura 3.11. Museu Pompidou, Metz, Shigeru Ban, 2010. Foto: autor

Figura 3.12. *The Topographical Domains of Thom's Catastrophe Theory*, 2010.
 Fonte: Cartographies Of Catastrophe And Competency:is In The London Ambulance Service (Las)

Figura 3.13. *Cloud Gate*, Anish Kapoor, Chicago, 2006.
 Foto autor

Figura 3.14. *Diagrama*: Jones, J. (2010).
 Fonte: Learning Center Features Open Design.
 Civil Engineering, 80(5), 20-26.

Segundo Lynn, os diagramas do matemático René Thom, criador de uma Teoria da catástrofe, influenciaram o trabalho de vários arquitetos desconstrutivistas, incluindo o Rebstock Park de Peter Einsenman. A matemática anexata (não exata na essência, irreduzível, em oposição ao inexato, causado por acidente) gerada por esse conceito produz formas que não vão repetir-se, expansíveis ao infinito e sujeitas a forças externas muito diferentes das complexidades e das contradições geradas pelos espaços internos do modelo moderno.

Talvez o modelo de superficialidade dimensional contínuo por excelência seja a escultura *Cloud Gate*, de Anish Kapoor, no Millenium Park de Chicago, onde exterior e interior se fundem em um plano contínuo e infinito, ampliando o espaço e criando lógica espacial própria, a ponto de gerar encontros que só se realizam naquele plano. A escultura contém o próprio universo, porém nada contém: é a evidência da contradição proposta pelo objeto.

Os japoneses fazem um bom uso do contínuo e do vazio, pois em sua cultura "ma" é um conceito de espaço e tempo, ou o intervalo entre duas ações ou eventos, ou também um vazio espacial. A duração de tal espaço pode ser lazer, quietude, gentileza ou descanso. "Ma" pode ser tanto distância no tempo, como o próprio tempo. Estes dois conceitos (espaço e tempo) são concebidos como intervalos, e isso se reflete na arquitetura como o espaço entre a construção principal e a casa de chá, ou um átrio antes da entrada principal, onde o visitante se despe de sua autonomia e se dobra ao anfitrião. Essa expansão espacial funde-se com o exterior e conecta a cidade e o edifício em uma continuidade presente na arquitetura modernista corbusiana, entretanto nunca totalmente realizada em sua obra, porque não costura de fato o tecido urbano. Embora Ryue Nishisava tenha dito, em entrevista em 2000 (ZAERA-POLO, 2016)¹⁵, que a ortogonalidade presente em sua obra fosse decorrente das limitações dos materiais construtivos, em obras posteriores como no projeto do Rolex Learning Centre, em Lausanne, Suíça (2010), feito pelo Sanaa, o espaço "Ma" e a continuidade superficial explorada fazem com que a simbologia alcance patamares muito além do queijo *emmental* sugerido por sua planta.

Sua estrutura combina o concreto na base e a madeira na cobertura, em uma tectônica singular e em perfeita sintonia com a oposição gravitacional sugerida por Frampton. Suas aberturas verticais e horizontais fundem espaços internos com externos, gerando encontros e dissolvendo a malha estrutural em um *continuum* homogêneo, ondulado, independente das atividades heterogêneas contidas.

¹⁵ ZAERA-POLO, Alejandro. *Arquitetura em diálogo*. São Paulo, Ubu, 2016 p.336

3.2 Busca pela forma

Arquétipo:

- (grego *ἀρχή* - *arché*: principal ou princípio e *τύπος* - *tipós*: impressão, marca); é o primeiro modelo ou imagem de alguma coisa, antigas impressões sobre algo. É um conceito explorado em diversos campos de estudo, como Filosofia, Psicologia e Narratologia.
- Segundo Carl Gustav Jung (1875-1961), os arquétipos são conjuntos de “imagens primordiais” originadas de uma repetição progressiva de uma mesma experiência durante muitas gerações, armazenadas no inconsciente coletivo.

Arquétipos formais estão presentes em qualquer obra que derive de um conjunto de experiências anteriores e que estabeleça um diálogo com a comunidade a que se dirige. Se a reprodução de um ícone soa caricata e profana, as vertentes que o geram são mais universais e coletivas e, portanto, passíveis de apropriação. Montaner vê na Opera House de Sydney, de Utzon, ecos da cultura escandinava de sua formação, assim como em toda a obra de Saarinen e Aalto. Mitos escandinavos ancestrais são capazes de acender o inconsciente coletivo de comunidades ao redor do mundo, uma vez que os muitos elementos que os formataram estão presentes em praticamente todas as culturas, do Arco de Saint Louis aos templos balineses.

Frank Lloyd Wright encontrou atributos na cultura japonesa que fazem todo o sentido na pragmática cultura norte-americana, sem abrir mão de valores locais. Sua Robie House (1910) empresta a horizontalidade das planícies do Meio-Oeste americano, a intimidade sutil dos espaços japoneses e a crescente engenharia naval que permitiu aventuras em balanços surpreendentes a qualquer tempo. Ofender o inconsciente coletivo é um curto caminho para a obsolescência de qualquer projeto, seja na escala que for. O projeto moderno corbusiano, enquanto foca corretamente no coletivo com um plano térreo infinito e moradias práticas e homogêneas, erra ao não levar em conta a heterogeneidade do universo de usuários e a crescente densidade dos centros urbanos.

A redução dos arquétipos formais a princípios arquetípicos formais, uma das metas deste trabalho necessita para sua viabilidade de um campo experimental restrito. Não existem razões para um mergulho profundo na simbologia dos espaços, mas sim do sentido tectônico proposto por Frampton, do objeto técnico-estrutural e do símbolo-estrutural. É na força narrativa da estrutura –aqui em sua estrutura integrada, com a soma dos elementos que a compõem e suas infinitas possibilidades de configuração– que esta pesquisa deposita seu foco, e na seleção de princípios arquetípicos que possam abrir espaço para o desenvolvimento de múltiplas linguagens. É no ponto de partida projetual que o método precisa operar com sua maior eficiência, dando liberdade para que o processo induza a múltiplas soluções de chegada.

Figura 3.15. *Robie House*, Frank Lloyd Wright, Chicago, 1908-10, Fonte: www.architectmagazine.com

Figura 3.16. *Gateway arch*, Eero Saarinen, Saint Louis, 1965, Fonte: Bev Sykes

3.3 Princípios formais

Analizando alguns estudos sobre os princípios formais, deduz-se que se pode reduzir o universo a alguns princípios capazes de incorporar a maioria das possibilidades investigativas.

Do trabalho de Farshid Moussavi, *The Function of Form*, tira-se o mapeamento que a autora faz dos sistemas estruturais, seus desdobramentos e seus efeitos, e pode-se interpretá-lo nos capítulos vindouros, à luz das tecnologias desenvolvidas especificamente para a madeira.

Segundo Moussavi, as principais diferenças entre os conhecidos sistemas estruturais, em qualquer tempo, são as seguintes:

a. Grelhas e molduras. Basicamente a repetição de elementos geométricos em qualquer sentido de empilhamento, extrusão, tesselação (*tessellation*¹⁶ no original) e rotação. São compostas por segmentos lineares que distribuem cargas em um padrão linear. Molduras são compostas por pilares e vigas na forma de portais, que produzem direções para a distribuição das cargas.

b. Arcos e abóbadas. Sistemas estruturais compostos por vigas arqueadas e elementos superficiais de ligação que distribuem cargas sobre as vigas e os planos, e têm sua maior eficiência quando resistem a cargas distribuídas homogeneamente. Variam de acordo com a distribuição e o posicionamento das colunas e dos arcos, e a quantidade de subdivisões nas superfícies intermediárias.

c. Cúpulas. São compostas por superfícies ou por superfícies com vigas que distribuem cargas no plano superficial ou nas vigas. Cúpulas sem vigas resistem bem a cargas homogeneamente distribuídas, enquanto cúpulas com vigas têm maior capacidade para resistir a cargas assimétricas.

d. Placas dobradas. Distribuem cargas através das superfícies e pelos vincos entre as dobras, nas três dimensões, produzindo estruturas compostas pelos vincos lineares e pelas superfícies. Podem ser elaboradas também com tesouras revestidas, cujo comportamento é similar, com menos peso

e. Cascas. São sistemas de superfícies que distribuem cargas sobre planos variáveis e têm seu melhor desempenho com cargas homogeneamente distribuídas.

f. Membranas tensionadas. Variam em tipos de acordo com a distribuição de cargas sobre a quantidade de eixos que formam os grupos poste/cabo/membrana.

O trabalho de Moussavi lista ainda as membranas pneumáticas, não consideradas aqui porque não são representativas dentro da metodologia almejada para o projeto.

¹⁶ Nota do autor: *Tessellation*: derivado de uma expressão gráfica matemática, exprime o recobrimento de uma superfície bidimensional, tendo, como unidades básicas polígonos, congruentes ou não, sem que existam espaços entre eles, gerando um plano contínuo. A autora adota o termo para exprimir a expansão contínua, em qualquer sentido, de uma forma básica.

Todos os sistemas acima são ainda classificados em subgrupos, de acordo com a tecnologia e o desenho adotados e geram inúmeros desdobramentos formais.

Na metodologia aplicada ao trabalho, Moussavi elencou as classes estruturais que foram subdivididas em subclasses, então expandidas nos três eixos (tesselladas) para cobrir o maior número possível de possibilidades. Existem estudos de casos construídos, entretanto a maior parte é especulativa, resultado da pesquisa do grupo envolvido.

A partir desse conjunto, a autora elaborou uma matriz em que cruza as muitas possibilidades de cada sistema com os subsistemas, as formas de expansão horizontal, vertical e rotacional, as alternativas dentro dessa expansão e, finalmente, como esse resultado afeta o conjunto e a percepção gerados. Esse trabalho hercúleo, feito por um grupo de alunos, pesquisadores e professores de alguns países, resultou em 176 estudos diretos, com exemplos que cobrem a maior parte da produção arquitetônica ocidental. Pode-se especular sobre a abrangência e a falta de modelos orientais, especialmente japoneses, todavia é provável que se enquadrem nos modelos pesquisados pelo grupo. Não há ênfase no material, embora os textos façam referência, na maioria dos casos, ao concreto armado e ao aço, com pouquíssimas referências à madeira.

Figura 3.17. Reprodução do livro *The Function of Form*, de Farshid Moussavi, p.46-47)

Outros autores categorizaram os sistemas estruturais segundo lógicas próprias, como Francis D.K. Ching, em seu *Sistemas Estruturais Ilustrados: Padrões, Sistemas e Projeto*. É uma classificação no modelo *problem solving*, valorizado pela cultura projetual norte-americana. Embora grande parte das formas estruturais esteja presente nesse livro, o caráter retrospectivo de análise sobre obras executadas não permite inferir desdobramentos de pesquisa especulativa a partir desses modelos. A classificação dos sistemas dá-se por critérios de buscas induzidas, seja pela tipologia, seja por atributos como altura, vão livre e outras metas projetuais definidas por programas específicos.

Heino Engel, no clássico *Sistemas Estruturais*, estabelece os fundamentos da pesquisa estrutural extensiva em um trabalho complexo e abrangente. É preciso situar o posicionamento do autor, que faz do processo de compreensão dos sistemas estruturais uma ponte pragmática entre o processo criativo na arquitetura e na engenharia. Em sua introdução, já torna explícita a tarefa ingrata relegada aos engenheiros de subserviência e restrição em relação ao projeto arquitetônico:

"Os arquitetos, por ignorância ou por antipatia, projetam construções distanciando-se da poesia das formas estruturais. O desprezo ou ainda diretamente a exclusão da beleza e da disciplina das estruturas na arquitetura moderna é evidente. O engenheiro, que tem confiada a tarefa de fazer tais formas arquitetônicas ficarem em pé e assim permanecerem, não pode aplicar o seu potencial criador em nenhuma postura, nem no projeto de arquitetura moderna, nem na invenção de novos protótipos de sistemas estruturais." (ENGEL, 2001)¹⁷

Essa publicação é, antes de mais nada, um material com funções didáticas de apoio ao curso de "Teoria das Estruturas", em um momento histórico de transição do modelo modernista (conforme texto acima) para uma cultura formal mais livre. A metodologia, ou base sistemática, como o autor se refere, define o agrupamento dos sistemas por princípios ativos, não por formas, critério lógico dentro de uma avaliação metodológica pragmática, e não toma como base estudos de caso construídos. As formas são consequências desejáveis escolhidas em função do mais adequado princípio ativo. Engel define a necessidade de uma sistemática que valorize a estrutura da seguinte forma:

1. A causa da arquitetura –passado e presente– é suprir e interpretar o espaço para a existência e a ação do homem; isso é conseguido através da moldagem da forma material.
2. A forma material está submetida a forças que desafiam a tolerância da forma e assim ameaçam seu próprio propósito e significado.

¹⁷ ENGEL, Heino. *Sistemas Estruturais*. Barcelona: GG. 2001 p.10-20.

3. A ameaça será defendida através da redistribuição das forças atuantes em cursos que não invadam nem a forma nem o espaço.

4. O mecanismo que efetua isso se chama estrutura: a redistribuição de forças é causa e essência da estrutura.

Isso, então, é a chave para revelar a total variedade das existentes e potenciais estruturas, para uma aplicação criativa por parte do planejador, tanto o arquiteto como o engenheiro. Uma teoria de sistemas para estruturas, construída dentro de sua função essencial de redistribuição de forças, analisada com ilustrações pelos sistemas característicos de comportamento mecânico, geometria de forma, geometria espacial e potencial de projeto.(ENGEL, 2001)¹⁸

A seguir, o autor identifica princípios ativos que serão subdivididos em subsistemas identificando as formas mais adequadas a cada um. São, a seguir:

a. Forma ativa: sistemas flexíveis, de material não rígido, nos quais a redistribuição de forças é efetuada por um desenho de forma particular, caracterizada pela estabilização da forma. Cabos, tendas, pneumáticos e arcos.

b. Vetor ativo: são sistemas de componentes lineares curtos, sólidos, retos (barras), nos quais a redistribuição de forças é efetuada por divisória de vetor, ou seja, por separações multidirecionais de forças singulares (barras de compressão ou tração). Treliças planas, treliças planas combinadas, treliças curvas e treliças espaciais.

c. Seção ativa: são sistemas de elementos lineares rígidos, sólidos –incluindo suas formas compactas como a laje–, nos quais a redistribuição de forças é efetuada pela mobilização das forças seccionais (internas). Vigas, pórticos, grelhas e lajes.

d. Superfície ativa: são sistemas de planos flexíveis, porém resistentes a compressão, tensão e cortes, nos quais a redistribuição de forças é efetuada pela resistência da superfície e pela forma particular de superfície. Cascas, placas e placas dobradas.

e. Altura ativa: são sistemas nos quais a redistribuição de forças exigida pela extensão da altura, isto é, o reagrupamento e a fundação das cargas de pavimento e cargas de vento são efetuados por estruturas à prova de altura: arranha-céus tipo modular, de vão livre, em balanço e tipo ponte.

¹⁸ ENGEL, Heino. *Sistemas Estruturais*. Barcelona: GG. 2001 p.10-20.

3.4 Caminho da forma: princípios formais + princípios ativos

Analisando os princípios ativos sugeridos por Engel, os sistemas de cabos e os pneumáticos pouco contribuem para o projeto desta tese. Embora possam ser utilizados em conjunto com a madeira, esse hibridismo não colabora com a metodologia ora em estudo.

A metodologia tradicional utilizada nos projetos arquitetônicos varia entre escolas de pensamento e escritórios de produção em volume. Via de regra, estabelecem programas e atendimento à legislação como prioridade, seguidos de condicionantes de implantação e, finalmente, da adequação formal aos fatores anteriores condicionados a uma viabilidade estrutural e construtiva. A lógica indica que a ordem investigativa na decisão da aplicação formal em um programa arquitetônico deveria seguir a premissa de que os atributos simbólicos antecedem os atributos estruturais tectônicos, portanto a forma primordial. Em seguida, se a premissa é a utilização de um determinado material, então a aplicação dos princípios ativos em função dele indicará o melhor caminho, tanto pela comunicação simbólica quanto pelo desempenho funcional do conjunto.

Um resumo da classificação adotada por Moussavi atende aos requisitos do projeto e serve como base para a visualização das possibilidades de desenvolvimento de caminhos formais definidos *a priori*.

Grelhas/molduras/pórticos

Dependendo do meio cultural, é provável que o sistema/arranjo estrutural primeiro venha à mente. O arcabouço mais primitivo, quando se pensa em proteção e segurança, é o pórtico, o arranjo estrutural mais intuitivo. Pode ser configurado com expansões e repetições em todos os sentidos, preservando sua função e seu desenho; é o preferido pelos adeptos da linguagem modernista por supostamente não assimilar conteúdo simbólico.

Figura 3.18. Grelhas, molduras e pórticos
Fonte: *The Function of Form*,
Farshid Moussavi, p 156-157

Abóbodas/cúpulas

Através da história, a arquitetura encontrou nas abóbodas e nas cúpulas duas de suas expressões simbólicas mais fortes e associativas, intimamente ligadas, como expressão espiritual, com a verticalidade e o poder. Contribui para isso certa magia produzida pela esbeltez estrutural e pela continuidade superficial. Pressupõe um conhecimento técnico sofisticado e, precisamente por isso, foi mais utilizada institucionalmente do que como habitação ou edificações de serviços. Obviamente isso não constitui regra, vide os galpões agrícolas e estádios esportivos, entre outros.

Figura 3.19. Abóbodas e cúpulas
Fonte: *The Function of Form*,
Farshid Moussavi, p 232-233/342-343

Placas dobradas/cascas/tensionados

A continuidade superficial sugerida por Lynn como alternativa a contradições e complexidades inerentes aos novos tempos encontra nas dobraduras, nas cascas e nos tensionados um campo fértil para responder a essas questões de forma autônoma, gerando seus próprios significados simbólicos e funcionais. A tecnologia assume, nessas classes formais, um papel de extrema relevância, conferindo, por si só, simbologia e contextualização temporal.

