



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE ARTES E COMUNICAÇÃO - CAC
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA & URBANISMO - DAU

Ivson R. de Oliveira Filho

**TECTÔNICA DIGITAL CENTRADA NA MADEIRA: INVESTIGAÇÕES A
PARTIR DA PRÁTICA PROFISSIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RECIFE,
OUTUBRO 2022

Ivson R. de Oliveira Filho

**TECTÔNICA DIGITAL CENTRADA NA MADEIRA:
INVESTIGAÇÕES A PARTIR DA PRÁTICA
PROFISSIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Pernambuco, como parte das
exigências para obtenção do título de
bacharel em Arquitetura e Urbanismo.

Professora Orientadora:

Maria Luiza Macedo Xavier de Freitas

Professor co-orientador:

Max Lira Veras Xavier de Andrade

RECIFE,

OUTUBRO 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Oliveira Filho, Ivson Rodrigues de .

Tectônica digital centrada na madeira: investigações a partir da prática profissional / Ivson Rodrigues de Oliveira Filho. - Recife, 2022.
103 p : il.

Orientador(a): Maria Luiza Macedo Xavier de Freitas

Cooorientador(a): Max Lira Veras Xavier de Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação, Arquitetura e Urbanismo - Bacharelado, 2022.

1. tectônica digital. 2. madeira massiva. 3. projeto arquitetônico. 4. projeto estrutural. I. Freitas, Maria Luiza Macedo Xavier de. (Orientação). II. Andrade, Max Lira Veras Xavier de . (Coorientação). III. Título.

720 CDD (22.ed.)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao amor e apoio da minha família, em especial à minha mãe, por ser tão generosa, guerreira e amável. Por seu apoio incondicional, parceria, pela sua luta incansável para a felicidade e sobrevivência da família. Mãe, sem você eu não teria conseguido concluir essa graduação, você foi peça fundamental, saiba disso. Agradeço também à minha avó e às minhas irmãs.

Agradeço imensamente aos professores Maria Luíza Freitas (Malu) e Max Andrade, pela paciência e empatia, por aceitarem embarcar nessa investigação junto comigo. Por suas orientações e apoio ao longo desses últimos semestres, meu muito obrigado!

Agradeço aos entrevistados, que concederam algumas horas de suas agendas por generosidade e por apoio à pesquisa científica. Ao Hélió Olga, Alan Dias e Marcelo Aflalo, muito obrigado!

Agradeço a Theu pelo amor e pelo companheirismo. Por estarmos nos apoiando mutuamente a todo momento enquanto enfrentamos juntos tantos desafios diários.

Agradeço aos amigos do curso de arquitetura, que tanto admiro por todo esforço e companheirismo ao longo desses anos. Em especial a Igor, Vanessa, Jemima, André, Júlia, Guilherme, Maju, pela energia trocada e pela relação leve que temos.

Agradeço às anexas pela amizade e por serem apoio incondicional, onde quer que eu esteja, quando quer que seja, sei que sempre posso contar com vocês!

Agradeço à Universidade Pública por ser um espaço tão fértil para a educação, para o desenvolvimento humano, para o desenvolvimento da ciência e do conhecimento, e por resistir, apesar de todos os desmontes que têm sofrido nos últimos anos. Agradeço também a todos os mestres que vieram antes de nós, que colaboraram com a construção da academia como ela é hoje, a partir da construção do conhecimento e das ciências.

Por fim agradeço ao grande mistério de tudo que é, por ser a própria existência e a vida. E a todos os que vieram antes de nós, e sem os quais não estaríamos aqui - nossos ancestrais.

RESUMO

O advento do projeto assistido por computador e o crescimento e complexificação das ferramentas digitais permitiram e influenciaram o surgimento de novas metodologias de concepção e desenvolvimento do projeto arquitetônico e estrutural. Novos processos digitais de design voltados para as especificidades e comportamento da matéria surgiram, trazendo novas relações e metodologias emergentes, que atribuímos ao conceito de tectônica digital. Quando pensamos na madeira enquanto material central no projeto, notamos que há uma mudança em curso, por mais que inicial, de maior utilização desse material por um maior número de projetistas, apesar de ainda ser um material intimidante para muitos deles. A intimidação se dá pela fraca cultura de uso da madeira no cenário brasileiro e na educação superior de arquitetos e engenheiros, quando comparado com a cultura do concreto armado e do metal enquanto estrutura principal das edificações. Já a mudança em curso acontece pela expansão e fortalecimento dos empreendimentos do setor da madeira massiva na construção civil. Esse trabalho visa investigar quais processos de tectônica digital são relevantes de serem discutidos quando pensamos em projetos centrados na madeira, especialmente investigar como eles estão sendo utilizados por agentes protagonistas na expansão da madeira massiva na construção civil brasileira. A partir de entrevistas semi-estruturadas, mapeamento de processos de projeto, análise de outros documentos, buscamos entender com qual utilidade esses modelos digitais são utilizados e em que etapas do projeto. A partir da nossa investigação, corroboramos com a hipótese de que processos de tectônica digital estão sendo utilizados como modelo padrão de funcionamento desses agentes. Quando o enfoque é nas interações arquitetura-engenharia, as formas estruturais são em geral desenvolvidas inicialmente a partir de metodologias de design baseadas em papel, mas que passam posteriormente por processos de simulação e otimização digitais em geral atreladas à análise de desempenho. Nessas relações processos formativos baseados em performance são utilizados com fins de otimização estrutural, conseguindo atingir redução de custos e desperdício material. Processos formativos baseados em performance são também utilizados quando as estruturas são de forma livre, por terem comportamentos menos preditivos, o que auxilia na análise e desenvolvimento desses projetos. Processos generativos ou morfogênicos não foram encontrados em nossas investigações, o que já era esperado, visto que esses processos são muito projeto-específicos e geralmente requerem alta especialização e expertise de equipes multidisciplinares, mais encontrados em empresas que se propõem a essa especialização.

Palavras-chave: tectônica digital, madeira massiva, projeto arquitetônico, projeto estrutural.

SUMÁRIO

[PARTE 1: REFERENCIAL TEÓRICO]

CAPÍTULO 1: TÓPICOS SOBRE MADEIRA

1.1 A MADEIRA EM FOCO _____	15
1.2 O USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO BRASILEIRA _____	18
1.3 TECNOLOGIAS INDUSTRIAIS DA MADEIRA: PRODUTOS DE MADEIRA COLADA _____	22
1.4 DESMISTIFICANDO PRECONCEITOS RELACIONADOS À MADEIRA ____	24
1.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DA MADEIRA _____	29
1.6 PRECEITOS BÁSICOS DO PROJETO EM MADEIRA _____	32

CAPÍTULO 2: TECTÔNICA: DA CLÁSSICA À DIGITAL

2.1 TECTÔNICA E A INTERSEÇÃO ENTRE O FÍSICO, O VIRTUAL E O DIGITAL _____	35
2.2 TEORIA TRADICIONAL DA TECTÔNICA _____	38
2.3 TECTÔNICA NO EXERCÍCIO DE PROJETO _____	46
2.4 INFORMATIZAÇÃO E COMPUTAÇÃO NA ARQUITETURA _____	50
2.5 DESIGN DIGITAL E MATERIALIDADE _____	52
2.6 TECTÔNICA DIGITAL _____	53
2.7 MODELOS DIGITAIS _____	56
2.8 FABRICAÇÃO DIGITAL _____	64