Figura 3.20. Placas dobradas, cascas e tensionados.
Fonte: *The Function of Form*,
Farshid Moussavi, p 394-395/440-441

3.5 Matriz de desenvolvimento de projeto

A relevância desse modelo classificatório para o projeto é a de alimentar o processo de escolha dos modelos estruturais a serem desenvolvidos no âmbito desta pesquisa em madeira, sendo que os valores conjugados resultarão em alguns caminhos para a elaboração da pesquisa formal tridimensional.

A suposição é de que o conhecimento *a priori* dessas considerações indique uma metodologia de projeto em que a madeira seja utilizada da forma mais otimizada possível e que as decisões alimentem caminhos criativos.

A matriz resultante das incontáveis possibilidades de escolhas depende da quantidade de variáveis inseridas no modelo. As possibilidades de atributos são tão finitas quanto as de linguagem e cultura de cada contexto, enquanto as possibilidades de princípios são limitadas ao que a tecnologia e o material permitem. A tectônica deriva dos arranjos possíveis a partir dos princípios formais, enquanto os princípios ativos darão respaldo técnico às escolhas anteriores. Essa matriz é móvel e admite a inserção de novos sistemas e valores a qualquer tempo, sem influir diretamente no processo.

Figura 3.21 Matriz de projeto. Fonte: autor

Considerando-se a matriz acima proposta, revelam-se infindáveis arranjos os quais, agrupados em torno dos princípios formais, produzem possibilidades concretas de expansão em todos os sentidos. Sem considerar ainda os atributos simbólicos, um levantamento na produção contemporânea permite revelar a existência de muitas obras construídas em torno desses princípios e que adquiriram valores simbólicos *a posteriori*.

3.6 Matrizes formais

A interpretação gráfica desses princípios, somada a um conjunto de exemplos ilustrativos, clarifica os caminhos de pesquisa formal e estrutural a serem desenvolvidos ao longo deste trabalho. Não cabe aqui uma crítica ao bom ou mau uso dos princípios utilizados nos exemplos, mas a seleção prima por obras em madeira, de reconhecida qualidade, seja no emprego dos princípios, seja na originalidade dos arranjos estruturais ou, ainda, no resultado harmonioso do conjunto.

3.6.1 Matriz portal

Figura 3.22. Matriz portal. Fonte: autor

A arquitetura contemporânea, principalmente na interpretação simplista dos cânones modernistas, é pródiga na reprodução infinita do uso dos pórticos, do chamado binômio pilar-viga, ou no empilhamento de elementos verticais e repetição horizontal, resultando em grelhas expandidas em todos os sentidos. Funcional e econômica, é também fruto de uma visão pragmática do conteúdo e do uso dessas edificações.

Na torre comercial T3, a grelha vertical convencional é constituída por elementos de madeira laminada colada (MLC), tecnologia que evoluiu muito ao longo dos últimos 30 anos, e por madeira laminada cavilhada (DLT), técnica tradicional com mais de um século que, por sua vez, evoluiu com a utilização de novos pregos e ângulos de incidência na inserção.

Com 25.000 m², a grelha horizontal das Moradias Infantis abriga habitações e infraestrutura para uma escola de ensino fundamental I, em uma remota região do Tocantins. Uma esbelta e repetitiva estrutura de MLC cobre uma ampla área de módulos autônomos com um generoso pé-direito e átrios que provêm iluminação natural e ventilação essenciais para aquela região. A industrialização da fabricação e a racionalização dos processos tornaram a obra competitiva com outras tecnologias.

Figura 3.23. Edifício T3, Michael Green Architects, Minneapolis EUA, 2016, Foto: Ema Peter. Ilustração: MGA

Figura 3.24. Moradias Infantis Fundação Bradesco, Rosenbaum + Aleph Zero, Tocantins, Brasil, 2015. Ilustração: Ita. Foto: Leonardo Finotti.

Figura 3.26. *St. Sheffield Winter Garden*, Pringle, Richards, Sharratt, Reino Unido, 2003, Foto : Wojtek Gurak

Figuras 3.27. e 3.28. *St. Henry Ecumenical art chapel*, Sanaksenaho architects, Turku, Finlândia, 2006, Fotos: JussiTianen

3.6.2 Matriz abóbada/cúpula

Figura 3.25. Matriz abóbada. Fonte: autor

Dominantes por um longo período da produção arquitetônica, as abóbadas e as cúpulas, derivadas dos arcos de uma forma geral, sempre estiveram associadas a símbolos religiosos ou de poder, dada a magnitude dos desafios para erigir tais estruturas. Na Idade Média e no período Renascentista que a sucedeu, a cúpula e as variantes dos arcos utilizavam a madeira como base para a sustentação de amplos vãos combinados com granito e mármore em diferentes associações.

É uma forma bastante racional de obter esbelteza e estabilidade a partir de elementos manipuláveis pelas tecnologias da época e por aplicar cargas relativamente leves às fundações. A relação entre altura do arco e largura do vão é favorável à utilização de materiais cujo comportamento na compressão é reconhecido, como a madeira, com o benefício extra do peso reduzido quando comparado aos minerais em geral.

No arranjo de arcos do *Sheffield Winter Garden*, a variação de amplitude na altura permite a constante entrada de luz, essencial para uma estufa de plantas, e permite também a percepção da progressiva redução de esforços laterais, à medida que os arcos crescem em altura. A crescente utilização dos arcos na arquitetura contemporânea amplia em muito seu uso para além dos edifícios associados à religião ou ao poder.

O arco ogival utilizado na capela em Turku, Finlândia, expande-se linearmente acentuando o uso dramático da luz no fim do túnel, tão caro à simbologia das construções espirituais. O exterior revestido por cobre protege e revela a passagem do tempo ao adquirir a inevitável pátina esverdeada.

3.6.3 Matriz placas dobradas

Figura 3.29 Matriz placas dobradas. Fonte: autor

Devido à alta complexidade dos arranjos estruturais e das ligações, as dobraduras não faziam parte da cultura arquitetônica até há bem pouco tempo. A madeira é em parte responsável pela evolução na utilização desse princípio formal em função de sua fácil manipulação, baixo peso e superfícies compostas de grande amplitude. As novas tecnologias de laminação têm permitido a produção industrializada de grandes painéis, com características autoportantes, que dispensam o uso de molduras e tramas internas. O uso dos Painéis de CLT (Cross Laminated Timber) tem sido responsável pela construção de um novo repertório formal.

Construída com a participação da comunidade local, a pequena capela de St. Loup, adquiriu notoriedade pela rapidez, baixo custo e grande efeito plástico, fruto da liberdade formal que a dobradura oferece. A repetição das dobras, com pequenas diferenças de angulação, produz a requintada, porém espartana, ambientação, de grande efeito simbólico espiritual. As juntas invisíveis e a pequena espessura induzem a uma percepção de “mágica” estrutural.

No posto fronteiriço de Hohenems, a dobradura, combinada com placas laminadas, redonda em uma estrutura de cobertura leve e permeável à luz, protegida por uma lâmina de policarbonato cristal. Essa estética em nada revela a atividade burocrática residente, mostrando que as possibilidades de linguagem decorrentes da exploração formal podem agregar valores positivos a atividades funcionais normalmente desprovidas de conteúdo simbólico.

Figura 3.30 Capela temporária de St. Loup, Localarchitecture & Danilo Mondada, Suíça, 2008, Foto: Milo Keller.

Figura 3.31. Posto fronteiriço em Hohenems, Reinhard Drexel, Áustria, 2000, Foto: autor

3.6.4 Matriz cascas

Figura 3. 32 Matriz cascas. Fonte: autor

As cascas, de origem vegetal, sempre fizeram parte do vocabulário construtivo através dos tempos, especialmente junto às civilizações mais primitivas. As tendas e as “ocas” são produto do meio, induzidas pela percepção de que a flexibilidade de algumas espécies vegetais poderia ter utilidade na construção de abrigos. Justamente a leveza e a flexibilidade são os atributos que hoje associamos à alta tecnologia e inteligência construtiva, com materiais derivados do bambu laminado, das fibras de carbono e vidro e de outros materiais e tramas industrializadas.

Liderado pelo Prof. Achim Menges, o curso do ITKE de “Robótica aplicada à construção em madeira”, propõe que os alunos pesquisem projetos e formas a partir da biomimética, em que a emulação de padrões encontrados na natureza sugere caminhos estruturais não convencionais. A combinação de material industrializado com a produção robotizada permite um nível de precisão impensável há pouco tempo e abre enormes portas para a pesquisa formal e a produção de elementos construtivos leves e precisos. A percepção é futurista e positiva pela combinação de dois extremos que evocam o natural e o familiar, com a mais alta tecnologia de produção.

No *gridshell*, ou casca, do Savill Gardens está a resposta às demandas formais que precisam exprimir a natureza orgânica de seu conteúdo. Ao contrário do que a percepção futurista inicial pode induzir, são análogas à tecnologia empregada nas “ocas” e utilizam peças de pequeno porte em arranjos treliçados em camadas. A liberdade formal advém da maleabilidade que esse arranjo permite, antes ou durante o processo construtivo.

Figuras 3.33. e 3.34. *Landesgartenschau Exhibition Hall/ICD/ITKE/IIGS*
University of Stuttgart, Alemanha, 2014.
Fotos: Nebelsick e Halbe

Figuras 3.35. *Savill Gardens Building*.
Glen Howells, Reino Unido, 2006
Fotos: autor

Figura 3.36. Matriz tensoestrutural. Fonte: autor

Associadas às tramas em que se utilizam tecidos especializados ou cabos metálicos revestidos, as tensoestruturas e o uso da madeira pouco convivem em um mesmo sistema. Entretanto, com o avanço da tecnologia dos painéis de laminação cruzada (CLT), a possibilidade tornou-se realidade.

Na Áustria, um pequeno complexo da prefeitura de Hohenems integra uma estação de bombeiros, administração e garagem de implementos e veículos. Uma cobertura de madeira ancorada na lateral de um edifício de concreto é tensionada e novamente ancorada em estais de aço fixados no piso. As conexões são feitas por placas de metal aparafusadas diretamente na madeira. Ao tracionar as placas, cria-se um efeito de sustentação virtualmente invisível, o qual parece contradizer a materialidade apresentada pelos painéis.

A madeira dobrada no vapor e tensionada em forma de uma estrutura recíproca abre nova vertente de pesquisas, colocando em prática conceitos teóricos pouco explorados no mundo real. Os projetos gerados pelos alunos do centro de pesquisas em madeira e robótica de Hooke Park, da AA (*Architectural Association School of Architecture*), focam os extremos da linguagem orgânica e natural da madeira com as propriedades de transformação da robótica avançada, com resultados surpreendentes e originais.

Existem ainda inúmeras formas a serem exploradas que não se enquadram estritamente nas classificações propostas dentro desta tese, e que desafiam e promovem novas maneiras de exploração formal. Essa classificação é o ponto de partida da pesquisa formal e a acumulação de conhecimento e sua documentação do processo formatam esta tese.

Figura 3.37. Garagem da prefeitura de Hohenems, Reinhard Drexel, Austria, 2000, Foto: autor

Figura 3.38. Cobertura para proteção de madeiras, AA Design+Make, Reino Unido, 2014, Foto: autor

4 Uma forma

4.1 Vivendo em um mundo material

*É a arquitetura um meio que determina forma a sensações existentes, ou as sensações são produzidas pela própria arquitetura? É a arquitetura uma forma de mediação (um instrumento de cultura e crítica) e um produto da cultura, ou é um produtor de cultura?*¹

Em algum ponto deste trabalho, a forma assume o protagonismo, não por motivos puramente estéticos mas pelo processo a ser explorado a partir dela.

A arquitetura é uma fonte produtora de cultura, transformadora, na medida em que traduz causas e objetivos (desconsiderando a vertente orientada pelo mercado) e torna-se uma ferramenta de conexão entre sentimentos e valores. A forma é o princípio que dá sentido e expressão à matéria (MOUSSAVI, 2009)², e vai muito além dos símbolos que, de tão desgastados, já não são eficientes na comunicação de sentidos. O empobrecimento cultural generalizado relaciona-se com mercado e autossatisfação, reduzindo o universo a *emojis* desprovidos de significado profundo, simples veículos de uma cultura que se expressa mediada. A noção da passagem do tempo é aceita como conceito, entretanto o envelhecimento não o é, pois o culto à juventude é dominante. A pátina do tempo confere dignidade, e a permanência, resiliência frente a uma sociedade que, a rigor, não aprendeu a renovar-se e apegar-se a valores conhecidos, por ser refratária ao risco. Durabilidade e envelhecimento são compatíveis.

A **madeira**, pela sua própria natureza, é a antítese da maneira como a sociedade atual interpreta o consumo e a obsolescência e é, ao mesmo tempo, sua salvação. Se por um lado envelhece e expressa a passagem do tempo, por outro é resiliente por ter atravessado incontáveis ondas culturais e hoje expressa a ideia de renovação como nenhum outro material. Embora perecível, a madeira é imortal, sempre presente em qualquer cultura, em qualquer época.

A enorme quantidade de produtos industriais empregados na construção, que imitam a madeira, o fazem pelos valores estéticos e simbólicos, não pela própria natureza do material. É curioso notar que o uso da madeira de baixo valor agregado, como o pinus e o eucalipto, tem aceitação pelo público nas lojas de produtos mobiliários populares. O *designer* francês radicado no Brasil, Michel Arnoult (1922-2005), utilizava madeiras pouco nobres e estabelecia valores acessíveis para seus produtos serem vendidos em lojas populares. Após a sua morte, seus móveis valorizaram mais de 10 vezes e são vendidos apenas por lojas especializadas, contrariando seu desejo.

Figura 4.1 Poltrona Peg-Lev, Michel Arnoult, 1968.
Foto: autor

¹ MOUSSAVI, Farshid, *The function of form*, Actar, Harvard, 2009

² KIPNIS, Jeffrey, in MOUSSAVI, Farshid, *The function of form*, Actar, Harvard, 2009

A maioria dos arquitetos e engenheiros, assim como o público em geral, têm um conhecimento superficial desse material primordial. Esse conhecimento exige tempo de pesquisa e riscos pouco afeitos à cultura de mercado e, portanto, mesmo com a divulgação e com a enorme quantidade de recursos tecnológicos disponíveis, a pesquisa formal, aliada a valores ambientais, ainda é incipiente.

4.2 Materializando ideias

A metodologia científica é universal e, como tal, exige processo e tempo. A matriz enunciada no terceiro capítulo (3.5) sugere que valores definidos *a priori* –somados a princípio formal, escolha tectônica e princípio ativo– são necessários e suficientes na definição do melhor caminho criativo. Isso pode ser verdade, todavia é fundamental que a observação sobre o comportamento da matéria-prima colabore nas decisões de projeto. Nesse sentido, existe uma responsabilidade e um respeito ao processo que é determinante na definição do produto estético. Podemos chamar a isso de “estética da responsabilidade”, entendendo aqui responsabilidade como uma resposta maturada que somente a observação e o tempo podem conferir. É a estética resultante das escolhas e do processo, subvertendo a dinâmica tradicional do projeto arquitetônico moderno com suas musas preconcebidas.

Como colocar em prática esse processo em que tantas variáveis podem resultar em randomicismo e gratuidade?

4.3 Interpretando símbolos

Como escolher valores e símbolos para o desenvolvimento deste projeto, de forma que o processo seja inequivocamente avaliado?

Os símbolos prontos estão esvaziados de significado dentro das sociedades hiperdesenvolvidas, justamente aquelas que mais procuram símbolos e valores para equilibrar suas deficiências de relacionamento humano. Na arquitetura, os símbolos associados às habitações referem-se ao posicionamento social acima de tudo, enquanto na arquitetura pública ou institucional a simbologia tende a transmitir valores mais complexos para comunicar-se eficientemente com um público diverso. A escolha de um tema em que a simbologia tenha um alcance mais amplo faz sentido para o processo proposto, no qual a sutileza incorporada ao longo do decurso tenha menos relevância do que a explicitude definida pelo tema. As obras públicas são carregadas de simbologia, sejam dominadas por ideologias, ou burocraticamente desprovidas de caráter.

As obras que mais apresentam simbologias aparentes são as de caráter religioso, porém, ainda assim, carregam valores um tanto sutis quando comunicam subtextos aos fiéis. Tem sido assim ao longo da história, e algumas das obras mais marcantes em todas as sociedades e culturas são as de caráter religioso. Monumentos também são portadores de simbologias marcantes, em que sensações e emoções levantadas são maiores quando as abstrações formais e materiais são corretamente manipuladas.

Um exemplo, já clássico, é o monumento aos mortos na Guerra do Vietnã, de Maya Lin, em Washington (1981), em que um rebaixo angular na paisagem revela uma parede de mármore preto polido, com os nomes dos combatentes mortos. As fortes emoções levantadas não acontecem apenas pelo desenho abstrato mas também pelo fato de não ser figurativo e ter sido desenhado, na época, por uma jovem asiática. Por não se sentirem representados, e francamente ofendidos, os veteranos da guerra criaram um outro monumento, explicitamente figurativo, que hoje é pouco visitado e pouco lembrado.

Estruturas de alto valor simbólico e identitário são mais explícitas e facilitam a compreensão dos mecanismos propostos ao longo do desenvolvimento formal adotado nesta tese. Para maior clareza do teor de abstração desejado, basta uma comparação com o modelo analítico proposto por Julius Natterer em *Timber Construction Manual*, para avaliação da qualidade da solução de projeto adotada. Enquanto objetiva e necessária, a análise do Prof. Natterer qualifica apenas o correto emprego de critérios construtivos, sem avaliar, contudo, as qualidades de desenho e a expressão da obra. Pode e deve ser empregada, em um estágio mais adiantado do conceito adotado, juntamente com outros fatores como inserção na paisagem, atendimento às normas construtivas, baixo impacto ambiental, entre outros. A somatória deverá qualificar a obra como um produto perfeitamente adequado.