[PARTE 2: RESULTADOS E DISCUSSÃO]

CAPÍTULO 3: LIÇÕES DA PRÁTICA PROFISSIONAL SOBRE TECTÔNICA DIGITAL VOLTADA A PROJETOS EM MADEIRA

3.1 INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO	67
3.2 ARQUITETO MARCELO AFLALO	70
3.3 TIMBAU ESTRUTURAS EM MADEIRA	78
3.4 ITA CONSTRUTORA	83
3.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	94
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

INTRODUÇÃO

Problema

O ato de projetar requer adotar uma conduta antecipatória, uma simulação imaginativa de uma ideia, em prol da resolução dos problemas que o projeto busca atender. (BOUTINET, 2002) Projetar com o enfoque na construção, requer a compreensão do comportamento dos materiais com que se quer trabalhar. O arquiteto não trabalha diretamente com o material como o artesão ou o construtor o faz, mas sim com a ideia do material, e precisa de um repertório e uma intimidade com os aspectos materiais para conseguir exercer bem sua imaginação projetual. (AMARAL, 2012)

Quanto mais ausência de informações construtivas e ausência de intenção estrutural e material, leia-se falta de consistência (ou consciência) tectônica no projeto, mais afastado estará o projeto da obra. Ele está “à deriva” e muito mais suscetível à imprevisibilidade e à perda de controle durante sua execução. O que pode acabar trazendo dificuldades para os aspectos programáticos e espaciais que foram priorizados em primeiro lugar.

Uma “cultura tectônica” ou uma abordagem tectônica de projeto é sobre ter a preocupação com a materialidade como ponto de partida no seu desenvolvimento. (FRAMPTON, 1995) Para além da intimidade do comportamento material e dos conhecimentos sobre como a construção funciona, pode-se exercitar exploratoriamente ideias construtivas no desenvolvimento de projeto através de meios físicos como maquetes, e croquis.

Por mais que pareça contraditório a princípio, conseguimos simular o comportamento material também através de modelagens digitais sofisticadas que se utilizam de regras matemáticas e físicas do mundo real em ambientes virtuais. As

mídias digitais tornam-se um interessante meio de explorar o projeto, especialmente a exploração de formas estruturais e o uso dos materiais.

Modelos digitais sofisticados permitem explorações formais baseados em informações e atributos que são priorizados pelo projetista. Explorações digitais de formas estruturais podem ser pautadas em questões como diversos parâmetros de desempenho, por exemplo, também permitem trabalhar com simulações, otimização de forma, análise de informações, e até mesmo explorações formativas. Esse tipo de abordagem de desenvolvimento é atrelado ao conceito de Tectônica digital.

Apesar de muito presente na arquitetura vernácula brasileira, quando olhamos pro contexto geral de produção arquitetônica formal brasileira, a madeira não é muito utilizada enquanto material protagonista nos projetos de construção. A madeira é em geral vista como um material utilizado de forma conservadora, muito atrelada ao tradicional, a contextos vernáculos, ou a contextos não-vernáculos de pequeno porte. Mas é um material estratégico e pertinente para o século XXI, especialmente em relação aos seus atributos de baixo impacto ambiental quando comparado com a extração e uso de concreto e metal na construção civil.

Tem havido um fortalecimento nos setores industriais ou semi-industriais de construção civil com madeira. Em especial na indústria de madeira massiva colada (também conhecida por madeira sólida ou engenheirada), que consiste na junção de peças de pequeno porte em peças altamente customizáveis, em vários tamanhos e formatos, como a Madeira Lamelada Colada (MLC) e Madeira Lamelada Colada Cruzada (CLT¹).

Essa associação com o uso da madeira é interessante no sentido que em geral está atribuída a uso regulamentado e sustentável de extração de madeira, e também tem uma relação forte direta com tecnologias de ponta, tanto de maquinário e técnicas, quanto de processos digitais de projeto. O setor também tem demonstrado prezar por uma constante e forte relação com arquitetos que são os seus principais clientes ou intermediadores.

¹ do inglês “cross laminated timber” é a sigla mais comumente adotada no Brasil, também pode ser dita, MLCC em sua tradução para o português: madeira lamelada colada cruzada.

Mesmo a madeira sendo tão associada aos conhecimentos tradicionais e conservadores de projeto arquitetônico, quando vamos ao contexto das tecnologias de industrialização da madeira existe um forte ímpeto de pioneirismo tecnológico e uma tendência natural a uma maior plasticidade do uso desse material devido à plasticidade da técnica de fabricação. Isso abre mais possibilidades para os arquitetos explorarem a madeira de novas formas em seus projetos, e vem a gerar interações interessantes entre as diferentes disciplinas de projeto até sua fabricação.

Procura-se investigar então, neste trabalho, quais as ferramentas e metodologias digitais de projeto estão sendo utilizadas pelos pioneiros neste setor construtivo pautado em produtos industriais de madeira massiva, e como essas metodologias diferem das não digitais nos fluxos de interação entre os agentes, especialmente nas relações entre arquitetos, engenheiros e fabricantes.

Pergunta

Como processos digitais pautados na materialidade são usados para desenvolvimento de projetos centrados na madeira, por agentes protagonistas na expansão da madeira massiva na construção civil brasileira?

Hipótese

1. Processos de tectônica digital dependem de e impactam o diálogo entre arquitetos, engenheiros e fabricantes durante o desenvolvimento dos projetos centrados na madeira massiva.

Método

Através de entrevistas semi-estruturadas, compreender as opiniões e práticas profissionais desses agentes, e como funciona o fluxo de trabalho das empresas que representam. Através dessas informações mapear processos de trabalho, fluxos de

informação e metodologias de desenvolvimento de projetos para compreender onde estão inseridos os processos digitais de projeção e como influenciam o desenvolvimento dos projetos.

Objetivo principal

Elucidar como se dá o uso de metodologias digitais de desenvolvimento de projeto centrados na madeira, por agentes protagonistas na expansão da madeira massiva na construção civil brasileira

Objetivos específicos

1. ***Mapear*** fluxos padrão de informação nas etapas de desenvolvimento desses tipos de projeto
2. ***Categorizar*** os modelos digitais utilizados nessas etapas e suas funções
3. ***Caracterizar*** os processos de tectônica digital desenvolvidos por esses agentes

Estrutura do Trabalho:

Parte 1 - Referencial Teórico

A primeira parte do trabalho é formada por dois capítulos distintos, cuja função é localizar nosso tópico de estudo no estado da arte conceitual, e apresentar conceitos básicos para desenvolvimento da parte 2 que tem caráter mais investigativo.

Capítulo 1 - Tópicos sobre Madeira

Neste capítulo tratamos de algumas questões essenciais relacionadas ao material de estudo, como a pertinência de dar o enfoque do estudo à madeira, em detrimento de outros materiais. O contexto brasileiro de uso da madeira, bem como o recorte que estamos fazendo para esse trabalho, que é a madeira massiva que se trata de um grupo de produtos de madeira de processos industriais e semi-industriais. Falamos também sobre algumas características físicas e morfológicas do material devido à sua natureza orgânica.