Entretanto, nenhum desses fatores é capaz de transmitir sensações e expressões abstratas de forma eficiente.

Expressões objetivas

Critério de avaliação	3	2	1	0	P	Σ
Divisão em compartimentos separados		X			2	4
Tira partido da altura e do espaço estrutural		X			1	2
Clareza e transparência	X				3	9
Adaptabilidade da planta e lay out		X			2	4
Balanços/Beirais - proteção da madeira		X			1	2
Materiais consumidos	X				3	9
Elementos de conexão necessários	X				3	9
Facilidade de execução		X			2	4
Economia	X				3	9
Complexidade dos encaixes	X				3	9
Espaço livre e vãos	X				2	6
Aparência e utilidade	X				3	9
Ausência de competição (para construção)		X			2	4
Ponderação (peso) total da proposta de construção pelo engenheiro						80

3 = muito bom 2 = bom 1 = mediano 0 = ruim P = Peso Σ = total

Figura 4.3
Fonte: *Timber Construction Manual*

Figura 4.2 *Vietnam memorial*,
Maya Lin, Washington, 1981.
Foto: autor

Figura 4.2 *Três Soldados*,
Frederick Hart, Washington, 1984.
Foto: autor

Expressões abstratas

Religioso

Laico

- Posição

Divino

Mortalidade

Imortalidade

Espiritual

Místico

Mágico

Contrôle

Superioridade

Arrogância

Proporção

Harmonia

Beleza

Estupefação

Figura 4.3 *Exemplos de expressões abstratas*
Fonte: autor

Figura 4.5 Panteão romano, reconstruído em entre 117 e 125 DC.
Fonte: cc

Figura 4.6 Deutscher Bundestag, (Reichstag)
Paul Wallot, Berlim, 1894.
Foto: cc

Figura 4.7 Cúpula reconstruída em 1999,
Foster+Partners.
Foto: autor

Figura 4.8 Gateway arch,
Eero Saarinen, Saint Louis, 1965.
Foto: Alex S. Chicago Tribune

4.4 Símbolos e arquétipos – o arco

Já foi visto como os arquétipos atravessam os séculos e tornam-se referência para o inconsciente coletivo, assim, ao extrair as formas arquetípicas embutidas nos monumentos e nas construções de caráter religioso através da história, podem-se identificar elementos comuns e significados abrangentes.

É possível observar que, a partir do século V D.C, o arco e suas variações expandidas, rotacionadas e tesseladas, tornam-se recorrentes na expressão de certos valores.

No Ocidente, no início do primeiro milênio, o Coliseu, em Roma (70-80 D.C), já emprega o uso extensivo de arcos que, empilhados em anéis alinhados sobre colunas, demonstram a eficiência do sistema construtivo e os efeitos simbólicos associados. É uma declaração pública de poder e posição imperial, com uma característica democrática populista, na qual o público geral é dividido hierarquicamente, no entanto ainda assim pode usufruir do mesmo espetáculo e da presença do imperador. A arena ainda apresenta uma transparência que permite observar a capital do império romano e sua imensa sombra de dominação territorial. A partir dessa época, o arco terá presença, em diversas formas, na arquitetura de cunho religioso e monumental. Evoluirá a partir do século X para o estilo “Romanesco” e, no século XII, para o Gótico, quando a curvatura contínua é substituída pelo arco apontado ou ogivado. Nessas obras, o contínuo domínio do processo começa a permitir uma verticalização através do empilhamento e da repetição de elementos, em busca de uma maior proximidade com o divino.

No Oriente, a rotação do arco resultará no “domo” e suas variantes, que expressam ideias similares de poder e caminho para o céu. Disso resulta a expressão “abóbada celeste”. O firmamento possivelmente teve sua forma diretamente associada ao poder, divino ou laico. A mortalidade também tem sido representada pelos “domos”, com a mesma associação celeste, a representação do céu como destinação final, o desconhecido. (SMITH, 1950)³

Na tradição cristã, assim como na islâmica, as plantas arquitetônicas seguem princípios comuns, onde a nave central é culminada por um “domo”, uma articulação visual de uma viagem espiritual, cuja origem comum é ancestral, romano-helenística, e teve no Panteão romano sua representação mais literal. Nele, o óculo central é a porta de conexão como divino.

Além dos aspectos espaciais e tectônicos, outros fatores incidem na percepção dos valores citados anteriormente. A luz, como no Panteão romano e nos vitrais góticos e posteriores, é vital para que a mágica se complete, e o som, frequentemente subestimado, é responsável pelo alcance e pela tonalidade da mensagem religiosa ou de poder. As cúpulas semicirculares dirigem o som para o centro da nave, através da reflexão direta e concentrada, enquanto as cúpulas apontadas

³ SMITH, Earl Baldwin (1950). *The Dome: A study in the history of ideas*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

dirigem o som para todos os lados, penetrando fundo nas naves. Isso explica, em parte, as longas naves góticas em relação às plantas mais compactas e quadradas das estruturas romanescas e das estruturas islâmicas e judaicas.

A cúpula semicircular, por esse mesmo motivo, aparece com frequência em estruturas de poder em plenários como o Reichstag Germânico, em Berlim, cuja cúpula original, destruída após um incêndio em 1933, foi reconstruída em vidro, em 1999.

O repetido uso do arco na representação monumental geralmente aponta para a celebração triunfal em batalhas, tanto no mundo ocidental quanto no oriental. Na concepção moderna, o triunfo pode ser visto como demonstração de superioridade tecnológica, política ou militar, de poder, em última instância. Se o arco de Constantino, em Roma, evoca a soma de feitos de alguns poderosos imperadores, o *Gateway Arch* de Saarinen, em Saint Louis, evoca um poderio nacionalista-tecnológico (dedicado “ao povo americano”), resultado da posição que os Estados Unidos desfrutavam à época de sua concepção e posterior construção (1947/1965).

Em comum, essas obras apresentam a mais avançada tecnologia e o melhor sistema construtivo disponível na época, o que a própria escala e esbeltez denunciam. Um denominador comum a essas obras é a postura arrogante que acompanha a maioria dos monumentos e homenagens arquitetônicas

É perfeitamente cabível, portanto, supor que esse seria um ponto de partida, e não um resultado acidental de interpretação posterior, dado que o tempo necessário e os desafios para a construção daquelas obras extrapolam o acidental.

Sobre a luz e os inegáveis efeitos de misticismo e até estupefação, a arquitetura religiosa é pródiga em exemplos contemporâneos nos quais exerce fascínio também sobre os arquitetos, como ponto de partida projetual.

4.9

4.10

4.11

4.12

Figura 4.9 *Church of the Light*, Tadao Ando, Osaka 1999, Fonte: Archdaily

Figura 4.10 *Catedral de Papelão*, Shigeru Ban, Christchurch, New Zealand, 2013
Foto: Bridgit Anderson

Figura 4.11. *Chapelle Notre Dame du Haut*, Le Corbusier, Ronchamp, 1954.
Foto: Rory Hyde Fonte: Archdaily

Figura 4.12 *Capela alpina Vordere Niedere*, Cukowicz Nachbaur, Andelsbuch, 2011, Foto: autor

Figura 4.13 *Rainbow Bridge, Utah*. Foto cc.

4.5 Natureza do arco

Tendo o arco desempenhado com sucesso o papel de representação inequívoca de valores, e visto como tem sido utilizado ao longo da história e concretizado aspirações comuns a todas as culturas, portanto arquetípicas, é preciso entender melhor por que essa materialização acontece. Há certa magia na distribuição das cargas ao longo deste desenho arqueado que encanta, já na natureza, onde é tão fascinante quanto enigmático.

Se as estruturas biapoiadas representam a racionalização da construção, talvez a mais arquetípica de todas as formas estruturais, o conceito em si revela o truque que a sustenta, sem a mágica e a elegância encontradas em formas mais complexas. Embora com apenas dois apoios, o arco, por outro lado, revela o supremo domínio sobre a forma, a racionalização quase divina, natural.

Gaudí encontrou no arco catenário a expressão formal que mais o aproximava do divino e a empregou em quase todas suas obras. Sua investigação com correntes e espelhos é emblemática, na Casa Milá, na Casa Batlló e na Catedral da Sagrada Família, todas em Barcelona. Oscar Niemeyer tem uma relação íntima com as curvas, especialmente com as inúmeras possibilidades estruturais oferecidas por elas. Com mais de 20 obras religiosas, principalmente no início de sua carreira, Niemeyer e Joaquim Cardozo investigaram o potencial simbólico e expressivo das curvas suspensas, em obras como a Residência Cavanellas (Petrópolis, 1954) e a Igreja Católica da Superquadra (Nossa Senhora de Fátima, 1958). “Ao desenhar uma igreja, o arquiteto sente, surpreso, como esta é generosa como tema arquitetural” dizia Niemeyer⁴ que, ao contrário de Gaudí, não era guiado por uma fé inabalável. A fé do arquiteto repousa na estética, na expressão do belo.

Figura 4.14 *Catenária na Casa Batlló*, A. Gaudí, Barcelona, 1877.
Foto: autor

Figura 4.15 *Estudo para Catenárias da Sagrada Família*, na Casa Milá, A. Gaudí, Barcelona 1910.

4 NIEMEYER. A fé segundo Niemeyer. Correio Brasiliense. Brasília, 05 de julho de 2009, p.38.

Niemeyer sugere a catenária como elemento estrutural em várias obras as quais, quando analisadas com rigor, são aproximações intuitivas que se valem de alguns artifícios para preservar a pureza das formas sobre a função estrutural.

Na igrejainha da superquadra, a curva triapoiada foi desenhada como uma catenária, “a figura que sintetiza seu desenho espacial é uma corrente a configurar-se por seu peso próprio: a catenária, como definiu Julio Katinski (2007)⁵, porém, o cálculo estrutural exigia uma espessura de 2,20m, incompatível com a promessa de leveza que o projeto requeria. A construção de elementos de concreto intermediários, sob o vão principal, permitiu a redução da espessura para 0.90m e descaracterizou a premissa da catenária como elemento estrutural, sugerida pela forma.

As aproximações mais puras aparecem nas cascas da igreja de Pampulha e em todas as curvas posteriores da obra de Niemeyer, no entanto o olho estético do arquiteto sempre acrescentou um ajuste autoral sobre suas curvas.

Uma investigação sobre a geometria e os princípios proporcionais derivados da racionalização do arco demonstra a fascinação que esse elemento tem exercido desde o princípio da humanidade. Os princípios fundamentais que ainda regem a prática geométrica ocidental constam dos estudos de Euclides (325-265AC) e Arquimedes (287-212 A.C) e nessa busca a ciência e as artes caminharam juntas. A busca pela forma ideal de certa maneira ilustra esse relacionamento, já observado anteriormente nas visões platônicas e aristotélicas, e o *Graal* nessa área de estudos é a proporção áurea (a proporção ideal entre dois segmentos distintos), a qual procura divinizar o conhecimento e torná-lo sagrado.

O conhecimento pré-científico sempre buscou validação na religião, e a obsessão pelas proporções, harmonia e beleza, prometida pelas relações encontradas na proporção áurea, realizou na arquitetura a materialização desses valores e, na arquitetura religiosa, seu principal suporte.

Figura 4.16 *Nossa Senhora de Fátima*, Oscar Niemeyer, Brasília, 1958
Foto Marcel Gautherot, acervo IMS

Figura 4.17 *CSQ. Cobertura corte AB. 9.11.1957*
Projeto de Estruturas. DAU/NOVACAP.
Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal

Figura 4.18 *Construção geométrica da parábola e do arco apontado, a partir das relações das proporções áureas.*
Ilustração: autor.
Fonte: *Geometry of the Parabola according to the Golden Number*, Carlos Calvimontes Rojas, apud *Visual Mathematics* ISSN: 1821-1437

⁵ KATINSKY. Caminhos do desejo: desenhos de Oscar Niemeyer na FAUUSP. 2007, p.52.

Le Corbusier, um obsessivo quanto às proporções, afirmava que o arquiteto se expressa por intuição para automaticamente fazer as correções ópticas necessárias.

A ordem é necessária, afirma em *Por uma arquitetura*, ela confere ao trabalho a qualidade do ritmo, vital para a arquitetura.⁶

Figuras 4.19 e 4.20 *Variantes sobre o Modulor*
Le Corbusier, 1945,
Fonte: Fondation Le Corbusier

O exercício da escolha emana da sensibilidade adquirida com o conhecimento, a experiência, a emoção e a perspectiva da exequibilidade. A isso, possivelmente, chame-se de intuição. Projetar é a única forma de gerir o tempo, entretanto, como já visto antes, também não é uma razão suficiente para conferir qualidades às obras, apenas torna o processo mais eficiente.

Figuras 4.21 e 4.22 *Princípios para a construção geométrica da parábola e do arco apontado, e de todas as variantes de arcos.*

Ilustração: autor

Fonte: *Geometry of the parabola according to the Golden Number*, Carlos Calvimontes Rojas, Publicado em Visual Mathematics ISSN: 1821-1437

4.6 Construção do arco

Tendo o arco sido escolhido como base para este estudo, pelo seu desempenho no papel de representação inequívoca de valores, resta decodificá-lo como base para o exercício exploratório proposto.

arco apontado

arco parabólico

6 LE CORBUSIER, *Por uma arquitetura*. V.27, São Paulo, Perspectiva, 2014.

Naturalmente, existem formas estruturais baseadas em arcos que foram originalmente pensadas em determinados materiais, como pedras, concreto e madeira. A madeira reage muito bem a cargas verticais, comprimida. Não atua no seu melhor desempenho sob tração, mas associada ao metal, cujo comportamento sob tração é notável, ela pode adquirir formas de grande leveza e resistência. Não se devem considerar aqui fatores como proteção às intempéries e outros que precisam ser considerados, porque, como visto antes, não existe uma madeira genérica mas sim um universo variável em função de espécie, densidade e classe de resistência. Arbitrariamente, não serão considerados esses valores para efeito de demonstração.

Isoladamente o arco não determina uma construção. Trata-se apenas de uma figura geométrica que, quando extrudada, rotacionada ou tessellada, revela formas que assumiram atributos próprios e nomenclatura igualmente única ao longo da história, associadas às obras em que foram empregadas. As variações são muitas, e não cabe aqui elencá-las; quando oportuno, serão denominadas. Para o desenvolvimento do projeto, as características geométricas e comportamentais são preponderantes para responder aos critérios da pesquisa.

Figura 4.23 Arcos e abóbadas.
Ilustração: autor

Figura 4.24 Rotação, rebatimento e extrusão de arcos.
Ilustração: autor

Ao rebater um segmento de arco, tem-se um arco redondo, ou romano. Ao extrudar ou replicar um arco redondo, tem-se uma abóbada cilíndrica, ou uma nave. Ao rotacionar o arco, tem-se um leque, ou arco em leque, o qual, rebatido, forma uma abóbada em leque que, rotacionada pelo eixo externo do arco, forma uma abóbada circular.

Ao aplicar tais ações, a geometria simples do arco torna-se extremamente complexa e formalmente muito envolvente, propiciando a expressão de autonomia formal e elaborada que é cara à arquitetura eclesiástica e ao poder em geral.

Enquanto as técnicas construtivas em pedra e concreto utilizam a arcada externa ao arco –o espaço negativo da forma–, a madeira e o metal prestam-se ao esqueleto da forma e tornam mais visíveis os esforços e a dimensão das cargas suportadas. Do ponto de vista tectônico, ambas se prestam a criar uma identidade estrutural, todavia, enquanto a massa construída vazada pelas aberturas comunica-se com a terra, a versão estrutural esquelética reporta-se ao ar, à leveza e à economia. Os espaços gerados são distintos e os valores percebidos, idem.

A madeira, muito embora tenha sido o ponto de partida para os saltos históricos produzidos pela engenharia ao longo dos séculos, teve papel coadjuvante como estrutura, salvo nos países asiáticos, pobres em matéria-prima mineral apropriada. Porém, mesmo como coadjuvante, tem presença longa em edificações perenes como a Capela do Kings College em Cambridge, de 1554, cuja abóbada sofreu sua primeira manutenção intensiva somente ao final do século XX.

Tendo sido considerados atributos abstratos abrangentes (simbologia) e tendo localizado nos arcos e derivados (princípio formal e tectônica) uma expressão arquitetônica inequívoca, é preciso analisar o comportamento estrutural e as cargas atuantes, a fim de definir quais são os princípios ativos que estabelecem as regras de comportamento e desempenho desse princípio formal.

4.7 Ativando o arco

Ao ter tanto a carga própria quanto a aplicada uniformes, o arco é uma das formas mais estáveis e delgadas em sua função estrutural.

Figura 4.25 Comportamento e distribuição de esforços sobre um arco genérico. Ilustração: autor

A distribuição de cargas e esforços tem relação direta com os apoios no solo e com a altura do arco.

Figura 4.26 Comportamento e distribuição de esforços sobre as bases de um arco genérico. Ilustração: autor

Figuras.4.27 Variantes de apoios que tem influência no comportamento do arco
Ilustração: autor

*"As hangs the flexible line,
so but inverted will stand
the rigid arch"*

Hooke

As estruturas em arco podem ser rígidas –se o corpo que forma o arco for rígido, capaz de suportar esforços de flexão–, e fixas diretamente ao solo. Podem ser biarticuladas, quando a estrutura é rígida, mas o contato com o solo é feito de maneira articulada e podem ser triarticuladas, quando, além do contato com o solo articulado, o arco é articulado também no seu ápice.

Os apoios configuram a transição que recebe a carga do arco e a transfere para o solo. A linguagem dos apoios e das articulações dos arcos define sua relação tectônica com o ambiente, em alguns casos, literalmente.

Viu-se na figura 4.26 que, quanto maior a relação entre altura e largura, sendo a altura maior do que a largura, melhor a distribuição de esforços no solo e ao longo do próprio arco.

Quando entram em cena a intuição e os aspectos semânticos e abstratos, a curva ideal torna-se subjetiva, e a geometria serve apenas como apoio inicial, deixando a natureza estética assumir seu protagonismo.