Capítulo 2 - Tectônica da Clássica a Digital

Neste capítulo tratamos sobre a discussão sobre o que é tectônica para compreendermos sua relação com o ato de projetar tomando como partido preocupações em relação à forma e materialidade da estrutura, as escolhas de sistemas construtivos, forma e de fabricação como input inicial de projeto. Neste capítulo discorreremos sobre o papel de modelagens sofisticadas pautadas nas relações físicas do material, para o desenvolvimento de projeto, que configura a noção de tectônica digital.

Parte 2 - Investigação

A parte 2 consiste nos aspectos investigativos deste trabalho, e é formada por um capítulo único.

Capítulo 3 - Lições da Prática Profissional sobre Tectônica Digital Voltada a Projetos em Madeira

Neste capítulo investigamos junto a agentes protagonistas da expansão do uso da madeira massiva no mercado brasileiro de construção civil. Aqui buscamos entender na prática profissional como se dá a utilização de processos digitais para o desenvolvimento da tectônica dos projetos comerciais e as conclusões obtidas a partir dessa investigação.

CAPÍTULO 1

TÓPICOS SOBRE MADEIRA

1.1 A Madeira em Foco

A madeira é um material ancestral e essencial para a arquitetura. Acredita-se que o uso da madeira para construção se dá desde a saída da humanidade das cavernas e dos abrigos espontâneos. Trata-se de um material que esteve presente na quase totalidade das formas arquitetônicas, através das culturas, através dos continentes e através do tempo. A madeira é um material de fácil acesso na natureza, flexível e versátil, a qual não demanda técnicas complexas para ser manipulado, apenas manuais e por isso tão presente na maioria das construções vernaculares ao redor do globo.

Ao mesmo tempo, a madeira é um material cujo uso tem pertinência extremamente atual na arquitetura e para as sociedades do século XXI, especialmente quando levamos em conta preocupações ecológicas a respeito das mudanças climáticas que são enfrentadas a nível mundial. De fato, dentre os materiais mais utilizados na construção civil, a madeira se apresenta como um dos poucos materiais capazes de absorver gás carbônico durante o seu crescimento - já que a sua origem provém de uma planta - e cultivo, ao invés de liberá-lo na atmosfera. A madeira passa, assim, a ter um grande destaque na dinâmica internacional como agente-chave na economia de baixo carbono e baixo impacto ambiental e nas políticas de mitigação das mudanças climáticas.

De forma comparativa, para produzir:

- 1 tonelada de concreto são liberados 159 Kg de CO₂ na atmosfera
- 1t de aço libera 1,24 t de CO na atmosfera
- 1t de alumínio libera 9,3 t de CO₂ na atmosfera
- e 1t de madeira é capaz de absorver 1,7 t de CO₂ da atmosfera (não considerando a energia usada para processamento)²

A madeira pode ter diversas proveniências, como a extração florestal legalizada - manejo florestal - e ilegal, o desmatamento legalizado e ilegal, além do

² Dados comparativos de forma aproximada com base na espécie arbórea *Pinus Radiata*, de acordo com *Pulp and Paper Resources and Information*, 2019; *apud* Aflalo, 2020.

cultivo agroindustrial, cuja madeira é produzida conforme a demanda, no caso, das indústrias produtora dos diversos tipos de madeira industrializada³ (chapas e barras de madeira plantada e madeira massiva). É importante, nesse sentido, termos clara distinção das diferenças entre a *madeira serrada* e a *madeira serrada de origem controlada*. A primeira geralmente oriunda de extrações incertas ou ilegais, e a segunda proveniente de florestas de cultivo, que algumas vezes pode ser inclusive atrelada a certificações de manejo de baixo impacto⁴.

Segundo o relatório nacional “Florestas do Brasil, em resumo” do Serviço Florestal Brasileiro, órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento o país tem 59% do seu território coberto por florestas, o que o torna o segundo maior país em área de floresta no mundo, ficando atrás apenas da Rússia. Desse total apenas 1,97% é composto por florestas de plantio, o que corresponde a 1,16% do território nacional ou 9,55 milhões de hectares. As espécies mais plantadas são principalmente espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, em maior e menor volume, respectivamente (MAPA/SFB, 2019, p. 26).



Figura 1.1: Mapa de florestas brasileiras (em verde), incluindo as nativas e de cultivo, referente aos dados de 2018. Fonte: MAPA/SFB, 2019, p.27 [alterado pelo autor para melhor leitura]

³ A maior parte das florestas plantadas são destinadas para a indústria da celulose, produtora dos diversos tipos de papéis.

⁴ A principal certificação ambiental no caso das florestas de madeira cultivada é a FSC, emitida pelo Conselho de Manejo Florestal, uma organização internacional conhecida por Forest Stewardship Council. Para mais informação: <https://br.fsc.org/br-pt>

O Brasil é um país com grande potencial de desenvolvimento silvícola de baixo impacto. Claro que para que os avanços do setor aconteçam de forma sustentável não pode-se expor ao risco as florestas nativas restantes, já tão exploradas desde os primórdios da colonização europeia na América do Sul. O cultivo de novas áreas de floresta deve ser incentivado sob os preceitos do manejo sustentável, em concordância com a preservação dos recursos naturais e da fauna e flora. No entanto, não se pode negar a natureza promissora do setor. Especialmente tendo em conta a alta produtividade de crescimento das árvores devido aos nossos climas e recursos hídricos, o que torna o Brasil um dos locais mais produtivos para cultivo de madeira do mundo.

Segundo dados do Relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) (2021), 6,05 milhões de hectares de áreas preservadas estão em associação com os 9,5 milhões de hectares de florestas de cultivo, essas áreas incluem reservas legais, áreas de preservação permanente e reservas particulares do patrimônio natural. Além disso 39% das áreas de floresta cultivada são certificadas pelo Conselho de Manejo Florestal (FSC) e/ou pelo Programa Nacional de Certificação Florestal⁵ (Cerflor/PEFC⁶/FSC). O que indica um certo estágio de avanço no desenvolvimento do controle de origem e rastreabilidade de custódia da madeira (registros dos atores relacionados desde a produção até a compra) e na maior observância ao atendimento dos padrões de sustentabilidade no manejo das áreas de cultivo. Esses dados mostram que a indústria de cultivo de madeira está em associação com medidas de preservação e controle de origem.

A madeira oriunda de florestas de cultivo é a principal fonte alimentadora de toras de madeira para processamento pela indústria brasileira. É da silvicultura que provem 91,6% do consumo dessa matéria prima pela indústria, enquanto que os 8,4% restantes originam-se de florestas naturais, o que aponta para que a indústria

⁵ No caso brasileiro, a certificação CERFLOR/PEFC/FSC é uma segunda forma de certificação de caráter nacional, segundo site do CENIBRA, empresa nipo-brasileira produtora de papel, e é emitida pelos critérios colocados em normas elaboradas no âmbito da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e gerida pelo Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO, que também credencia as instituições certificadoras. Para mais informações: <https://www.cenibra.com.br/cerflor-fsc/>

⁶ Programme for the Endorsement of Forest Certification

brasileira não seja interpretada como um agente de grande risco atrelado à extração de madeira ilegal nativa (MAPA/SFB,2019). Isso acontece devido a maior exigência de certificações ambientais e maior regulação atreladas a processos industriais. No entanto, muito do consumo não-industrial e informal não é acobertado por esses dados, é nessa lacuna que reside a grande parte da extração ilegal e predação das florestas naturais.

Vale destacar que a utilização da madeira pode surgir em meio a diversos contextos sociais, tecnológicos e culturais. Essas diferentes formas podem apresentar históricos de impacto em espectros opostos, o que é muito dependente da origem do material, da forma de sua extração e como é sua utilização na construção civil. A extração madeireira ilegal é oriunda de desmatamento predatório, altamente ameaçador para a manutenção dos ecossistemas naturais, e deve ser combatida a todo custo.

1.2 Uso da Madeira na Construção Brasileira

A cultura técnica brasileira é muito rica. Os aspectos construtivos possuem uma polivalência de origens indígenas e ibéricas, que estão sendo retomadas - e valoradas - em estudos recentes, sobretudo as das primeiras. Dois materiais foram transformados por ambos, a terra e/ou o solo e a madeira. É muito comum verificar nas construções feitas entre os séculos XVII e XIX, paredes maciças de barro ou de alvenaria de tijolos maciços e estruturas de coberturas, pisos, circulações verticais (escadas), forros (lambris), ornamentação (lambrequins) e de contraventamento (verga, contra-vergas e vigas) em madeira. Essas provinham de árvores nativas. Pode-se atribuir a essa conformação construtiva a nossa herança cultural, sobretudo ibérica.

Na construção vernácula⁷ ou popular brasileira, é comum ver a utilização da madeira tanto como estrutura principal, como também fazendo parte de um subsistemas de fechamento, como o pau-à-pique. Apesar de poucos registros acadêmicos a respeito, a construção indígena é rica em diferentes tipologias se utilizando quase sempre inteiramente de materiais de origem vegetal, como toras de madeira e fibras, e de forma intimamente relacionada com o contexto natural ao redor. Mostrando grande repertório tipológico, alguns em grandes escalas (ALMEIDA & YAMASHITA, 2013). Os povos caiçaras, povos ribeirinhos, também trazem ricos exemplos de construções feitas majoritariamente em madeira.

Nesses casos temos comumente contextos extrativistas de baixo impacto de espécies nativas de fácil acesso nas regiões em questão, manuseadas com tecnologias de baixo custo que são respaldados no conhecimento tradicional, passado de geração a geração.

Nas regiões sul e sudeste também há um grande número de construções vernaculares em madeira, cujas técnicas e saberes foram trazidos pelos imigrantes europeus para o Brasil no século XIX. Geralmente centradas na técnica da madeira falquejada e na madeira serrada. Os imigrantes foram em sua maioria italianos, alemães e outros países do leste europeu, como os polacos, os lituanos etc.

⁷ Arquitetura vernacular consiste em tipologias de caráter local ou regional, nas quais são utilizadas técnicas desenvolvidas culturalmente por determinados grupos tradicionais ou étnicos, utilizando recursos materiais condizentes com seus contextos, em geral recursos mais facilmente encontrados em seus contextos geográficos. Geralmente de forma autoconstruída, sem a supervisão de arquitetos ou engenheiros.

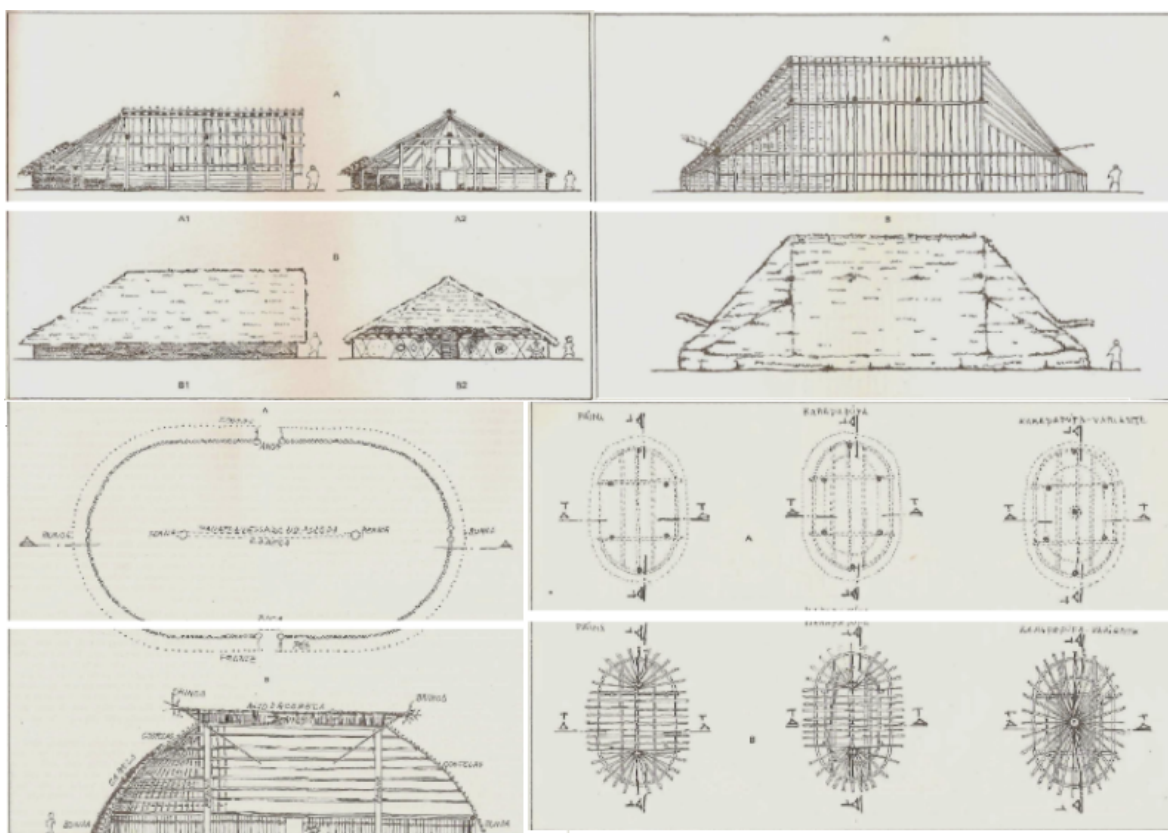


Figura 1.2 Algumas tipologias de edificações vernaculares de povos originários brasileiros estudadas por Almeida & Yamashita, 2013.

A estética vernacular muitas vezes é mal vista em geral pela população brasileira, por ser associada a contextos de pobreza ou de baixo padrão de qualidade, mas contribuem com um imenso e rico repertório tipológico e tecnológico para o estudos de soluções arquitetônicas e é recorrentemente revisitada por profissionais formais da construção civil e por estudos acadêmicos tanto para fins de compreensão antropológica como fonte de inspiração e conexão com arquitetura identitária brasileira.

O uso da madeira na arquitetura brasileira contemporânea também é muito compreendido popularmente como sendo um material de classes abastadas, e é frequentemente associada ao uso em casas de veraneio litorâneo, ou casas de campo. Nesse contexto de projetos é comum ver o uso de toras de madeira roliça e madeira serrada proveniente de florestas nativas ou de cultivo controlado. Esses fatores contribuíram muito para a formação da opinião pública sobre o uso da madeira nas construções como estrutura principal enquanto um material ou muito

caro, valioso e inacessível ou, quando utilizado em situações de pobreza, menos digno de respeito. O que pode ser aparentemente contraditório no discurso, mas recorrente no imaginário popular, e muito atrelado à qual situação de origem da madeira e sua extração, e as relações de comercialização desse material.