Na capela da Colônia Güell, Gaudí idealizou um sistema de pesos ensacados e distribuídos ao longo de um cabo fino e notou que as curvas entre os pesos eram transformadas ao longo do eixo. Inferiu, com isso, que aquela era a curva ideal produzida pela distribuição homogênea de cargas ao longo da curva, portanto a forma mais estável possível. Era possível, a partir dessa conclusão, construir edifícios inteiros usando a curva catenária como princípio estrutural. (HUERTA, 2006)⁷ Em 1671, Robert Hooke (matemático, físico, arquiteto e filósofo inglês, 1635-1703) enunciou os princípios da catenária e sugeriu à Real Sociedade que essa curva seria a forma ideal para arcos.

Em teoria, a catenária reúne motivos para isso, pois as cargas sobre a curva repousam sobre seu centro e a curva suporta apenas compressão pura, sem momentos de torção significativos nos materiais e sem esforços laterais de deformação, dispensando contrafortes.

A mágica se realiza na medida em que dispensa o truque para existir, e a catenária concretiza essa mágica com perfeição, tornando-se excelente ponto de partida projetual.

O princípio que atua sobre arcos em geral é a forma ativa, segundo Engel, na qual a redistribuição de forças é efetuada por um desenho de forma particular e caracterizada pela estabilização da forma. Logo, esse desenho particular, o arco resultante da forma catenária, torna-se a forma essencial da qual partem os estudos que se seguem, incorporando valores recolhidos das análises precedentes e de exemplos citados.

⁷ HUERTA, S. (2006). "Assim como pende a curva flexível, inversamente sustentar-se-á o arco rígido" (trad. do autor) Structural design in the work of Gaudi. Architectural Science Review, 49(4), 324-339.

Figura 4.28 Comportamento do arco frente a esforços uniformes verticais e laterais. Ilustração: Autor

4.8 Variações sobre uma forma divina

O *Gateway Arch*, ou o Portal para o Oeste, de Eero Saarinen, é referência constante para esta tese, tanto pelo desenho como pelo processo. Vinte anos (1945-1965) passaram-se entre o concurso e a finalização da construção, e os percalços não foram poucos, entre questões técnicas e políticas.

Saarinen fez ajustes consideráveis quanto à forma –a seção triangular nasceu quadrada, alterada após uma consulta geométrica/estrutural– e quanto às dimensões –foi aumentada entre etapas do concurso e teve sua base e altura redimensionadas para formar uma proporção quadrada–, sempre em busca da expressão máxima do belo. Entre todos os questionamentos e aplausos recebidos pela obra, nenhuma manifestação foi contra a estética do arco, apenas políticos (gastos públicos, questões raciais) ou localização.

Entre os ajustes formais, a catenária pura cedeu espaço para uma *weighted catenary*, uma catenária com pesos distribuídos para ajustar a curva porque a seção não é constante. Saarinen optou por ajustes visuais para que o arco não ficasse tão pontiagudo e apresentasse uma transição mais suave entre as seções, mais harmônica.

Figuras.4.29 e 4.30 Desenhos do Gateway Arch, E. Saarinen, Library of Congress, fonte <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/ppmsca15446>

Figura 4.31 Corte esquemático do sistema construtivo do Gateway Arch.
Fonte Post Dispatch, ilus. Rich Rokicki

THE ARCH'S BASIC BUILDING BLOCKS

Because the Arch has no structural skeleton, it relies on its own skin of stainless steel and carbon steel for support.

The Arch is made up of a series of double-walled triangular sections stacked one on top of another, gradually decreasing in size as they rise.

Carbon steel plates make up interior wall. There is a 3-foot space between the inner and outer wall in the largest piece, and narrows to less than 8 inches on the smallest section.

Concrete fill was pumped between the carbon and stainless steel walls after the section was set in place.

Post-tensioning rods, embedded in the concrete, kept the sections pulled tightly together during construction.

Strengthening rods

Stainless steel plates make up the exterior wall.

SOURCE: National Park Service

SOURCE: Rich Rokicki | Post-Dispatch

A seção triangular adotada acentua a esbeltez do arco tanto quanto resolve deformações estruturais decorrentes da escala e do sistema construtivo.

Levando em conta semelhantes achados geométricos e estruturais, a pesquisa assume um processo mais próximo do exercício arquitetônico ideal, no qual as suposições gráficas iniciais evoluem para desenhos formais elaborados e para a modelagem, avaliando hipóteses.

4.9 Representação da forma

A investigação científica –como a conhecemos hoje– tem início nas práticas investigativas do mundo islâmico e na Renascença europeia dos anos 1500 d.c., quando artistas e arquitetos como Leonardo Da Vinci e Michelangelo estabeleceram as formas de representação gráfica que conhecemos, com desenhos naturalistas em *chiaroscuro*, cortes e vistas em várias posições, mesclando arte com diagramas que influenciaram a representação de todas as atividades científicas posteriores. Essa representação torna-se referência para os séculos seguintes, e mesmo com a emergência da representação digital, ainda encontra relevância no processo de investigação científica e nas chamadas artes industriais, como a arquitetura. Com a combinação de achados, os projetos se desenvolvem, recorrendo continuamente às referências citadas e introduzindo sobreposições que permitam rastrear os caminhos percorridos e desenvolver novas possibilidades.

Figura 4.32 Desenho extraído do Codici XX, Leonardo Da Vinci
Fonte: Hulton Fine Art Collection

Figura 4.33 Estudo para casa em Lake Tahoe, Frank Lloyd Wright, 1925
Fonte: Canadian Centre for Architecture

Figura 4.34 Diagrama científico de voo, Ilustração: Karl Herzog

5 Aplicando a forma: projetos e modelagem

A partir desta etapa, o fluxo do trabalho entra em um processo metódico no qual a concepção estrutural deriva de princípios abstratos ou biomiméticos, considerando peças de pequenas dimensões que podem ser manuseadas em canteiro de obras sem a necessidade de equipamentos de grande porte.

Retomem-se os itens determinantes dessas premissas, a fim de avaliar as soluções encontradas:

premissas

- Tecnologia de baixo carbono
- Madeira engenheirada
- Componentes industriais
- Fabricação digital
- Aplicação de vários princípios ativos
- Ênfase na tectônica das ligações
- Representação simbólica
- Tecnologia aparente contemporânea
- Mão de obra especializada para montagem
- Montagem sem ferramentas de grande porte

5.1 Determinando a forma básica

Uma vez definida a catenária como arquétipo formal e compreendidos os princípios ativos por trás da forma, resta estabelecer uma proporção entre a altura e a base como ponto de partida da investigação de possibilidades estruturais construtivas. Nas obras de Gaudí, em estudos de Saarinen e Le Corbusier notamos a grande incidência do uso da relação 1:1, ou seja, a largura da base é igual a altura do arco.

Figura 5.3 Comparativo entre arcos e o Gateway Arch.
ilustração: autor

Figuras 5.1 Estudos de proporção realizados por Eero Saarinen para o Gateway Arch, Saint Louis, 1959

Fonte: Objet trouvé [02]: Eero Saarinen and the golden proportions of his intuition | Rodrigo Almonacid

Figura 5.2 Saarinen com modelo em escala, 1959

Fonte: Yale University Library

Figura 5.4

Figura 5.5

Figura 5.4 Parábola e Catenária com razão proporcional de 1:1
Fonte: Yale University Library

Figura 5.5 Diagrama de razão proporcional em uma catenária
Fonte: Yale University Library

Figura 5.6 Proporção 1:1 aplicada na Catedral de Milão
Fonte: Yale University Library

Vale a pena notar que a relação de aspecto 1:1 é uma tradição muito antiga na arquitetura. Na época medieval era conhecida como *ad quadratum*. As especificações originais de 1386 para a catedral de Milão são um exemplo (cf. [Heyman 1999: 19]). O contraste entre a forma de uma parábola e a forma de uma catenária é claro, se escolhermos segmentos de cada um com uma relação de aspecto 1:1

Já verificamos também que, como a catenária invertida trabalha a compressão essa relação é a mais recomendável para absorver de forma homogênea as distribuições de cargas ao longo do eixo normal.

Figura 5.6

A relação proporcional, correta como aproximação visual, precisa ser testada como conceito estrutural, com uma carga homogênea aplicada. Isso foi feito com a utilização dos programas de computador Rhino e Grasshopper/Karamba, conjugados com parâmetros variáveis de forma, dimensionamento e análise estrutural, com o único propósito de avaliar a distribuição de cargas próximas ao perfil do arco. Seria o arco catenário de fato a forma perfeita também sob o ponto de vista estrutural?

Figura 5.7 Catenária paramétrica construída com algoritmo produzido com Rhino/ Grasshopper
Fonte: autor

5.2 Arranjos

A análise de arranjos possíveis não é determinante para as escolhas de sistemas ou funções, mas serve para a avaliação e a visualização do potencial construtivo. Os modelos aqui investigados abrangem as formas de extrusão, rotação e tessellamento, permitindo uma extrapolação associada a cada sistema proposto neste exercício. Todos partem de um mesmo perfil, gerado através de um modelo paramétrico baseado nas proporções ideais investigadas anteriormente.

Figura 5.8 Catenária geométrica construída com base nos achados de Saarinen
Ilustração: autor

Figuras 5.9 Rotação pelo eixo central com dois elementos. Ilustração: autor

Figuras 5.10 Rotação pelo eixo central com vários elementos. Ilustração: autor

Figuras 5.11 Extrusão linear simples, com variação de altura e meia parábola invertida. Ilustração: autor

Figura 5.12 *Air Force Cadet Chapel*
SOM, Colorado Springs, 1962.
Foto: Daniel Hagerman

Figura 5.13 *Palácio das Convenções Anhembi*
Jorge Wilhelm, São Paulo, 1970.
Foto: Ivan Maglio

Figura 5.14 *Aeroporto Barajas*
Estudio Lamela & Rogers,
Stirk Harbour + Partners, Madrid, 2005.
Fonte: Archdaily

Figura 5.15 *New Norcia Cathedral*
Pier Luigi Nervi 1959-61.
Fonte: Eth Zürich

Figura 5.16 *South Pond Pavilion*
Studio Gang, Chicago, 2010.
Ilustração: autor
(ver anexo1)

Figura 5.17 *Diagrama de cargas*
em um domo de 4 faces.
Fonte: Eth Zürich

Esse exercício preliminar introduz a forma através do componente básico e suas possíveis variáveis compostas. Seu objetivo inicial é o de ampliar os horizontes de pesquisa formal sem abandonar os parâmetros adotados e ainda permitir a adoção ou a descoberta de novos parâmetros não previstos. Várias dessas amostras de expansão, rotação e extrusão foram extensamente aplicadas e exemplificadas ao longo deste trabalho, como é o caso de Gaudí com a *Casa Batlló* (fig. 4.14), *St. Sheffield Winter Garden* (fig. 3.26) e *St. Henry Ecumenical art chapel* (fig. 3.27 e 3.28). Algumas outras foram reunidas aqui a título ilustrativo do processo analógico de criação.

Alguns estudos de casos mais detalhados foram anexadas ao final deste trabalho. (ver Anexos)

Evoluindo no processo, a próxima etapa busca a aplicação de componentes construtivos que componham a forma básica os quais, partindo de origens diferentes, permitam a ativação do elemento estrutural dentro dos princípios formulados por Engel.

Nessa sequência, é necessário definir o componente que melhor ative a forma desejada, dentro de princípios estruturais e tectônicos que deem sentido à forma, ao sistema de fabricação e ao processo de montagem.

Analogias > Inserção de atributos e sistemas construtivos > desenvolvimento de sistemas e componentes

A diferença entre a invenção e a inovação parece clara para o mundo, na medida em que a indústria do consumo tornou essa distinção mais tangível, através de uma infinidade de produtos derivados de princípios originais, porém modificados na medida necessária para transformá-los em novidade. Em arquitetura as fronteiras tornam-se menos definidas e a tecnologia aliada ao desenho gera deformações cuja interpretação é por demais subjetiva. Estilo, uma palavra muito empregada em arquitetura, esconde uma apropriação de linguagem criativa e universaliza uma idéia, camuflando a autoria pertencente ao original. Exemplo disso dentro do universo desse projeto é a comparação entre a obra do arquiteto Shigeru Ban, *Nine Bridges Country Club*, na Coreia do Sul, de 2010, e a *Cambridge Mosque*, de David Marks (Marks Barfield architects), de 2019. Shigeru Ban acionou Marks judicialmente sobre o plágio evidente, mas esse tênue limite entre a originalidade formal e a originalidade técnico-construtiva torna essa comparação complexa em termos de julgamento. A empresa que construiu ambas (Blumer Lehmann) é a dona da tecnologia para a fabricação, portanto não pertence ao arquiteto, cuja referência vem de almofadas tradicionais coreanas, as "*bamboo wife*". Já a mesquita em Cambridge alega referências nos padrões e arranjos tradicionais da cultura árabe.

A digressão sobre os conceitos de originalidade, inovação e plágio faz sentido neste contexto porque as aplicações estruturais desenvolvidas a seguir podem ou não ser originais, mas o objetivo deste projeto é caracterizar a diversidade de opções a partir de parâmetros pré definidos e investigar a eficiência dos processos investigativos propostos. As técnicas propostas podem ser ancestrais ou originais e contemporâneas, mas o que está em análise é a resposta potencial que cada escolha apresenta, e qual é a resposta mais satisfatória perante as condicionantes definidas.

Posto isso, esse trabalho segue apresentando quatro opções de sistemas para a confecção de uma catenária estrutural, em madeira, a partir de componentes definidos por desenho, método construtivo, eficiência no aproveitamento da matéria prima e dos valores previamente elencados no início deste capítulo.

Figura 5.18 *Nine Bridges Golf Club*
Shigeru Ban, Coreia do Sul, 2010.
Fonte: Shigeru Ban Architects

Figura 5.19 *Cambridge Mosque*,
Marks Barfield, Cambridge, 2019.
Foto: wikicommons

“O inorgânico não tem nenhum significado simbólico e, por isso, a forma estrutural somente pode adquirir valor simbólico por sua capacidade de engendrar analogias entre a forma orgânica e a tectônica”.

Bötticher

Figura 5.20: Coluna vertebral
Leonardo DaVinci, 1510-11.
fonte: The Royal Collection Trust.

Figura 5.21: Esqueleto completo de Diplodocus
Fonte: New Mexico Museum of
Natural History and Science

Figuras 5.22 a 5.24: Sistema estrutural de uma
coluna dorsal humana e analogia
estrutural aplicada a um arco
Fonte: autor

5.3 Catenária dorsal

Conceito - Analogias sugerem sistemas construtivos baseados em observação empírica e funcionalidade similar. Ao agregar componentes derivados de observações biomiméticas, voltamo-nos aos princípios fundamentais que regem as estruturas naturais, aquelas que suportam cargas com maior ou menor rigidez. Talvez o território mais familiar seja o nosso próprio corpo mas, por esse mesmo motivo, não atentamos em observar como de fato funcionamos, e se nossa estrutura responde às principais leis da natureza e da física. As similaridades comportamentais e de distribuição de cargas da espinha dorsal humana indicam grandes possibilidades estruturais e sistemas derivados de componentes em seções variáveis, tensionados por dispositivos internos reguláveis e amortecedores, com componentes análogos aos utilizados no Gateway Arch.

A observação da natureza nos permite pensar em estratégias derivadas da própria evolução para estabelecer estratégias similares de empilhamento e articulação. Dado que a movimentação articular não é desejável, no caso da distribuição de cargas na catenária, podemos ainda localizar nos tendões e músculos que de fato, enrijecem as estruturas orgânicas, estratégias similares de tensionamento do conjunto.

Estes são os princípios adotados no desenvolvimento da aplicação denominada "catenária dorsal".

Desenho - Naturalmente, a escala faz toda a diferença quando trata-se de uma obra real mas nesse contexto a escala é irrelevante para fins de estudo. Portanto foi estabelecida uma medida de 220 centímetros, tanto para largura dos apoios, quanto para a altura total, dentro da relação 1:1. Essa arbitrariedade decorre de questões de exequibilidade e transporte, mas a dimensão é suficiente para estabelecer analogias com construções em dimensões significativamente maiores.

Os segmentos foram determinados em função dos centros dos raios determinantes da curvatura da catenária escolhida e dos meios de produção disponíveis para a execução dos componentes. As chapas compensadas oferecem uma gama de espessuras e quantidade de lâminas que podem ter influência no resultado final, seja do ponto de vista da resistência, seja pelo resultado estético e adaptabilidade às fresas utilizadas pelo equipamento de corte e desbaste em CNC (Comando Numérico Computadorizado).

Figuras 5.25 Estudo preliminar do sistema e de componentes a partir da analogia observada, com protótipo inicial para avaliação.
Fonte: autor

220cm

Figura 5.26. Planta, elevação frontal e elevação lateral.
Fonte: autor

Na concepção original, cada componente seria conectado por uma barra roscada, que se conectaria com a barra seguinte e assim sucessivamente, permitindo um micro ajuste pontual, sem comprometer a estrutura como um todo. Entretanto isso significaria 420 possibilidades de ajustes, portanto, 420 operações a mais. Ao substituir esse sistema por um cabo de aço terminado por uma rosca, temos apenas 6 pontos de ajuste de tensão e maior controle sobre o conjunto e o posicionamento dos amortecedores.

Figura 5.27. Ilustração do sistema de encaixes e amortecedores.
Fonte: autor

Figura 5.28. *Divisão da catenária em segmentos proporcionais, dimensionados através do processo de fabricação digital disponível.*
Fonte: autor

Figura 5.29: Sistema de cabos de aço tensionados, ancorados na base.
Fonte: autor

Após as etapas iniciais e a construção de protótipos, o modelo base foi re-desenhado para a obtenção de uma peça simétrica que absorve melhor as variações dimensionais da redução dos componentes ao longo do eixo catenário e corresponde a proporções geométricas mais harmoniosas.