Algumas iniciativas foram feitas para difusão comercial de sistemas pré-fabricados não-industriais da madeira no Brasil, especialmente nas regiões sul e sudeste, como apontadas por Shigue (2018) como os kits de residências pré-fabricadas desenvolvidos por algumas serrarias da região, mas não foram plenamente difundidos, geralmente direcionados para casas temporárias.

Um dos primeiros empreendimentos industriais de madeira no Brasil foi o sistema Hauff fundado em 1926, pelo engenheiro de origem austríaca Erwin Hauff, que havia se mudado para o Brasil. O empreendimento foi responsável por obras inovadoras para a época no cenário de construções em madeira, muitas apresentando grande porte, ou sendo infraestruturais como pontes e hangares, e alta sofisticação na composição de peças (SHIGUE, 2018).

A partir de 1934, a tecnologia de Madeira Lamelada Colada (MLC) foi inserida no Brasil por intermédio da Esmara Estruturas de Madeira Ltda, fundada por dois irmãos imigrantes alemães (SHIGUE, 2018). Essa tecnologia consiste em sistemas industriais mais sofisticados de produção de *madeiras massivas*⁸ (também conhecidas como madeiras engenheiradas e por madeiras sólidas) que trataremos melhor no tópico a seguir.

Esses sistemas industriais estão associados a uma grande formalização de trabalho no desenvolvimento do projeto e construção, junto a engenheiros e arquitetos, à hierarquização verticalizada da mão de obra e às relações amplas com outros setores industriais, como o de florestas cultivadas.

⁸ Madeira Massiva ou Madeiras Sólidas ou Madeira Engenheirada é um conceito mais amplo que inclui grupos de técnicas em que se obtém grandes peças de madeira pré-fabricada a partir da junção de peças menores, quer seja pelo uso de colas, pregos, cavilhas ou outras formas de união entre peças. Estão inclusos técnicas de Madeira lamelada colada, madeira laminada colada, madeira lamelada colada cruzada, madeira lamelada pregada, madeira lamelada cavilhada, entre outros.

1.3 Tecnologias Industriais da Madeira: Produtos de Madeira

Colada

Um dos fatores a princípio limitantes da utilização da madeira é a limitação de seções e peças ao tamanho das árvores extraídas. Edificações de grande porte exigiam árvores-matriz centenárias para que fosse possível produzir peças adequadas aos seus projetos, de espécimes raros, de florestas maduras, o que significa naturalmente um grande impacto ambiental atrelado à extração ilegal, transportes a grandes distâncias e altos valores de execução de projeto.

As tecnologias de industrialização da *madeira massiva*, em especial produtos de madeira lamelada colada, trouxeram uma mudança significativa nas possibilidades de projeto da madeira, por conseguirem resolver uma série de limitações da madeira.

Os produtos em questão são em geral feitos da composição de peças customizáveis a partir da colagem ou junção, técnica chamada de lamelação com cola, de peças menores de madeira, os quais podem conformar peças de grandes dimensões, na forma de barras e chapas. Isso traz maior liberdade formal e compositiva utilizando a madeira, além de uma forte mudança na relação da origem das extrações da matéria prima.

As espécies utilizadas para essas tecnologias preferencialmente são espécies de densidade média e baixa para produzir peças com técnicas que exprimem maior resistência que as madeiras isoladas de matéria prima. Para muitas dessas técnicas, as madeiras de lei (alta densidade) são até mesmo negativas devido à sua alta resistência às técnicas de colagem. Muitas vezes as espécies usadas são *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* que são majoritariamente espécies exóticas aos biomas brasileiros. No entanto, existe uma busca contínua através de pesquisas práticas que estão em andamento para explorar o potencial de utilização de espécies nativas, o angelim, a andiroba e a piquiarana, para as tecnologias industriais da madeira. (CHAHUD, *et al*, 2009) (OLIVEIRA, 2021)

MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC)

É um produto industrial de madeira massiva cuja tecnologia foi criada na Alemanha em 1905. Consiste na associação de lamelas de madeira com cola adesiva e posteriormente prensadas até secagem. As lamelas em geral variam de 1,5 a 3,0 cm de altura, em casos especiais podem ultrapassar esses valores. Os pontos de junção das lamelas no sentido do seu comprimento são feitos de forma serrilhada - juntas dentadas - para aumentar a superfície de contato, utilizando colas muito potentes, de forma que a estrutura final exhibe comportamento monolítico ou maciço, não tendendo à separação de seus componentes menores (PFEIL & PFEIL, 2003).



*Figura 1.3: À esquerda: madeira lamelada colada (MLC). À direita: madeira lamelada colada cruzada (CLT)
Fotos: Structure Craft (acessado em setembro de 2022).*



Figura 1.4: Detalhe da serrilha de encaixe para colagem na MLC (AFLALO, 2020; p.27)

MADEIRA LAMELADA COLADA CRUZADA

É um produto industrial de madeira massiva, semelhante ao exemplo anterior, que consiste em um painel ou chapa, feito a partir da associação de lamelas de madeira com cola adesiva em camadas onde as peças de madeira são dispostas perpendicularmente entre si a cada camada e posteriormente prensadas até secagem. Essa disposição cruzada entre cada camada é responsável por aumentar a resistência do painel como um todo. Esse produto é utilizado como elemento de tablado vertical - paredes - ou horizontal - lajes - em uma estrutura autoportante e contribui para vencer vãos com menor deformação.

Estes imensos painéis de madeira massiva são altamente industrializados sendo o seu uso feito apenas como montagem na obra final, logo, cada painel, sobretudo os de parede são preparados em sua totalidade no ambiente da indústria ou em alguns casos, são juntados pela fabricação na forma de módulos espaciais - no formato de container - para serem transportados e montados no canteiro de obra, semelhante a um brinquedo de blocos de construtor.

1.4 Desmistificando Preconceitos Relacionados à madeira

Compreende-se que os contextos culturais locais e reprodução de discursos são altamente influenciadores em relação à homogeneização do cenário construtivo. O mercado tanto de construção quanto de projetos não provê naturalmente diversidade nos métodos construtivos, há uma tendência para alguns sistemas hegemônicos no cenário. A população geral não vê diversidade material nos exemplos de obras prontas no contexto urbano. Os arquitetos e engenheiros tendem a inclinar-se para os sistemas construtivos mais populares e mais facilitados pelas relações de mercado. É um ciclo de vícios de estruturas relacionais que se retroalimenta. Mudanças espontâneas desses cenários são realmente lentas, devido à alta necessidade de articulação do mercado construtivo para que haja mudanças

consistentes nos volumes de projetos. Espera-se que haja incentivos de topo de cadeia para que elas aconteçam de formas mais amplas e rápidas.