Fabricação - O processo de fabricação dos componentes derivados da coluna vertebral (fabricação através de corte em CNC), permite a execução de cada peça com dimensões diferentes, a partir de um único arquivo gerado pelo *Rhinoceros* e pelo *Grasshopper*, sem que haja aumento significativo no tempo de produção de cada peça. É o mesmo que produzir componentes idênticos em moldes.

A usinagem tem precisão milimétrica e, dependendo da escolha correta da fresa a ser utilizada no roteador, o acabamento também pode ser excepcional, dispensando processos complementares. Para a produção de cada peça foi utilizado um bloco de 60mm de espessura, usinado segundo parâmetros introduzidos no aplicativo *Fusion 360*, responsável por traduzir os movimentos necessários para a usinagem de cada peça em placas de compensado leve. O resultado desse processo chamado de *G code* (Código G, também referido como RS 274 na linguagem de programação), é uma longa lista de instruções interpretadas por outro aplicativo que comanda a movimentação da mesa de usinagem. Nesse caso foi utilizado o aplicativo *Mach3*, que não apenas gerencia essa leitura do código como também estabelece a posição da fresa no espaço e calibra com precisão a escala dos cortes.

Figura 5.30: Geometria reformulada para um elemento simétrico.
Ilustração: autor

Figuras 5.31: Início do processo de fabricação do protótipo de peça, a partir do modelo ajustado no Rhino, inserido no Fusion 360, e recortado em CNC.

Ilustrações e foto: autor/Daniela Fassina

Figuras 5.32: Estudo com a versão simétrica do sistema, com os componentes de dimensões variáveis.

Ilustrações e modelo: autor

Figura 5.33 Aproveitamento de chapa para corte
Ilustração: autor

Figura 5.34 Corte na face superior
efetuado em chapa de 60mm
Foto: CorteRecorte

Para a fabricação, as peças foram distribuídas em uma chapa de LVL de 60mm (duas placas de 30mm coladas com cola PU) e usinadas em ambas as faces, sendo que a base inferior da chapa foi considerada como referência para os cortes rampados exigidos para os encaixes entre as peças. Como a mesa de corte CNC só opera com cortes em 90° (três eixos xyz) foi definido um volume com uma extrusão paralela e a inclinação entre as peças aplicadas à face superior do corte. Para isso foi feito um corte na face inferior e o tombamento da placa para o corte superior, reduzindo o tempo total de horas em máquina.

Boa parte dessa etapa de fabricação é investida em redução de tempo em máquina e precisão de cortes. (ver anexo 5)

Figura 5.35 Ângulo de corte para
fabricação em duas faces
Ilustração: autor

Montagem - Como demonstrado na figura 4.27 (p.76) uma carga vertical deforma o conjunto para os lados, logo a simples inserção de um cabo de aço tensionado nas bases não resolve a instabilidade do conjunto e leva à uma indesejável deformação. Embora os encaixes precisos produzidos pela fabricação digital revelem uma estrutura estável (dispensando os amortecedores) há a necessidade da compressão do conjunto próximo à normal.

Figura 5.36 *Feragens efetivamente usadas para tensionar as duas curvas.*
Foto: autor

Porém ao instalar o cabo de aço, teremos um esforço equivalente ao de uma carga vertical, que levará à deformação lateral do conjunto.

A solução é a instalação de tensores a partir do elemento central (*keystone*)¹ tracionados pela base com parafusos reguláveis. Isso transfere a carga vertical para as paredes, limitando a deformação do arco.

Figura 5.37 *Corte longitudinal mostrando o posicionamento dos cabos tensionadores*
Ilustração: autor

Figuras 5.38 a 5.40 *Etapas de montagem*
Fotos: autor

1. A chave ou fecho que trava a estrutura, é o componente (aduela) central de um arco ou de uma abóbada. Nota do autor

Figuras 5.41 a 5.45 *Peça acabada*
Fotos: autor

Figuras 5.46 e 5.47 Peça acabada
Fotos: autor

Figuras 5.48 Fixação na base
Foto: autor

Avaliação - O processo revelou-se adequado ao objetivo inicial e o resultado pode ser considerado satisfatório. O desenho proposto foi mantido na íntegra, sem a necessidade de ajustes significativos. Entretanto algumas questões importantes foram expostas durante o processo:

- a qualidade da matéria prima produzida no Brasil é de baixa qualidade, o que provocou rupturas na colagem das lâminas dos compensados. Para a obtenção de uma chapa de 60mm, foram utilizadas duas chapas de LVL que não corresponderam às exigências dos esforços aos quais foram submetidas, causando rupturas frequentes nas folhas e não nas superfícies coladas, demonstrando que o problema está na má qualidade das lâminas e da colagem utilizadas.
- Os encaixes entre as peças foram precisos o suficiente para dispensar os amortecedores, porém a qualidade das chapas fez com que alguns encaixes rompessem na linha de corte da CNC, exigindo recolagem com adesivo PU.
- a dificuldade de obtenção de ferragens apropriadas como as produzidas pela Jakob e Carl Sthal, outrora disponíveis no Brasil, fez com que substituições menos funcionais fossem adotadas, dificultando o trabalho de montagem e exigindo ajustes no desenho.
- A leveza do conjunto surpreendeu positivamente, comprovando que o volume de material necessário para a rigidez do conjunto é baixo e que, com o uso de placas de alta qualidade, a tecnologia laminada justifica maiores investigações formais e de desenvolvimento de produto.

Figura 5.49: *Casca contínua*
Ilustração: autor

Figura 5.50: *Cavername*
Fonte: Elephant Boatyard

Figura 5.51: *Esqueleto de baleia azul*
British Museum. Foto: autor

Figura 5.52: *Pórtico sobreposto em Capela alpina Vordere Niedere, Cukowicz Nachbaur, Andelsbuch, 2011 (ver fig 4.12)*
Fonte: Konrad Merz (ver anexo 3)

5.4 Catenária com seção planificada

Conceito - Uma das técnicas mais antigas e tradicionais, o uso de cavilhas e cunhas para ligar elementos, pode ser também uma das formas mais contemporâneas de montagem de componentes com baixa energia aplicada. Através de lâminas de compensado finas e leves, pode-se construir pórticos bastante rígidos, com baixa complexidade e alto potencial criativo.

Em uma superfície contínua, a inserção de rasgos e aberturas produz efeitos cenográficos dramáticos (Igreja da Luz e Ronchamp, fig 4.9 e 4.11), e são tratamentos de subtração de eficiência comprovada. Superfícies contínuas obtidas com a somatória de pórticos estruturais, que atuam como uma Superfície Ativa combinada com uma Seção Ativa na concepção de Engel, podem produzir efeitos similares, com aberturas aleatórias ou ritmadas, acompanhando movimentos de penetração da luz solar, astros ou outros fenômenos.

Aqui as analogias são muitas, desde as costelas de proteção torácica das baleias e da maioria dos vertebrados, até a construção naval tradicional, que certamente emprestou referências análogas dos mesmos animais. A partir dessas observações, notamos também que essas estruturas tendem a ter sua maior dimensão de perfil junto ao ápice da curva, ao contrário das estruturas em arco tradicionais onde a base tende a ter maior seção, transferindo a carga incidente de forma mais dispersa. Por essa razão, o uso de pórticos com a característica extraída da analogia animal faz mais sentido quando usada como casca, com superfície contínua e ativa. (ver anexo 3)

Figura 5.53 *diagrama de corte e furação*
ilustração: autor

Figura 5.54 Geometria construtiva do arco catenário. Ilustração: autor

Desenho - O traçado construtivo dessa catenária utiliza o eixo base (pg 85) de todos os modelos deste projeto, com a variação de seção proposta pela referência orgânica das costelas torácicas. A fabricação parte de um modelo concebido com uma geometria de cinco eixos tangenciais, que unidos tem uma aproximação com o arco catenário base.

Essa construção foi elaborada em um aplicativo de desenho 2D e transferida para o aplicativo *Rhinoceros*, transformada em sólido, com espessura de 30mm e exportada para o *Fusion 360*. Nesse aplicativo foram inseridos os dados de corte, tipo de fresa, rotina, material para corte e agrupamento para aproveitamento de chapa, que resultou em um cálculo aproximado de tempo de corte por chapa.

Fabricação - Foram utilizadas duas chapas de compensado de virola e pinus, madeiras de baixa densidade e de baixa resistencia ao corte. As peças resultantes foram separadas das chapas e receberam acabamento em lixadeira de cinta, com proteção de stain incolor. O processo de perfuração e inserção das cavilhas foi feito através de um furo com fresa de 14mm para uma cavilha de eucalipto de 15mm inserida por pressão. A técnica contemporânea recomenda a redução do teor de umidade para 4%, prevendo uma expansão após a recuperação natural do teor de umidade do ambiente. Não foi utilizada aqui por falta de equipamento adequado de redução e controle de umidade.

A perfuração angular em 45°, com as cavilhas em sentidos opostos, impede a separação das placas e qualquer outra movimentação. Não foram feitos ensaios de ruptura porque não cabem nas premissas deste projeto.

Figuras 5.55 a 5.59 *Processo de fabricação e montagem.*
Fotos: autor e Daniela Fassina

Figura 5.60: *Pórtico contínuo com elementos sobrepostos*
Ilustração: autor

Montagem - O encaixe entre os componentes precisa ser executado de forma a permitir a montagem e a eventual desmontagem e para isso as cavilhas são inseridas nas fendas sem cola, como elemento removível. Se as cavilhas forem secas com teor de umidade abaixo do teor das peças a serem unidas, a ligação ficará mais rígida, devido à expansão do material inserido. Na falta de instrumentação industrial o processo pode ser todo manual para a inserção das cavilhas, reduzindo custos sem afetar a qualidade do produto. Para isso é necessário um gabarito angular para o apoio da furadeira, que pode ser retirado após o início do canal do furo.

Figuras 5.61 a 5.66: *Fabricação e montagem final*
Fotos: autor e Marta Aflalo

Figuras 5.67 a 5.70: Peça final com base
Fotos: autor

Figuras 5.71 a 5.73 : *Peça final*
Fotos: autor

Avaliação - Entre os quatro sistemas investigados, o processo das placas planas com cavilhas foi o mais preciso e realizado sem nenhum desvio da concepção original. Há pouca investigação tecnológica nesse processo, mas talvez por isso mesmo seja de grande interesse em aplicações onde a autoconstrução seja desejável, ou como produto de prateleira configurado para usos múltiplos e padronizados. Com modulação predefinida resulta em pórticos eficientes e rígidos que se valem de ferragens convencionais ou chapas de ligação quando rótulas e outra conexões forem exigidas para vãos maiores.

O peso considerável é resultado da grande massa de material utilizado, desejável por sua maior resistência ao fogo e concentração de CO₂ sequestrado.

Figura 5.74 *Cabana Dorze, Etiópia.*
Fonte: <http://ker-ezhiethiopia.com>

Figuras 5.75 e 5.76 *Desenho, corte e foto da nervura principal de um filodendro.*
Fonte: autor

5.5 Catenária laminada

Conceito - A natureza é pródiga em revelar formas estruturais elásticas, capazes de suportar grandes pesos, mas não necessariamente estáticas. Vide as teias de aranha, folhagens em geral e cascas. As folhas e cascas servem de analogia para quase todas as formas de cobertura ao longo da história da humanidade, ainda presentes nas sociedades mais primitivas.

A indústria automobilística e a de chapas em geral sabe de longa data o quanto os vincos enrijessem uma chapa plana de grande área. As folhas também utilizam essa estratégia para suportar grandes cargas de vento e água. Observando folhas da família dos filodendros em geral (araceae), percebe-se a grande capacidade dessa folha, que chega a mais de um metro de comprimento, de perdurar em clima tropical de condições climáticas extremas.

Esse conceito foi desenvolvido na suposição de que o elemento central da estrutura da folha (nervura principal), aumenta a capacidade de uma estrutura em forma de casca de receber e distribuir cargas. Um corte da folha mostra que a maior resistência é dada pela casca (pele) que circunda a nervura, que por sua vez é constituída por vasos condutores de seiva, sem papel estrutural. Logo, uma forma que seja contínua, com componentes segmentados, faz sentido quando a forma que se pretende dar ao conjunto deve ser arqueada e rígida ao mesmo tempo. A laminação não é uma técnica exatamente nova porém, os adesivos e as fibras agregadas constituem um eixo de pesquisa pouco explorado, permitindo caminhos estruturais leves, extremamente rígidos e articuláveis. Uma combinação de casca com veios rígidos configurando pórticos diverge radicalmente das estruturas anteriormente propostas. A figura abaixo mostra esquematicamente que a nervura representa a parte rígida, enquanto as abas podem variar sem comprometer a estabilidade geral do conjunto.

Figura 5.77 Diagrama das cascas propostas Fonte: autor

Desenho - Isto posto, ficou claro que o desenho dependia de decisões de fabricação: como obter um componente leve, extremamente rígido, que repetido poderia formar uma peça articulada na construção e rígida no comportamento. A laminação de folhas finas (aqui a referência é o broto de bambú, constituído por diversas camadas

finas) com um adesivo flexível e particularmente forte poderia ser a solução. Alguns testes de laminação com lâminas de 1mm e cola de PVA mostraram pouca resistência e a espessura da madeira contribuiu para trincas durante a prensagem.

Fabricação - A solução foi empregar folhas de madeira mais finas, de 0,7mm, coladas com adesivo de poliuretano (PU) e prensadas em um molde rígido o suficiente para deformar as sete lâminas cruzadas necessárias para os 4mm finais desejáveis. A madeira escolhida foi o cedro, pela combinação de custo e benefício, e pela homogeneidade das folhas encontradas no mercado. lâminas de madeira de pré-composto (fibras de uma ou mais madeiras arranjadas mecanicamente com fibras no sentido longitudinal) não permitem colagem cruzada nos dois sentidos, reduzindo a resistência do componente, em um dos sentidos.

O adesivo precisa ser rápido, com tempo suficiente em aberto e com reação rápida para liberar o molde para uma próxima prensagem. Após seguidos testes com adesivos PU encontrados no mercado, a solução foi utilizar um monocomponente produzido pela Jowat, o Jowapur 681.40, indicado para madeiras engenheiradas.

Figuras 5.78 a 5.80 Molde, construção do molde e componente a ser laminado.
Ilustração: autor

Figuras 5.81 e 5.82 Elevação lateral e ampliação do ápice da catenária.
Ilustração: autor

Fabricação - As imagens mostram o processo de fabricação das "telhas", iniciando com a preparação do molde, a aplicação do adesivo nas lâminas de cedro, o fechamento do molde, a prensagem mecânica, o corte na serra circular, um segmento pronto e o conjunto de componentes mínimo para formar a nervura.

Figuras 5.83 *Fabricação - laminação e corte.*
Fotos: Daniella Fassina

A conexão entre os componentes foi projetada com o uso de parafusos de aço inox polido, arruelas de inox, uma arruela de silicone para acomodar a curvatura e uma porca com travamento tipo *parlock*. A segmentação dos componentes obedece à curvatura da catenária e diminui à medida que se aproxima do ápice, sempre defasada com as placas opostas, permitindo uma montagem contínua da base para o alto. Essa sequência de montagem é o padrão desejável para ser compatível com as premissas adotadas.

Figura 5.84 *Catenária completa, detalhe e fixação dos componentes.*
Ilustrações: autor

Durante a confecção dos protótipos ficou aparente a necessidade de redução dos processos de fixação das peças, principalmente no ápice do arco, onde os parafusos estão muito próximos. Várias alternativas foram estudadas e novamente a observação das estruturas orgânicas indicou alternativas para essa redução. Parece natural que a observação de elementos compostos que apresentem rigidez na unidade e flexibilidade no conjunto indiquem um caminho viável para pesquisa. Entre os muitos esqueletos (estruturas) com essas características, as serpentes formam uma classe a parte, onde as vértebras são extremamente rígidas, mas as costelas extremamente flexíveis, para acomodar grandes animais capturados. A estratégia estrutural das serpentes tem no comprimento longo de seu corpo seu grande trunfo porque, embora a movimentação entre as vértebras seja limitada, a grande quantidade de vértebras encadeadas produz virtualmente qualquer movimento elástico desejável. A analogia com a coluna dorsal da primeira estrutura estudada (Catenária dorsal, pg. 86) pode ser entendida como uma inversão de função estrutural: enquanto a primeira baseia-se em um conjunto desenhado para funcionar sobretudo à compressão, neste exemplo é a tração que determina o desenho do conjunto. As vértebras estão encaixadas e, para evitar o descolamento, possuem uma cavidade que as impede de se separarem quando tracionadas.

Figura 5.85 Detalhe de *esqueleto de Boa arborea*.
Fonte: WitmerLab at Ohio University

Figura 5.86 Esqueleto de *Phyton*
fonte: Dorling Kindersley / uig / science
photo library

Como reproduzir essas características e, ao mesmo tempo, reduzir a quantidade de componentes e operações, coloca um desafio interessante, que pressupõe tornar um material flexível, sem que ele perca a rigidez necessária para suportar cargas através de seu eixo. Lembramos que nesse modelo, é justamente a curvatura produzida na superfície da telha que a torna rígida e capaz de distribuir a carga uniformemente ao longo do eixo virtual da catenária.

A solução técnica adotada foi a de reduzir o número de componentes para reduzir também as etapas de montagem. Por outro lado, ao acrescentar uma série de cortes na seção curva das telhas, permite-se a curvatura limitada das peças, com uma significativa curvatura ao longo do comprimento total. Esse expediente pode ser observado em uma estrutura desenvolvida pelo programa *Design + Make*, da AA (*Architectural Association*) em *Hooke Park*, Inglaterra, pelo aluno En-Kai Kuo em 2017, criando lâminas em parte de troncos e dobradas com vapor.

No modelo proposto neste projeto, não há a necessidade do uso de vapor para confeccionar as curvaturas porque as fendas criadas já produzem a curvatura necessária.