Acerca da madeira, devido à dificuldade de se encontrar exemplos próximos e abundantes de seu uso nos projetos, são reproduzidos alguns preconceitos recorrentes do imaginário popular, por questões de desinformação e pouco contato com o material. Os principais pressupostos negativos a respeito da madeira podem ser destacados como sendo:

- A madeira é problemática por não resistir ao fogo
- A madeira é frágil frente à exposição à água
- A madeira atrai patógenos
- A madeira não é um material duradouro

Sobre esses temas precisamos aprofundá-los a fim de compreendermos melhor as questões que dificultam a ampla utilização desse material e também para compreender melhor as necessidades de mudança cultural de projeção atreladas a eles.

É fato verídico que a madeira é um material combustível. No entanto, o pensamento comparativo de que o metal, a cerâmica e concreto não são materiais combustíveis e que isso garante maior resistência ao fogo acaba sendo falacioso e contraproducente.

Quando falamos em estruturas, as características prioritárias para resistência ao fogo são a previsibilidade de comportamento em situações de alta temperatura, e o tempo de escape do espaço. Nesse sentido, a madeira é muito mais resistente a altas temperaturas antes de perder suas qualidades estruturais, além de apresentar excelente previsibilidade de comportamento, tendendo a padrões previsíveis de morfologia de queima e tempo de queima. Além disso, a área carbonizada da madeira age como isolante térmico, três vezes mais eficaz que a própria madeira (CRUZ, 2005), protegendo o núcleo das peças estruturais e contribuindo para a manutenção de suas características estruturais por mais tempo.

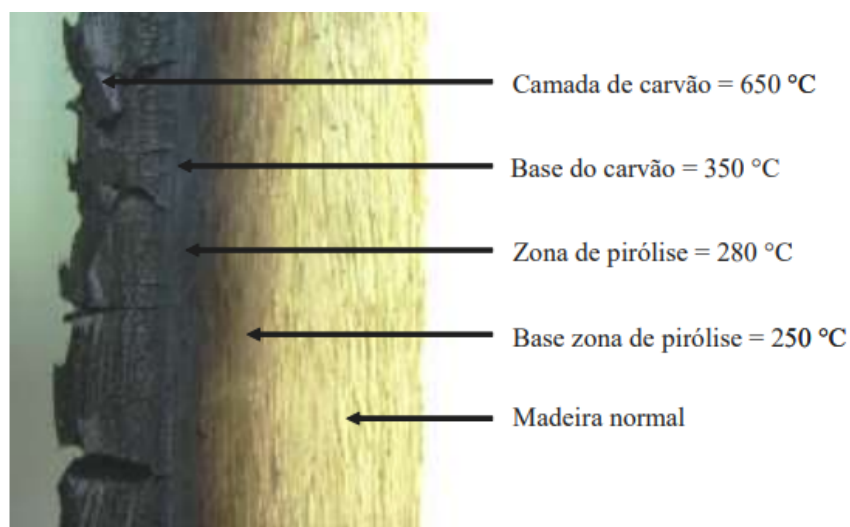


Figura 1.5 Camadas de combustão da madeira e temperaturas relativas. Fonte: FIGUEROA, 2021

No caso do concreto armado e de estruturas metálicas, por exemplo, por mais que não sejam materiais combustíveis em si, perdem suas qualidades estruturais de formas menos previsíveis e muitas vezes em temperaturas menores que as submetidas à madeira para terem o mesmo efeito. As deformações que a estrutura metálica pode sofrer, além de severas são imprevisíveis dependendo dos focos de maior calorimetria. O concreto armado sofre grande perda da resistência por rachadura e rompimento da seção de concreto em temperaturas mais baixas que 100° C, expondo as armações internas a deformações e perda de resistência. Enquanto que a madeira só inicia sua carbonização aos 280° C. (CRUZ, 2005)

Sabe-se que em países com robusta cultura em edificações em madeira como a suíça, as empresas de seguro de imóveis apresentam seguros mais caros e mais rigorosos para edificações que não são feitas em madeira, devido à maior imprevisibilidade de comportamento das estruturas. Incentivando o uso da madeira na construção civil devido a aspectos racionais de resistência a incêndios.

Na imagem 1.6 observa-se que uma viga de madeira apesar de carbonizada manteve sua função estrutural, essa estrutura perdeu grande parte da sua seção deixando à mostra alguns pregos metálicos remanescentes que estavam dentro do volume original. Na mesma imagem observa-se que outras vigas metálicas transversais sofreram severas deformações e perderam sua capacidade estrutural. As vigas deformadas apoiam-se sobre a viga carbonizada de madeira.

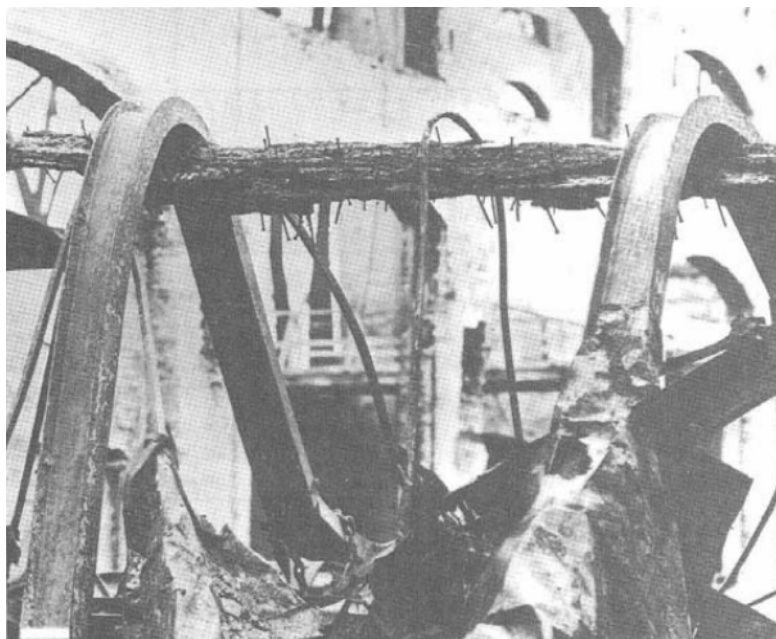


Figura 1.6: Imagem de edificação nos Estados Unidos da América, após incêndio. Fonte: RITTER, 1990;

CRUZ (2005), destaca que para se obter esse melhor desempenho em relação à resistência ao fogo a estrutura deve ter volume maciço e grandes espessuras são preferíveis. Em casos em que a estrutura seja composta em esquemas de filigranas de pequenas seções o desempenho cai consideravelmente. Madeiras massivas formadas a partir da cola de lamelas de madeira formando peças mais robustas também se comportam bem frente às altas temperaturas. Na figura 1.7 vemos um exemplo desse comportamento, embora altamente carbonizadas o interior da peça permanece intacto e não vemos grandes deformações



Figura 1.7: Secção de peças estruturais após serem submetidas a altas temperaturas. Fonte: MARTINS, 2016

Em relação aos xilófagos, quando comparados a países de clima temperado, de fato o clima tropical apresenta uma rica quantidade de espécies de insetos especializados em se alimentar de madeira. Madeiras consideradas de lei, que são altamente resistentes à predação de xilófagos geralmente são espécies de crescimento lento, de florestas nativas maduras e estão muito facilmente associadas a extrações irregulares. Para outras madeiras, especialmente as mais abundantes nos cultivos silvícolas, algumas qualidades de projeto são grandes aliadas na conservação das estruturas em madeira contra esse tipo de predação, especialmente a soltura da estrutura do solo. Aliado a essas estratégias, tratamentos químicos de superfície ou de percolação são utilizados para proteção extra.



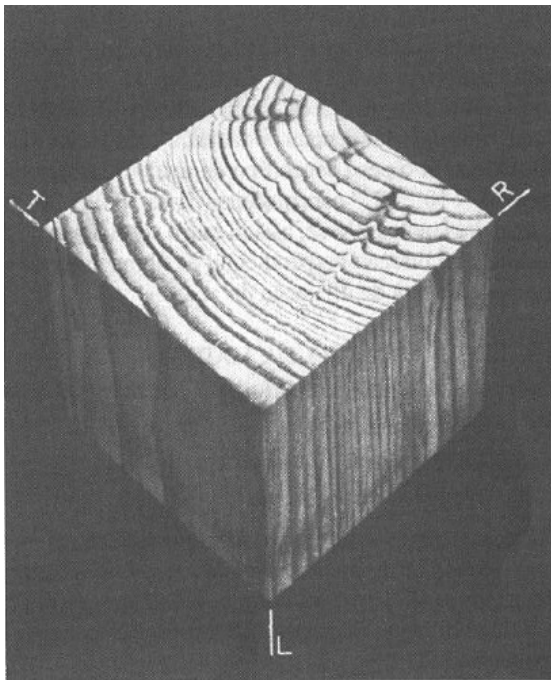
Figura 1.8: Templo Horyu-Ji, na província de Nara, Japão. Foto: worldhistory.org (acessado em setembro de 2022).

Um exemplo icônico a respeito da durabilidade da madeira, é a torre de tipologia pagode de 5 andares (figura 1.8) construída no complexo de construções do templo budista japonês de Horyu-Ji, na cidade de Ikaruga, província de Nara. O pagode em questão é considerado a edificação mais antiga em madeira do mundo, com mais de 1300 anos desde sua construção. Ao analisar os fatores físicos do estilo de construção pagode, que em geral tem grande resistência a abalos sísmicos por uma série de estratégias estruturais, especialmente em suas conexões entre peças estruturais e fundação, NAKAHARA et al. (2000) concluíram que a principal razão para a sobrevivência do templo a tantos anos de exposição a atividades sísmicas foi de fato a contínua manutenção da estrutura por parte da comunidade religiosa muito tradicional, garantindo a boa preservação das peças em madeira e a continuidade das qualidades de estabilidade da obra.

1.5 Características Físicas e Morfológicas da Madeira

Cada material construtivo apresenta características únicas, e compreendê-las é essencial para entender como esse material se comporta, e como melhor aplicá-lo em diferentes elementos construtivos. Quando falamos na madeira destaca-se sua característica heterogênea nascida de processos orgânicos, ou seja, nenhuma peça é exatamente igual à outra, visto que é oriunda de um ser que já foi vivente. Encontra-se diferenças nas características físicas e mecânicas de uma espécie para outra, dentre organismos de mesma espécie, e até dentro de um mesmo indivíduo (espécime). Os parâmetros principais da madeira são: grã e textura, densidade, resistência ao fogo, condutibilidade, teor de umidade e retratibilidade. Outros fatores químicos também apresentam grande importância, como a concentração de taninos, terpenóides e outros subprodutos biológicos que contribuem para a proteção contra pragas e predação. (SANTOS, 2018)

A madeira é um material anisotrópico, ou seja, tem uma resposta diferente para cada eixo de análise, e consequentemente reage diferentemente à força aplicada dependendo da direção do eixo de força. Isso é explicado pela orientação, disposição, quantidade e composição química dos elementos celulares e dos seus elementos morfológicos. Como a direção dos vasos e cerdas. A nível celular, a morfologia das células lenhosas atribui maior resistência no seu maior comprimento, e menor resistência no menor comprimento.



*Figura 1.9 Bloco de madeira para demonstração teórica do conceito de anisotropia com direta ligação da orientação dos feixes de vasos na madeira. Mostrando direções longitudinal (l), radial (r) e tangencial (t).
Fonte: Pfeil & Pfeil, 2003*

O manejo do crescimento dos indivíduos arbóreos são chave para a definição das suas propriedades gerais, o que significa que dados como temperatura, disponibilidade de luz, umidade de solo e composição química do solo de plantio vão influenciar nas características físicas de cada indivíduo atribuindo mais ou menos resistência à madeira oriunda desse indivíduo. Nesse sentido, as técnicas de silvicultura têm grande importância para definir algumas dessas características.

Apesar de todas essas variações nas características físicas, a madeira pode ser estudada em corpos de prova para compreensão dos parâmetros específicos por espécie e por indivíduo arbóreo e para melhor controle de qualidade das peças feitas a partir dessa matriz.

O comportamento mecânico da madeira enquanto elemento construtivo é também explicado pelas suas propriedades físicas. Por ser um material anisotrópico, a posição da peça é um fator determinante sobre como ela se comporta frente às cargas e forças empregadas.

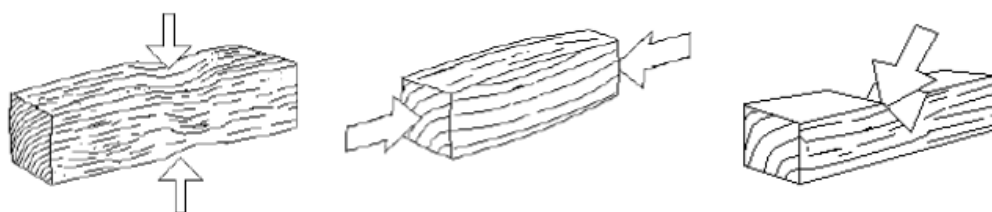


Figura 1.10 Comportamento da madeira quando sofre compressão em relação à direção recebida da força (Gesualdo, 2003)

Quando exposta à compressão a madeira responde bem quando o sentido da força é paralelo ao sentido das cerdas, sofrendo deformações mais elásticas, conseguindo recuperar forma semelhante à original. Já perpendicularmente ela apresenta baixa resistência à compressão e pode sofrer deformações não elásticas devido à compactação das células e perda dos vazios entre as paredes celulares.

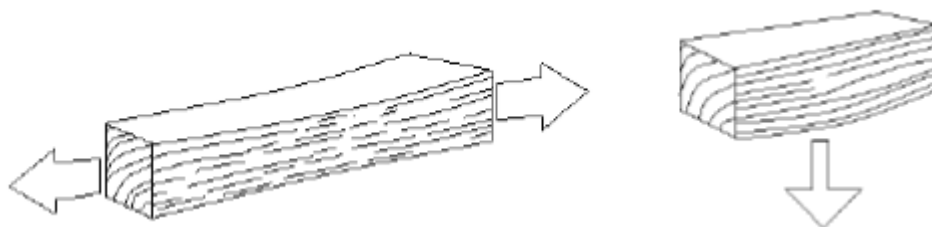


Figura 1.11 Comportamento da madeira quando sofre tração (Gesualdo, 2003)

Quando exposta à tração, a madeira apresenta alta resistência, no entanto com baixos valores de deformação são seguidos de ruptura. A resistência é maior quando a solicitação é paralela ao sentido das cerdas, aproximando as cerdas entre si. Quando a solicitação é perpendicular, a tendência é o afastamento das cerdas.