Figura 5.87 Detalhe da estrutura da serraria de Hooke Park, En-Kai Kuo, 2017.
Foto: autor

Figuras 5.88 Diagramas e ilustração das fendas nas telhas.
Ilustrações: autor

Figura 5.89 Corte das fendas
Foto: Daniela Fassina

Figura 5.90 Catenária completa
e ampliação do ápice
Ilustração: autor

As telhas produzidas foram cortadas com 23cm x 28,5cm, com 12 fendas centralizadas, separadas por 2cm cada. A espessura do corte foi determinada pela serra utilizada, para cortes delicados, e não afeta significativamente a flexibilidade desejada ou a rigidez do conjunto, uma vez que as abas e as curvas tem funções estruturais distintas. As telhas são ligadas pelos parafusos e arruelas propostos inicialmente e a sequência de montagem definida é da base ao topo, primeiro com a casca inferior e em seguida com a casca superior, completando a construção.

Figura 5.91 Detalhe dos cortes aplicados
Ilustração: autor

Figura 5.92 *Zippered Wood*, 2019
Foto: HiLo

Figura 5.93 *Catenária deformada*
Foto: autor

Montagem - De certa forma, o aumento da flexibilidade do conjunto era esperado, mas ultrapassou, em muito, o desejável para as premissas projetadas, gerando uma instabilidade total em todos os sentidos. Esse efeito é muito interessante porque permite curvas nos dois sentidos e até uma certa deformação no eixo do conjunto, resultando em cilindros e espirais de forma análoga ao trabalho *Zippered Wood* da *School of Architecture and Landscape Architecture, University of British Columbia* no Canadá, em que elementos lineares em madeira de aproximadamente 5cmx10cm, a barra padrão no sistema *wood frame*, foram usinados e reconectados em formas curvas em ambos os sentidos. Naturalmente, ao emular o sistema estrutural de uma folha, o resultado obtido teve comportamento muito próximo ao modelo original. (ver anexo 7)

Para recuperar a estabilidade, foi usado um cabo de aço tensionado ao longo da normal, por dentro do cilindro. Isso porém não resolve o problema da rigidez porque, em sendo utilizadas peças idênticas, a tendência é a de formar uma elipse e, no extremo da tensão, um círculo ou uma espiral. Nesse caso, as possíveis soluções seriam duas: empregar a inserção de um elemento rígido (metal, madeira, laminados compostos) ao longo da cinta ou fazer as fendas de forma a controlar a curvatura, com mais fendas nos raios mais fechados e menos fendas nos raios mais abertos. Na segunda opção cada peça teria que ser cortada de forma a permitir uma curvatura compatível com a posição na catenária, de forma que a quantidade e a largura dos cortes determinasse o limite máximo de curvatura em cada sentido. Isso foi testado enrijecendo uma peça em diferentes seções para adquirir maior controle sobre o posicionamento e a quantidade de cortes em cada face do tubo, um trabalho insano (tentativa e erro) se for feito através de ajustes manuais, mas perfeitamente viável através de um modelo paramétrico computacional, o que não interfere no sistema de fabricação final.

Figura 5.93 a 5.95 Deformação comparada com perfil projetado e detalhes.
foto: autor

Figura 5.96 Diagrama de esforços Rhinoceros
imagem: autor

Na imagem ao lado fica claro que o tensionamento interno, tendo como âncoras as duas bases, provoca um abaulamento no arco, que tende a uma elipse por conta da distribuição homogênea de tensão ao longo do percurso (fig 4.27, pg.76). O sistema dos cortes mostrou-se eficiente como recurso de fabricação e com o correto domínio da técnica demonstra possibilidades reais de correção da distribuição de tensão ao longo da normal, aproximando-se da catenária idealizada. Para isso a quantidade de fendas deverá ser diferente em cada seção, começando com doze fendas no ápice, tendendo a zero na base, sendo o ponto crítico da inflexão a seção 7, em relação à base.

O aumento da rigidez da catenária foi feito através de um elemento de madeira inserido na parte tubular da seção, articulado em pontos próximos da geometria definida pela extensão máxima de segmentos retos aplicados à catenária. Com quatro segmentos é possível armar uma estrutura interna e medir a resistência aproximada que cada seção determina sobre a estrutura articulada inserida. Essa observação é empírica, mas aplicando-se o aplicativo Karamba, mencionado anteriormente, é possível medir as tensões reais da catenária e redistribuir as fendas ao longo do conjunto.

Figura 5.97 Diagrama de esforços Rhinoceros
Imagem: autor

Figura 5.94 a 5.96 Deformação comparada com perfil projetado e detalhes.
foto: autor

Figura 5.98 *Peça final*
Foto: autor

Figuras 5.99 a 5.102 *Peça final*
Fotos: autor

Avaliação - Pela falta de referências análogas, esse sistema proposto foi um desafio à metodologia por trás desta tese porque apresenta um conjunto de variáveis muito amplo e não referenciado. A laminação em si já introduz aspectos não convencionais de construção onde a matéria prima (folhas de madeira/cedro), a ligação entre as lâminas (adesivo PU), a forma escolhida e a pressão aplicada ao molde constituem território pouco explorado para essa finalidade. O dimensionamento das "telhas" e a ligação entre esses componentes, somados aos cortes para o aumento da flexibilidade, criaram comportamentos de difícil antecipação, em função da grande quantidade de variáveis concorrentes. Por outro lado, esse método insere-se dentro do mais puro espírito científico, onde a observação e a constatação dos resultados permite inferir caminhos plausíveis de correção de rumo. É certamente a pesquisa que mais abriu portas para outros desenvolvimentos a partir de recortes específicos com menos variáveis.

Embora a estabilidade tenha sido o grande desafio a ser resolvido de forma mais eficiente, a solução proposta atendeu a todas as premissas e deve ser explorada individualmente como sistema autônomo. Plasticamente é o objeto mais intrigante e mais contemporâneo do conjunto pesquisado porque vai muito além do papel esperado para o uso construtivo da madeira. (ver anexo 6)

Figuras 5.103 a 5.105 Origami Miura-Ori.
Modelo e foto: autor

Figura 5.106 Encaixe "dovetail"
europeu e japonês.
fonte: Advancing wood architecture

5.6 Catenária dobrada

Conceito - Dobraduras representam o ápice da simplicidade e da sofisticação técnica ao mesmo tempo. Greg Lynn explora esse conceito de forma expandida no texto "Curvilinearidade arquitetônica: o dobrado, o maleável e o flexível", com uma visão complexa sobre a dobra como superfície cuja continuidade aparenta uma contradição, representada pelos vincos estruturais. A dobra é um elemento técnico para responder às características da materialidade e exequibilidade da sua construção.

Como modelagem, as dobraduras em papel derivadas do tradicional Origami japonês (*Miura-Ori*), são um bom ponto de partida exploratório para avaliação de estabilidade, complexidade e forma de estruturas autoportantes.

A dobra em madeira pode ser resolvida com várias técnicas diferentes mas, considerando as premissas deste projeto, as placas fazem mais sentido como material estrutural pela leveza e dimensionamento dos painéis. Entretanto há bem pouco tempo a conexão entre as placas era um desafio que só poderia ser transposto por cantoneiras metálicas ou fixações complexas cuja conexão era frágil para uso arquitetônico permanente. A pesquisa com as chamadas *folded plates structures* tem início por volta do começo do século XX, em concreto e metal. A pesquisa nos laboratórios de construção em madeira do IBOIS, em Lausanne, feita por Christopher Robeller e Yves Weinand, mostrou que é possível desenvolver conexões robustas derivadas das juntas em rabo de andorinha (*dove tail*, em inglês) utilizadas em mobiliário, para conexão de placas laminadas. São eficientes na transferência de cargas entre as placas e também fáceis e precisas na montagem de formas irregulares segmentadas. (ver anexos 2 e 4)

Desenho - A definição de arquitetura de placas dobradas (*folded plates*) especifica que são estruturas de superfícies ativas autoportantes, sem colunas, de cascas segmentadas para grandes vãos, com espessura relativa fina.

Tradicionalmente as juntas sempre foram feitas com ferramentas manuais como o formão, mas enquanto a cultura europeia desenvolveu juntas em que o encaixe acontece em apenas um eixo, as juntas japonesas (*Nejiri Arigata*) permitem encaixes favorecendo os dois eixos (fig 5.106). Essa diferença permite que peças com três bordas possam ser encaixadas ao mesmo tempo, solucionando simultaneamente a questão da irregularidade da união de placas dobradas e a fabricação digital.

Para as juntas fabricadas digitalmente, existem outros detalhes, que podem facilitar a montagem mas dificultar a fabricação, isto é, quando o equipamento de usinagem atua somente em três eixos, x, y e z, certos ângulos não são possíveis de serem usinados fazendo com que o "rabo de andorinha" (*dove tail*) seja plano e não inclinado como as desejáveis juntas japonesas. As juntas angulares necessitam eixos adicionais ou cabeças de usinagem que giram livremente, comumente encontradas em braços robóticos mais sofisticados. As mesas planas permitem um grande número de operações de usinagem e podem ser programa-

Figuras 5.107 Telas do Rhinoceros com as análises formais e de comportamento aplicadas à catenária filamentada. Fotos: autor

das para tal, mas em casos específicos de juntas angulares recorre-se à complementação manual do trabalho com serras manuais ou até mesmo o tradicional formão.

O professor e Phd Christopher Robeller elaborou um algoritmo específico, o TPS (*Timber plate structures*), para a construção de estruturas com placas baseadas no sistema *Nejiri Arigata*, com conectores em "rabo de andorinha" que podem ser controlados e analisados geométricamente, supondo um desempenho estrutural do conjunto com a incidência de carga vertical homogênea. O TPS pode ser aplicado a modelos variados e a forma das placas ajustada para infinitas possibilidades paramétricas e analisada sob cargas aplicadas, entre outros tantos parâmetros. Existem limitações de ângulos, quantidade e posicionamento de pinos de ligação, assim como ângulos de encaixe. A análise paramétrica é o grande salto de suporte projetual incorporado à prática arquitetônica recente e permite antecipar potenciais conflitos geométricos e construtivos. Após o uso desse tipo de apoio, fica difícil imaginar a evolução formal e construtiva daqui para a frente sem o uso de algoritmos analíticos.

Figuras 5.108 e 5.109 Planta e elevações da catenária dobrada 4x4 dobras. Ilustração: autor

Figura 5.110 Diagrama dos encaixes "dovetail" aplicados em todas as bordas.
Fonte: Advancing wood architecture

Figura 5.111 Comparativo entre estrutura com encaixes e estrutura com fixação por ferragens.
Ilustração: autor

Figura 5.112 Chapas de 15mm com 72 componentes para recorte em CNC
Ilustração: autor

Fabricação - A fabricação impõe certas demandas que tornam-se verdadeiros obstáculos a curto prazo, sendo o maior deles, a exigência de cortes em ângulos determinados para prover os encaixes dos "rabos de andorinha" de precisão e eficiência. Como visto, as fresas CNC para madeira raramente têm os 5 eixos de rotação que permitem os cortes angulares que o sistema exige, especialmente quando a sequência de montagem só pode ser feita em uma única posição. É a combinação entre a retenção necessária à resistência dos encaixes e a forma como são montados que demonstra a inteligência e eficiência estrutural do sistema. As conexões recortadas na própria madeira utilizam a forma do próprio componente do edifício para transferir cargas. Este conceito é chamado de "fixação mecânica integral".

Montagem - Uma alternativa aos encaixes e que também tem sua eficiência comprovada são as ligações mecânicas através de chapas dobradas em ângulos específicos ou chapas articuladas com dobradiças, que também estabilizam o conjunto e permitem movimentação de abertura e fechamento da forma sanfonada.

Uma premissa desta tese é a de explorar os recursos viáveis e acessíveis de fabricação, sendo assim, a opção com as cantoneiras metálicas torna essa construção possível, embora não seja a mais "pura" e desejável. Dentro desta ótica, a substituição do corte angular variável por um padrão ortogonal em 90° determinou o prosseguimento da fabricação e montagem do protótipo demonstrativo. Assim, as peças recortadas em compensado de paricá de 15mm, escolhido pela disponibilidade e boa relação entre a resistência e o peso do material, foram dispostas prevendo o melhor aproveitamento das chapas e a angulação ideal das fibras para o bom desempenho estrutural. O bom manejo da sequência de recortes implica em uma maior velocidade e menor tempo de corte, consequentemente, menor custo. Para a conexão foram escolhidas dobradiças de inox de 50mm x 15mm com dois furos em cada aba.

Figura 5.113 Pavilhão temporário, Manuel Bouzas Barcala and Clara Álvarez Garcí, Espanha, 2017
Fonte: <https://www.archdaily.com/875859/this-wood-pavilion-is-supported-entirely-through-origami-folds>
archdaily

Figuras 5.114 a 5.121. Sequência de montagem com as 5 tipologias de formas recortadas: avaliação dos pontos de conexão ideais para evitar superposição; fixação das dobradiças em sequência; teste de geometria e precisão através do sanfonamento dos conjuntos; conexão dos três conjuntos compostos por bases simétricas e ápice de ligação.

Fotos: autor

Figuras 5.122 a 5.124. *Peça final.*
Fotos: autor

Avaliação - Uma questão sintomática que impregna o processo científico é a paralização produzida por uma reflexão fora das condições ideais. Todos os processos ensinam algo, se forem observados atentamente. Nesse modelo, a falta de um braço robótico, que permitiria a corroboração de um desenho já testado pelo prof. Robeller, conduziu a um modelo não testado nessa configuração catenária, tornando mais relevante os resultados obtidos. O uso das dobradiças permitiu comprovar a possibilidade real do sanfonamento integral das peças cuja forma parece contraintuitiva, e ainda assim demonstrar estabilidade e retenção formal.

A evolução desse processo para o sistema de *folded plates* proposto pelo TPS é o caminho natural, nem tanto pela forma, mas pelo domínio da ligação sem parafusos, que atenderia às premissas de forma mais significativa e pura.

Figuras 5.125 e 5.126. *Peça final.*
Fotos: autor

Figura 5.127 Arco sanfonado
Foto: autor

Conclusão

Esse tipo de exercício poderia se prolongar indefinidamente, e de fato ele o faz, na medida em que, uma vez aplicado a projetos, ele permite um aprendizado dentro do próprio processo e a cada derivação descoberta. A tentativa de aplicá-lo a um projeto real é grande porque o processo nos leva a pensar em escala, ventilação, iluminação, proteção da estrutura, acabamentos e outros tantos detalhes pertencentes à disciplina, detalhes que amplificam o discurso formal e os atributos iniciais. Não cabe aqui esse exercício, embora algumas especulações tenham sido exercitadas para verificação do conceito e das escalas possíveis, porque já é possível tirarmos conclusões sobre as narrativas e sobre a eficiência delas, sobre a beleza intrínseca de cada caminho, e sobre a infinidade de soluções plausíveis a partir de uma forma simples. O fato da forma conter uma beleza própria derivada de sua natureza ajuda muito, mas a cada solução construtiva encontrada nos flagramos imaginando a continuidade do processo, a nave que se forma naturalmente, a grande caverna ancestral e as interferências racionais sobre a natureza da forma.

A observação do entorno, a contextualização, as preexistências e todos os fatores que antecipam o projeto emitem os sinais necessários para a tomada de decisões que se anuncia e que determinarão as melhores escolhas. As quatro demonstrações apresentadas carecem dessas informações e são gratuitas sem a existência de um local, e julgar uma como mais apropriada do que a outra não faz nenhum sentido. Está localizada em um sítio próximo a um centro urbano, com recursos? Temos equipamentos construtivos de última geração disponíveis? Podemos substituir a matéria prima ensaiada por outra, similar? Essas respostas são objetivas na medida em que o processo tenha sido claramente compreendido e que as escolhas derivadas dessas preexistências estejam contingenciadas a elas. Somente a compreensão e o domínio das informações essenciais pode determinar a qualidade de um projeto e das suas escolhas. Glenn Murcutt⁸ (*Pritzker Prize* 2002), arquiteto australiano reconhecido pela sua leitura do ambiente, estabeleceu um dos níveis mais elaborados de pré-estudo do sítio e da linguagem construtiva decorrente dessa análise. A suposição de que a soma das referências locais e ambientais define um projeto é a marca de sua metodologia, que atrai estudantes e arquitetos para *workshops* exaustivos sobre o tema.

Isto posto podemos considerar que a forma deriva, em grande parte do método empregado para antecipá-la, mas isso não exclui o experimental, o especulativo, já que a dúvida é sempre melhor do que a certeza e a busca por respostas é a jornada mais prazerosa em qualquer processo. Vivemos em uma era em que as soluções prontas vem travestidas de verdades absolutas e dispensam questionamentos, ou uma segunda leitura.

A pesquisa é feita de perguntas e as perguntas que antecedem esse projeto são questionamentos reais que hoje impedem arquitetos de correr riscos pela

Figuras C.1 *Magney House*, Glenn Murcutt, New South Wales, Australia, 1984
Foto: Anthony Brownell.

1 FROMONOT, Françoise. Glenn Murcutt: works and projects. Thames and Hudson, Londres, 1995.

falta de respostas. Para os arquitetos em geral, pouco afeitos ao uso da madeira por falta de conhecimento básico, cinco questões povoam as fantasias dos ignorantes: e o fogo? e os insetos? e o apodrecimento pela água? e o desmatamento? e o desenho?

As quatro primeiras perguntas estão respondidas por evidências científicas comprovadas e normatizadas, mas a quinta, aquela que se refere à capacidade de domínio da forma e das técnicas para atingí-la é a endereçada por esta tese, que não tem a pretensão de constituir um receituário de projeto mas libertar o pensamento para que o processo siga seu curso e determine as melhores opções em cada etapa.

Uma descoberta no processo da confecção deste documento foi a de como integrar o raciocínio biomimético de forma não caricata, em um ponto decisivo que não afeta o conjunto e não reproduz o que Venturi, Scott-Brown e Izenour (Aprendendo com Las Vegas) chamam de "arquitetura pato", aquela que reproduz literalmente a fonte de referência. A coluna vertebral é um ponto de partida de um sistema funcional e esconde-se no interior de um componente que tem autonomia formal, que por sua vez dilui-se no conjunto arquitetônico.

Poderia ser mais fácil realizar o arco catenário, proposto em 5.2.1, através de uma única viga laminada curva –e existe tecnologia para isso–, mas o transporte e o erguimento dessa peça tornam essa solução em um pesadelo logístico desnecessário.

Podemos pregar ou colar as chapas em madeira da solução 5.2.2, mas não teríamos investigado um caminho de menor impacto ambiental e mais intrigante como o das cavilhas propostas.

A laminação proposta na alternativa 5.2.3 abre as portas para uma vasta pesquisa sobre laminados leves, próximos ao raciocínio do LVL (capítulo 1.6), que permite que uma única peça moldada possa ser cortada e composta de formas diferentes, transportada e manuseada com facilidade, com resistência e durabilidade surpreendentes.

As placas dobradas, 5.2.4, até há pouco consideradas apenas um exercício formal desprovido de credibilidade entre os especialistas, assume a dianteira na pesquisa de formas elaboradas com ligação mecânica entre peças, evitando ferragens complexas que, via de regra, comportam-se como o elo frágil nesse tipo de sistema. Esse exercício apresentou grandes dificuldades no arranjo das abas de encaixe entre as peças, demonstrando que entre o desenho e a fabricação ainda há um longo processo de decisão que não pode ser terceirizado pois faz parte do desenho final e do aspecto pretendido.

A consistência na densidade e no comportamento faz com que a importância do desenho seja amplificada e que soluções baseadas em geometria ganhem terreno sobre as soluções baseadas na força do elemento de amarração. Sem esse tipo de exercício essas descobertas não seriam possíveis e pode-se imaginar o quanto a disciplina poderia se beneficiar desses procedimentos. Os compromissos diários dos profissionais da área fazem com que

as decisões de projeto sejam formalistas e repetitivas, dentro de tecnologias obsoletas e de baixo risco.

A transgressão e a ruptura favorecem a evolução e confrontam diretamente o domínio do mercado imobiliário e a legislação no desenho das cidades.

O uso da madeira como matéria prima contemporânea, renovável e de baixo impacto ambiental é obrigatório, e caminha inexoravelmente para um uso cada vez maior e mais institucionalizado. As escolas ainda não incorporaram essa disciplina no currículo por falta de professores e técnicos especialistas e os profissionais também sofrem da mesma falta de conhecimento e treinamento. Existe um enorme potencial para o ensino do uso dessa matéria prima nas escolas e nos cursos de especialização, o que pode mudar a profissão de forma significativa e permanente, na medida em que chama a atenção para a impermanência da tecnologia e da linguagem.

Essa foi outra descoberta significativa do processo, onde o aprendizado de novos aplicativos digitais –pelo menos quatro–, novos equipamentos e novas técnicas deixa claro que os profissionais de hoje terão que se readaptar e se reinventar continuamente, libertando-se dos dogmas modernistas e das tecnologias obsoletas que os mantêm vivos e produtivos.

Muitas questões abordadas nesse trabalho merecem desenvolvimento mais aprofundado e são da maior importância, sobretudo nos tempos atuais. A questão florestal, do manejo ao produto industrial, merece um trabalho de fôlego para investigar os custos que fazem o produto florestal, nativo ou plantado, custar tão caro para as indústrias transformadoras, fazendo com que só aquelas que são donas de toda a cadeia possam ser de fato competitivas. As muitas tecnologias de baixo carbono para transformação são adotadas como premissas para esta tese, mas nem de longe representam o universo de soluções de conexão e encaixe praticadas globalmente. A questão do tempo, rapidamente levantada no final do capítulo 2 (2.2 O tempo da forma e do processo) também merece longa reflexão, já que influencia a linguagem, o processo, o passado e o futuro da construção. Futuro esse que exige produtos com tecnologia de baixo carbono, sem desperdício, a custos sociais acessíveis, grande volume de produção, flexibilidade espacial e linguagem contemporânea, predicados indispensáveis para um mundo melhor. A observação da natureza e a biomimética, citada várias vezes ao longo desse texto, escondem chaves importantes para entender o mundo à nossa volta e compreender que a nossa história de afirmação de espécie não precisa ser construída na dominação da natureza, mas sim na convivência e no aprendizado que está sendo oferecido pela simples observação. O dispêndio energético nos processos e na fabricação pode ser revisto e continuamente apurado, buscando respostas que combinem tecnologia e acessibilidade, alterando as variáveis da equação do progresso social para uma fórmula simplificada e menos monopolista.

Esses são apenas alguns dos temas de pesquisa que não foram aprofundados neste trabalho porque escolhas foram feitas e o foco direcionado para o cumprimento das proposições iniciais, antes de mais nada.

São temas excitantes que devem ser abordados com um viés humanista e original que permita uma revisão do tipo de informação que hoje determina a formação da disciplina e da profissão do arquiteto.

Será de grande importância para os cursos de arquitetura que se pretendam sérios, que abracem o mais amplo universo da atividade profissional –a decisão sobre tudo o que envolve a escolha da matéria prima, da fabricação e da montagem– e não se contentem com a abordagem tradicional, aquela em que as decisões realmente importantes para o nosso presente contexto estão excluídas do processo. O aspecto formal é parte integrante do projeto, mas como este trabalho empenhou-se em demonstrar, não é a fonte primária da qualidade de uma construção e os novos tempos estão clamando por caminhos que garantam não só a qualidade dos projetos, mas a sobrevivência da espécie humana, com dignidade e reconciliada com o planeta.

I Love Beginnings.

by Louis Kahn

I love beginnings. I marvel at beginnings. I think it is beginning that confirms continuation. If it did not - nothing could be or would be. I revere learning because it is a fundamental inspiration. It isn't just something which has to do with duty; it is horn into us. The will to learn, the desire to learn, is one of the greatest of inspirations. I am not that impressed by education. Learning, yes; education is something which is always on trial because no system can ever capture the real meaning of learning.⁹

⁹ EU AMO COMEÇOS. por Louis Kahn

Eu amo começos. Eu me maravilho com os inícios. Acho que é o começo que confirma a continuação. Se não, nada seria ou poderia vir a ser. Eu venero o aprendizado porque é uma inspiração fundamental. Não é apenas algo que tem a ver com o dever; está impregnado em nós. A vontade de aprender, o desejo de aprender, é uma das maiores das inspirações. Não fico tão impressionado com a educação. Aprender, sim; a educação é algo que está sempre à prova, porque nenhum sistema consegue captar o verdadeiro significado de aprender. (tradução: autor)

Fontes Bibliográficas

AFLALO, Marcelo (Org.). **Madeira como Estrutura:** A história da ITA. São Paulo: Paralaxe, 2005. 151 p.

BERGDOLL, Barry, CHRISTENSEN, Peter. **Home Delivery:** fabricating the modern dwelling. New York, MoMA, 2008.

BLUNDELL JONES, Peter. **Peter Hubner:** Building as a Social Process. Estados Unidos: National Book Network, 2007

BOW-WOW, Atelier. **Graphic Anatomy Atelier Bow-Wow.** Japão, TOTO Gallery 2007

BRUNA, P. J. V. **Arquitetura, Industrialização e Desenvolvimento.** 2ª ed. São Paulo: Perspectica, 2002.

C.C. K. KOWALTOWSKI, Doris. **O Processo de projeto em arquitetura:** da Teoria à Tecnologia. São Paulo: Oficina de Textos. 2015. 504p.

CHING, Francis D.K.. **Sistemas Estruturais Ilustrados:** Padrões e Projeto. Porto Alegre: Bookman, 2ª edição 2015.

CONSALEZ, Lorenzo. **Maquetes:** a representação do espaço no projeto arquitetônico. Barcelona: GG, 2015. 111 p.

EISENMAN, Peter. **Autonomy and Will to the Critical,** Estados Unidos: Assemblage 41 (april 2000), MIT Press

ENGEL, Heino. **Sistemas Estruturais,** Madrid, Gustavo Gilli, 2001

DREXLER, Arthur. **The Architecture of Japan,** New York, The Museum of Modern Art of New York, 1955

FLUSSER, Vilém, **O Mundo Codificado.** São Paulo: Editora Cosac Naify, 2007.

FOSTER, Hal, **O complexo arte-arquitetura.** São Paulo, Cosac Naify, 2015

FRAMPTON, Kenneth. **Towards a Critical Regionalism:** Six Points for an Architecture of Resistance, in *The Anti- Aesthetic: Essays on Postmodern Culture.* Port Townsend, Bay Press, 1983

FROMONOT, Françoise. **Glenn Murcutt: works and projects**. Londres, Thames and Hudson, 1995.

GAUZIN-MULLER, Dominique, **Arquitetura Ecológica**. São Paulo: Editora Senac, 2011.

HAYS, K. Michael, **Critical Architecture: Between Culture and Form**. Estados Unidos: Perspecta 21, The Yale Architectural Journal, 1984

HERZOG, T. et al. **Timber Construction Manual**. 3. ed. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007.

HUDERT, Markus, PFEIFFER, Sven. **Rethinking Wood: Future Dimensions of Timber Assembly**. Basel, Birkh

HUNTLEY, H. E. **The Divine Proportion: A Study in Mathematical Beauty** Dover Books on Mathematics. New York, Dover Publications, 1970

KATINSKY, Jlio. **Caminhos do desejo: desenhos de Oscar Niemeyer na FAUUSP**. 2007.

KAUFMANN, H.; NERDINGER, W. **Building with timber – paths into the future**. Munique. Prestel, 2012.

KAUFMANN, H.; KRTSCH S.; WINTER, S. **Manual of Multi-Storey Timber Construction**. Detail Business Information, Munich, 2018.

KIERAN Stephan, TIMBERLAKE James, **Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction**, New York, McGraw Hill, 200.

KRUGER, Abe; SEVILLE, Carl. **Construo verde: princpios e prticas em construo residencial**. So Paulo: Cengage Learning, 2016. 643 p.

LE CORBUSIER, **Por uma arquitetura**. V.27, So Paulo, Perspectiva, 2014.

LENNARTZ, Marc Wilhelm, JACO-FREITAG, Susanne. **New Architecture in WOOD: Forms and Structure**, Basel, Birkhuser, 2016

LEWIS, Paul, TSURUMAKI, Marc, LEWIS, David J. **Manual of Section**, Nova York, Princeton Architectural Press. 2016.

LUMA, Foundation, The. **Jean Prouv: Architecture for better Days**. England, Phaidon, 2017.

- MAYO, Joseph. **Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design**. New York: Routledge. 2015
- MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. **Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things**. New York: North Point Press. (2002)
- MENGES, Achim, SCHWINN, Tobias, KRIEG, Oliver D. **Advancing Wood Architecture: a computational approach**. New York: Routledge. 2017
- MERLEAU-PONTY, **Fenomenologia da percepção**. São Paulo: Wmf Martins Fontes, 2011.
- MONEO, Rafael. **Inquietação Teórica e Estratégia Projetual: Na obra de oito arquitetos contemporâneos**. São Paulo, Cosac Naify, 2008.
- MONTANER, Josep Maria. **Depois do Movimento Moderno: arquitetura da segunda metade do século XX**. São Paulo, Gustavo Gili, 2014
- MOUSSAVI, Farshid, **The Function of Form**. Boston, Actar e Harvard University School of Design, 2009.
- MURCUTT, Glenn; GUSHEH, Maryam. **Glenn Murcutt: Thinking Drawing / Working Drawing**. Tokyo, Toto, 2008.
- NESBITT, Kate. **Uma nova Agenda Para a Arquitetura: Antologia teórica 1965 – 1995**. São Paulo: Editora Cosac Naify, 2006
- PALLASMAA, Juhani. **Essências**, Barcelona, Gustavo Gilli, 2018
- PRICE, W. **Architecture in Wood – A world history**. Nova Iorque. Thames & Hudson, 2016.
- RAFAELLI, Baires. **The Fast Guide to Architectural Form**. Amsterdam, Bis Publishers, 2016.
- ROSS, P.; DOWNES, G.; LAWRENCE, A. **Timber in Contemporary Architecture – A designer's guide**. London. RIBA, 2009.
- SANTOS, Maria Cecilia Loschiavo dos. **Móvel Moderno no Brasil**. São Paulo, EDUSP, 1995
- SMITH, Elizabeth A.T. **Case Study Houses: 1945-1966**. London: Taschen, 2006

SEIKE, Kiyoshi. **The Art of Japanese Joinery**. New York/Tokyo, Weatherhill/Tankosha, 1970.

SMITH, Earl Baldwin. **The Dome: A study in the history of ideas**. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1972

SPIRO, Anette. **The working Drawing**. Zurich: Park Books 2013. 328 p.

SYKES, A.Krista (org). **O Campo Ampliado da Arquitetura**: antologia teórica 1993-2009. São Paulo: Editora Cosac Naify, 2013

THÖNNISSEN, Udo. **Hebelstabwerke / Reciprocal Frameworks: Tradition and Innovation**. Suíça, GTA Verlag, ETH Zurich, 2015, 231 p.

VENTURI, Robert. **Complexity and Contradiction in Architecture**. New York, Museum of Modern Art, 1977 (Second Edition)

VENTURI, Robert; SCOTT BROWN, Denise et IZENOUR, Steven. **Learning from Las Vegas**. Boston, MIT Press, 1977. (revised edition)

WILK, Christopher. **Plywood: a material story**. London, V&A, 2017.

ZAERA-POLO, Alejandro. **Arquitetura em diálogo**. São Paulo, Ubu, 2016 p.336

Teses e textos

ALMONACID, Rodrigo. **Objet trouvé [02]**: Eero Saarinen and the golden proportions of his intuition. Valladolid. february 2014

ANELLI, Renato Luiz Sobral. **O Projeto de Arquitetura na Pesquisa Acadêmica**: especificidades, limites e desafios. IV Projetar, 2009 – Projeto como Investigação, Pesquisa e Prática, 2009, São Paulo

ARQ84, **Estructuras de madera**. Pontificia Universidad Católica en Chile. vol 2/2013

BRITO et al, Leandro. **Avaliação de estruturas de madeira da Hauff e sucessoras consolidadas em São Paulo e Minas Gerais**, Brasil, 2017

Boletim Snif 2018, ed 1. Gerência Executiva de Informações Florestais

CAO Ting, SCHWARTZ Joseph, ZHANG Chi. **Prototypical Hypar**: an operative form-making method based on hyperbolic paraboloids. January 2015

Conference: IASS 2015At: Amsterdam

Chadwick Dearing Oliver, Nedal T. Nassar, Bruce R. Lippke & James B. McCarter (2014) **Carbon, Fossil Fuel, and Biodiversity Mitigation With Wood and Forests**, Journal of Sustainable Forestry,

GROEBER, Ulrich, 2007. "*Deep roots: A conceptual history of 'sustainable development' (Nachhaltigkeit)*," Discussion Papers, Presidential Department p 2007- 002, WZB Berlin Social Science Center.

HEINZELMANN, F., Urbanism, & Beatrijsstraat (2009). **Lightweight Origami structure & daylighting modulation**. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia

HUERTA, S. (2006). **Structural design in the work of Gaudi**. Architectural Science Review, 49(4), 324-339.

Louis I. Khan. Architecture and Urbanism, Tokyo, a+u Publishing, 1975
Library of Congress **Prints and Photographs Division** Washington, D.C. 20540
USA <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/pp.print>

NAGLAA A. Megahed. **Origami Folding and its Potential for Architecture Students**, The Design Journal, 20:2, 279-297, DOI:

OSSERMAN, Robert. **How the Gateway Arch Got its Shape**. Berkeley, Mathematical Sciences Research Institute. Nexus Network Journal – Vol.12, No. 2, 2010 167

ÖSTMAN, Birgit. **Fire protection for tall wood buildings**. Munique: NFPA Symposium 2016

Our Common Future – Report of the World Commission on Environment and Development, 1987.

PERRONE, Rafael A.C. **La Investigación en Proyecto y el Proyecto como Investigación** Anales del Congreso IV Jornadas Internacionales de Investigación sobre Proyecto de Arquitectura y Urbanismo- ETSA – Valencia - junio de 2011

PERRONE, Rafael A. C. **El proyecto como investigación académica de posgrado**. Anais da IV Jornadas Internacionales sobre investigación en Arquitetura y Urbanismo. Valencia: General de Ediciones de Arquitectura, 2010.

Pulp & Paper Resources & Information

<https://paperonweb.com/A1110.htm> , acesso 22/11/2019.

RESSOURCE SCHWEISS, Nº 2. Assistant professorship Dirk E. Hebel, **Design Studio ETH** Zürich, Spring 2015

ROJAS, Carlos Calvimontes. **Geometry of the Parabola according to the Golden Number**, apud Visual Mathematics ISSN: 1821-1437

SÃO PAULO. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Madeiras nacionais:** tabela de resultados de ensaios físicos e mecânicos. São Paulo: IPT, 1956.

SCHUCK, A., Van Brusselen, J., Päivinen, R., Häme, T., Kennedy, P. and Folving, S. 2002. **Compilation of a calibrated European forest map derived from NOAA-AVHRR data**. European Forest Institute. EFI Internal Report 13, 44p. plus Annexes.

SHIMBO, Lucia, LOPES, João Marcos, INO, Akemi. **Low-carbon building technologies: wood and new paradigms for architecture** 22nd International Sustainable Development Research Society Conference (ISDRS 2016), School of Science and Technology, Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, Portugal, 13-15 July 2016

SONG, P., FU, C.-W., GOSWAMI, P., ZHENG, J., MITRA, N. J., AND COHEN-OR, D. 2013. **Reciprocal frame structures made easy**. ACM Trans. Graph. 32, 4 (July), 94:1–94:13.

SULLIVAN, Louis H., **The Tall Building Artistically Considered**, Lippincot's Magazine 57 (março 1896), MIT, Domínio público

Estudo de caso 1 p. 141

Estudo de caso 2 p. 145

Estudo de caso 3 p. 147

Estudo de caso 4 p. 149

Estudo de caso 5 p. 151

Estudo de caso 6 p. 153

Estudo de caso 7 p. 155

Estudo de Caso 1

Obra: **South Pond Pavilion**
 Projeto: **Studio Gang Architects**
 Cidade: **Chicago**
 Ano: **2010**

Estrutura de madeira laminada curvada, com montagens sobrepostas e sem ferragens adicionais, a exceção dos componentes articulados de ligação com o solo. Toda a estrutura é composta por peças idênticas e meia peça para completar o arco. As seções foram montadas por anéis intercalados e os painéis de policarbonato moldados atuam como protetor/ cobertura e contraventamento. Influenciou a solução adotada no modelo 5.5, Catenária laminada

Fonte: Studio Gang Architects
 Fotos e ilustração de detalhe de montagem: autor

Fotos A1. Levantamento fotográfico no local
em 2014: autor
ilustração: autor

Obra: **Temporary chapel of St-Loup**
Projeto: **Localarchitecture/Danilo Mondada**
Cidade: **Pompaples, Suíça**
Ano: **2008**

A eficiência dos painéis dobrados permite que essa pequena capela temporária tenha apenas 6cm de espessura na cobertura, para um vão de até 9m, e 4cm nas paredes. O resultado da análise estrutural feita por aplicativo especializado indicou o uso de dobradiças de aço muito leves para as junções entre os painéis. A rigor, todas as conexões são articuladas e o que determina a estabilidade é a própria geometria proposta, que também resolve a acústica, a distribuição de luz interna e a declividade da cobertura para extração da água e neve.

Fonte: Detail, Timber Construction 2010
Fotos: Fred Hatt e Milo Keller

aa

a

a

Obra: **Capela Alpe Vordere Niedere**

Projeto: **Cukrowicz Nachbaur**

Cidade: **Andelsbuch, Áustria**

Ano: **2008**

Essa pequena capela nos Alpes austríacos foi desenhada em função da dificuldade de acesso ao local, no alto de uma estação de esqui. As peças foram levadas utilizando o *ski lift* local, com assento para duas pessoas, e montadas sobre uma plataforma de pedra e cimento. A solução em pórticos resolveu a estrutura e o fechamento através de uma única peça com dupla função, reduzindo o transporte e a montagem, executada com ferramentas simples.

Desenhos: Konrad Merz, Merz Kley partners
Fotos: autor

Conexões mecânicas integrais para Placas Dobradas de Painéis Compostos de madeira Christopher Robeller, Yves Weinand

Em certos tipos de estruturas, as disciplinas de arquitetura e a engenharia estrutural se sobrepõem de maneira especial. Como um sistema que define o espaço e direciona as cargas, as estruturas em Placas dobradas são o resultado de uma síntese destes dois campos. Nos chamados sistemas de suporte de carga superficial ativa, várias vigas que funcionam como placas ou painéis são combinadas como um sistema interdependente. Nessas estruturas, as conexões ao longo das bordas desempenham um papel especialmente importante.

Em 1930, Georg Ehlers foi o primeiro a descrever o princípio de "estruturas de placas dobradas auto-sustentáveis". Ele havia notado que, devido à forma dobrada de suas seções transversais, os reservatórios de combustível feitos com placas de concreto armado não exigiam elementos de escoramento adicionais. A própria forma, na qual os membros estruturais planares relativamente finos e leves não atuavam individualmente, mas como um sistema coerente, proporcionava rigidez suficiente. Acima de tudo, o método de construção em concreto in-loco, que Hermann Craemer chamou de "monolítico", tornou isso possível.

Nas décadas seguintes, particularmente nos anos 60 e 70, um grande número de estruturas de placas dobradas foi realizado, sobretudo para estruturas auto-sustentáveis que devem ser livres de colunas - por exemplo, em ginásios esportivos ou armazéns. Na época, os componentes de concreto pré-fabricados e pré-tensionados recentemente desenvolvidos, estavam se tornando cada vez mais competitivos com o concreto in-loco. Em comparação com a mão-de-obra intensiva usada nas fôrmas, necessária para o concreto in-loco, ele desloca uma quantidade significativa de mão-de-obra in-loco para o trabalho de pré-fabricação. Este princípio também pode ser transferido para estruturas planas com dobras, enquanto os módulos dobrados são produzidos em série e transportados para o canteiro de obras. Esta foi a primeira vez que foram necessárias conexões separadas entre as bordas dos componentes do edifício. Para este fim, normalmente o reforço que se estendia além da borda dos módulos era soldado e as aberturas eram preenchidas.

Novos materiais, novas formas

Na época, as experiências que foram feitas na ciência dos materiais deram ênfase a materiais alternativos. Por exemplo, os experimentos foram feitos com estruturas temporárias leves de plástico reforçado com fibra de vidro (GRP) - um material translúcido. O foco foi novamente a simplificação da montagem - e, em alguns casos, a desmontagem - da estrutura no local, possibilitada através do

método de construção leve, pré-fabricação e a produção em série dos módulos. Esta foi a primeira experiência com estruturas de Placas dobradas, com dobras em duas direções e que consiste em um grande número de pequenos módulos. Zygmunt Stanislaw Makowski e Pieter Huybers fizeram estudos da chamada "abóbada de chapa dobrada anti-prismática", na qual através da triangulação de uma superfície de barril, foram criadas diagonais de rigidez estruturalmente eficientes em seção transversal. Também aqui, à medida que o número de módulos crescia, o número crescente de conexões de borda representava um desafio cada vez maior. Ao lado de laminações elaboradas, conexões aparafusadas eram frequentemente empregadas. (foto1)

No final, no entanto, as estruturas que empregavam painéis plásticos reforçados com vidro não ganhavam competitividade em uma escala mais ampla.

O painel de madeira composta de grande formato é um material alternativo para estruturas de placas dobradas; desde a virada do milênio, devido ao crescente nível de consciência ecológica, elas têm sido cada vez mais empregadas. Por exemplo, a sala de ensaios musicais em Thannhausen, Alemanha (2001) é uma estrutura de Placas dobradas feita de madeira laminada com cola (Arquiteto: Regina Schineis, Augsburg, Alemanha). O conceito da abóbada de chapa dobrada também foi reinterpretado: em 2006, o IBOIS, um instituto de construção em madeira da EPFL Lausanne, estudou uma abóbada de Placas dobradas feita de painéis de compensado de madeira folheada. O padrão dobrável deste protótipo foi inspirado no origami japonês, e os painéis foram conectados ao longo de suas bordas chanfradas por meio de parafusos de madeira. Os testes estruturais e de carga destas placas dobradas demonstraram uma interessante capacidade de carga, com particular potencial para melhorar as conexões.

O retorno dos acessórios mecânicos integrais na construção em madeira

Durante um longo período de tempo, as conexões de carpintaria foram feitas com ferramentas manuais tais como eixos, serras e cinzéis. Estas conexões tradicionais utilizavam a forma do próprio componente do edifício para transferir cargas. Este conceito é chamado de "fixação mecânica integral". A disseminação da tecnologia de máquinas durante a industrialização tornou estas técnicas de conexão integral cada vez mais antieconômicas. Em grande medida, meios mecânicos de fixação como parafusos ou ângulos de metal que poderiam ser produzidos em massa com as novas tecnologias substituíram as conexões tradicionais. Uma outra mudança foi introduzida durante a fase que foi designada como a "segunda revolução industrial": a disseminação de técnicas controladas numericamente que permitem a produção de componentes de

construção com geometria complexa e séries personalizadas de componentes de construção. A disseminação de equipamentos de controle numérico computadorizado (CNC) para a construção de estruturas de plataforma revitalizou os acessórios mecânicos integrais - por exemplo, as juntas de encaixe. Graças à sua relação peso-força favorável, a madeira é ideal para a pré-fabricação. Com relação às fixações e montagem dos componentes no local, a produção de máquinas tem uma série de vantagens em relação à produção manual. A construção de wood frame em madeira emprega vigas e painéis; a situação é diferente quando se trata de produtos de madeira multicamadas. Na construção tradicional em madeira não havia materiais no formato de painéis: os parafusos e pregos diagonais eram empregados para enrijecer as estruturas. Posteriormente foi empregado compensado para este fim: era simplesmente uma questão de conectar a armação com as tábuas. As conexões das bordas entre as tábuas primeiro se tornaram necessárias com o advento dos métodos modernos de construção de painéis e módulos, empregando madeira laminada cruzada e compensado de madeira folheada. E assim entram em jogo os mais modernos meios mecânicos de fixação - parafusos e ângulos de metal, auxiliados por adesivos.

Desenvolvimento de fixações integrais para estruturas de madeira com placas dobradas

Enquanto estas técnicas de fixação para estruturas de Placa dobrada podem ser consideradas uma solução eficaz para aplicações padrão com conexões de bordas ortogonais, as estruturas de Placa dobrada requerem conexões especiais. Precisamente quando há um grande número de componentes menores com um número correspondente de conexões de borda, não apenas as características de conexão - na forma de fixação integral, através da qual as cargas são transferidas - desempenham um papel decisivo, mas também as chamadas características de alinhamento. Desta forma, a única posição e orientação correta dos componentes do edifício pode ser incorporada na forma dos componentes, facilitando assim uma montagem simples, rápida e precisa. O aspecto crucial na determinação das características de alinhamento é acima de tudo que a forma da conexão bloqueará todos os movimentos das peças em relação umas às outras, com exceção de uma direção de inserção, que permanece livre para a junção. A inspiração para o desenvolvimento de tais conexões não foi encontrada na carpintaria, mas na marcenaria fina. Por exemplo, as conexões de rabo de andorinha têm sido utilizadas há muito tempo ao longo da borda de uma tábua em conexões de móveis: em armários e gavetas. Analogamente aos desenvolvimentos na construção de estruturas em madeira, com tecnologia de produção CNC, tais conexões tradicionais de painéis podem novamente ser executadas economicamente, sendo necessárias algumas adaptações em

materiais e ferramentas modernas. Embora o objetivo do encaixe tradicional seja formar uma conexão entre placas de madeira maciça, o princípio pode ser transferido para o compensado de madeira folheada moderna. Nos testes iniciais, ele demonstrou alta resistência. Graças à colagem cruzada do compensado de madeira folheada, todas as bordas são adequadas para ter encaixe de andorinha. Além disso, as fresadoras multi-eixos também possibilitam produzir ângulos que se desviam dos convencionais noventa graus. Isto é essencial na realização de estruturas de Placa dobrada, como a abóbada de barril, porque para chegar à geometria da dobra, são necessários vários ângulos diferentes. O ângulo máximo em que a ferramenta pode ser empregada determina o ângulo mais agudo e obtuso que pode ser alcançado na dobra.

A união simultânea de várias arestas de um painel é um dos maiores desafios. Quando são empregadas as articulações clássicas de rabo de andorinha, as bordas de orientação diferente produzem diferentes direções de inserção, e estas não podem ser unidas simultaneamente.

A tradicional conexão "nejiri arigata" japonesa (ilus. 2) ofereceu uma solução para este problema. Em contraste com as juntas de rabo de andorinha europeias, este tipo de conexão utiliza o encaixe de rabos e pinos com formas diferentes para limitar os movimentos relativos do componente do edifício a uma única direção de inserção. Esta forma especial permite a união "diagonal" dos componentes do edifício, onde o vetor de inserção fica fora dos planos das duas placas.

Com ferramentas de desenho assistido por computador e técnicas de produção, este princípio pode ser aplicado não apenas à inserção diagonal, mas também a uma variedade de possíveis direções de inserção. No processo, ambas as rotações são limitadas pelos parâmetros de conexão e produção, o que produz uma "janela de rotação" em forma de pirâmide que visualiza todas as direções de inserção presentes na conexão.

Este método pode ser usado para testar se várias bordas podem ser unidas simultaneamente com o mesmo tipo de encaixe de andorinha. Para este fim, as janelas de rotação são calculadas para as bordas e são sobrepostas. Se isto produzir uma interseção, o componente do edifício pode ser unido. Uma direção de inserção compartilhada para união simultânea pode ser escolhida livremente a partir da interseção. A realização de detalhes gerados e produzidos por sistemas automatizados é possível através de interfaces de programas de computador de última geração. Por exemplo, novas "ferramentas de projeto algorítmico" foram desenvolvidas para a construção de protótipos que verificam os novos princípios de junção. Ao lado da direção de inserção dos painéis individuais, uma sequência de montagem também deve ser planejada - e no processo, as diferentes direções de inserção dos

painéis individuais podem ser usadas para bloquear mutuamente os componentes para que eles não fiquem soltos. Por este motivo, tais estruturas só podem ser desmontadas exatamente na ordem inversa em que foram montadas.

Acima de tudo, o processamento de "séries personalizadas de componentes de construção" abre novas possibilidades para a fixação integral gerada automaticamente. Isto é demonstrado por uma estrutura planar dobrada com curvatura longitudinal na qual todos os painéis são moldados de forma diferente (foto. 3).

Em comparação com uma abóbada de Placa dobrada com curvatura única, a curva adicional reduziu as deformações forçadas por carga simulada e assimétrica em até 39 %.

Estruturas de placas dobradas de dupla camada

Uma vantagem particular dos acessórios de painel integral é a possibilidade de trabalhar com painéis relativamente finos que já exibem alta resistência, mas que são difíceis de montar com o meio de conexão padrão. Quando são usadas conexões parafusadas nas partes estreitas dos painéis, como é frequentemente o caso na construção em madeira, as seções transversais devem ser dimensionadas com maior espessura a fim de manter distância suficiente até a borda. Uma possibilidade é uma única camada constituída por um painel mais grosso; uma alternativa é uma estrutura de dupla camada com painéis finos e conexões integrais. Como é comum em estruturas de chapa dobrada, para conexões de borda em dois níveis também é possível conectar as duas camadas que se juntam em uma borda em cruz por meio de juntas de rabo de pomba alongadas. Desta forma, é realizada uma conexão direta entre os quatro painéis sem meios adicionais de fixação.

Para a camada que é penetrada pelas caudas ou pinos alongados, a fixação integral das estruturas de dupla camada requer que a cauda ou pino inserido na fenda se projete ligeiramente além do plano da placa - esta conexão também pode ser usada para bordas externas. Nos testes de carga, este tipo de fixação provou ser mais forte do que outros tipos. Outro aspecto atualmente em exame é o padrão de dobradura.

Além da influência na transferência de cargas e da força da estrutura da placa dobrada, as limitações relativas à fixação das placas e a aplicação em diferentes "superfícies alvo", também devem ser levadas em consideração. Consequentemente, para estruturas anti-prismáticas de Placa dobrada, por exemplo, somente superfícies que podem ser curvadas a um grau relativamente alto podem ser usadas.¹

1. Tradução do autor

Artigo: **Christopher Robeller, Yves Weinand**

Publicação: **Detail Timber**

Construction

Ano: **2016**

O texto transcrito resume de forma objetiva a trajetória das pesquisas com conexões contínuas em Placas Dobradas de madeira. As dificuldades de fabricação vem sendo superadas com o auxílio intensivo de aplicativos paramétricos, baseados em algoritmos escritos para situações de fabricação e montagem muito específicos, que permitem uma infinidade de caminhos a serem pesquisados. Foi analisado em profundidade com o auxílio de um dos autores, o prof. Phd Robeller, em 2019, para o desenho da catenária dobrada (5.6)

Foto 1

Ilustração 2

Foto 3

Diagrama de cisalhamento

A Integral define as treliças

A tesoura final

Obra: **Maggie Center**

Projeto: **Foster+Partners**

Cidade: **Manchester**

Ano: **2016**

Estrutura de madeira (abeto) a partir de peças de LVL usinadas, tendo como base a redução de nós de ligação e de operações de fabricação e montagem. A peça final é leve como uma treliça artesanal, com as vantagens do desempenho da viga LVL. Para a obtenção do desenho dos nós da treliça interna à tesoura, foi produzido um diagrama das forças de cisalhamento (*shear forces*), que resultaram no arranjo final.

Fonte: Foster+Partners
Fotos e Ilustrações: F+P

1. Tesoura em LVL, 7.60m
2. treliça usinada de abeto
3. placa de aço com 50mm de largura
4. placa de aço com 30mm de largura
5. nó triangular em madeira
6. Coluna de LVL usinada

CONCEPÇÃO DIGITAL

MÉTODO

sobreposição das seções

vista explodida das camadas

Corte na CNC

FABRICAÇÃO DIGITAL

moldagem por vapor

montagem das lâminas

montagem sequenciada

Obra: **Ponte de pedestres**Projeto: **Centro de Estudios Superiores de Diseño de Monterrey, CEDIM**Cidade: **Santa Catarina, México**Ano: **2018**

Prótipo de passarela desenvolvido segundo modelos paramétricos, com inteligente uso de sobreposição de camadas, como escamas, que dispensa o uso de vigamento estrutural interno e utiliza a envergadura nos dois sentidos para garantir rigidez. Foram utilizados nessa concepção o aplicativo Karamba de análise estrutural e o Rhinoceros.

Fonte: Archdaily
Fotos: Héctor Pineda

Obra: **Zippered Wood**

Projeto: **School of Architecture and
Landscape Architecture,
University of British Columbia.
Hilo Lab.**

Cidade: **Vancouver**

Ano: **2019**

A proposta inicial foi a de produzir uma estrutura maleável a partir de peças equivalentes ao 'pontaletes' brasileiro ou seja barrotes usados nas construções de *wood frame* e qualquer divisória de *drywall* no mercado norteamericano.

A técnica de encaixes de duas lâminas serrilhadas, tradicional em culturas como a japonesa, aqui foi sofisticada a partir de estudos de torção elaborados em aplicativos de modelagem e ensaio que projetam fendas enviesadas que quando encaixadas resultam em uma curva bidirecional.

Fonte: Hilo lab UBC

Fotos e Ilustrações: Hilo lab UBC

Este livro foi composto com a fonte Core e impresso em São Paulo,
em dezembro de 2020 pela Ipsis Gráfica e Editora, com papel
Eurobulk 135g e capa em Masterblank linho 270g .

instituto de
arquitetura
e urbanismo
usp são carlos