1.6 Preceitos Básicos do Projeto em Madeira

Um dos aspectos mais importantes no projeto para a madeira, especialmente quando se tem a madeira como principal material estrutural, é a necessidade de protegê-la das intempéries, especialmente no clima tropical. Esse fator é chave para a longevidade da obra e para que se obtenha comportamentos previsíveis das peças e estrutura como um todo. É necessário compreender que devido suas características orgânicas a madeira têm limitações claras em relação a seu uso enquanto elemento construtivo, e é bem vindo associá-la a outros materiais construtivos nas situações em que a madeira não trabalha bem os esforços ou não pode ser empregada devido à exposição à umidade.

Deve-se olhar com cautela a relação da estrutura com “céu e terra”, em outras palavras, a relação da edificação com o solo, e sua proteção à precipitação e à insolação. No quesito “terra”, as fundações devem ser feitas em outros materiais que lidam bem com a umidade, como pedras e concreto. A estrutura deve estar afastada do solo para evitar respingos d’água. Prevendo-se o efeito de percolação da água do solo acima para as fundações pode ser necessário um material intermediário não higroscópico e não poroso que dificulte a transferência da água percolada do solo para a madeira. É comum ver o uso de metal fazendo essa função intermediadora entre a fundação e a estrutura em madeira. Na arquitetura vernacular japonesa, por exemplo, vê-se a utilização de rochas magmáticas nesse papel de transição.

No quesito céu, é preciso proteger a estrutura da chuva e insolação excessiva. A cobertura tem especial função nesse caso. Estruturas expostas à chuva vão ter um tempo de vida incrivelmente reduzido, chegando ao ponto de precisarem ser descartadas dentro de uma década ou menos. Por isso o uso de longos beirais é bem vindo. O detalhamento estrutural é protagonista nas funções de resolver encontros mais ardilosos que podem findar na exposição das peças às intempéries, assim como seu encaixe com as fundações.

No projeto estrutural em madeira a estabilidade estrutural é outro fator importante a ser considerado. Por ser muito flexível, as peças em madeira têm uma tendência a torcer e fletir com certa facilidade. No projeto em madeira criar conexões rígidas requer soluções um pouco mais rebuscadas, enquanto conexões simples em geral formam conexões articuladas. Por esses motivos, a estrutura tende a balançar, necessitando de estratégias que façam com que as peças mantenham distância constante entre umas às outras. Por isso, travamentos, contraventamentos e núcleos rígidos em outros materiais são soluções que podem ser necessárias com a finalidade de garantir a estabilidade do projeto.

CAPÍTULO 2

TECTÔNICA: DA CLÁSSICA À DIGITAL

2.1 Tectônica e a interseção entre o Físico, o Virtual e o Digital

Para a Arquitetura a disciplina de Tectônica destaca grande importância e tem evoluído lado a lado com a própria teoria da arquitetura. Ao nos debruçarmos mais profundamente sobre o tema da tectônica passamos a entender com mais facilidade sobre o que de fato é arquitetura, e o que a separa das outras disciplinas relacionadas à construção. A arquitetura, de forma muito interessante, apresenta uma natureza dual entre arte e técnica, e requer atitudes e habilidades que possam utilizar-se dessa natureza dual, ou seja, de técnica e de arte, que atenda à função e à *aisthesis* (estética) e que faça uma ponte entre a idealização e a concretude; e a tectônica se debruça sobre as fronteiras entre essas distintas naturezas, que estão no coração da distinção entre o que é construção e o que é a arte da construção.

Quando visitamos a etimologia da palavra, vemos que “tectônica” deriva da palavra grega “tekton”, que a princípio era relacionada ao significado de “carpinteiro”, e com o tempo adotou um significado mais abrangente, se referindo aos artífices da construção em geral, para além da carpintaria. Eventualmente esse termo nasceu a palavra “archetekton”, que significaria mestre carpinteiro, ou mestre artífice-construtor, e que gerou o termo “arquiteto”. Não por acaso, são primas as palavras do grego arcaico: “Tekton” e “Techne”. A última se referindo às artes e ofícios, a partir da qual derivou-se o termo “Technos”, ou Técnica, relacionado a um sistema de saberes-fazer, e que eventualmente deu origem ao termo Tecnologia.

Para nosso tempo, a palavra tecnologia é mentalmente e imediatamente associada às fronteiras tecnológicas que vivenciamos na contemporaneidade: a robótica, as telecomunicações, a astronomia, a nanotecnologia, a computação, entre outras. Não obstante, a construção é pautada nas tecnologias mais antigas da humanidade e continua vivenciando avanços tecnológicos em crescente interlocução com outros campos do conhecimento, que a princípio não eram nem mesmo diretamente relacionados à construção. Essa árvore etimológica parece incitar uma conexão de conceitos que eventualmente busca-se concatenar neste presente trabalho. O que a carpintaria, os ofícios da construção e a tecnologia

podem nos dizer sobre a própria arquitetura? E nesse mesmo raciocínio, como a madeira enquanto material construtivo pode servir como metáfora para a relação entre a construção e o papel da arquitetura?

A própria ideia do arquiteto original como um mestre construtor, ou mesmo um mestre carpinteiro pinta uma ilustração interessante: uma edificação em madeira parece trabalhar com aquilo que é de mais essencial da arquitetura, o uso de peças reduzidas à sua forma, interconectadas e orquestradas entre si e com outros materiais, de forma a fazerem parte de um todo maior. A ideia do arquiteto como mestre construtor é bela, traz uma sensação de grande proximidade entre o arquiteto e a construção da sua obra. Para além da idealização da obra, o mestre construtor gere e constrói, pondo as mãos à obra. Quando comparado à imagem de um artífice construtor, o papel contemporâneo do arquiteto parece mais distante do canteiro de obras e das mãos que constroem, porém está muito mais carregado ao trabalho de idealização exaustiva do projeto e da coordenação de suas disciplinas. Em ambos os casos, tanto o arquiteto quanto o mestre construtor dividem o mesmo voto, o de compreender intimamente da construção, da sua estruturação e de como executá-la em maestria.

Falar sobre Tectônica é principalmente debruçar-se sobre a materialidade da arquitetura, entendida como a inter-relação entre a forma projetada da estrutura e os aspectos construtivos, que possibilitam realizar um projeto. Também, debruçar-se sobre sua expressão enquanto arte e sobre os aspectos culturais e sociais atrelados às tecnologias construtivas e os materiais usados. Autores como Semper, Sekler e Frampton, ajudaram a construir e desenvolver a ideia do que seria essa disciplina autônoma chamada por Tectônica e estas abordagens serão vistas neste trabalho para contribuir com essa compreensão.

A Tectônica é um aspecto presente na obra arquitetônica, desde a sua concepção à sua realização. No presente trabalho nos concentramos nos momentos de concepção e desenvolvimento de projetos, a qual faremos pelo estudo das transformações e abordagens que o termo tectônica sofre conforme o tempo, e os impactos das novas tecnologias, especialmente tecnologias utilizadas no processo de idealização e de design do projeto. A arquiteta/o arquiteto sempre se baseou em

meios físicos para conceber e desenvolver seus projetos, desde antes mesmo da profissão tomar o escopo que tem atualmente. O papel, as maquetes exploratórias, as maquetes representativas, o desenho, a escultura, a fabricação de protótipos (mock-ups), entre outros, sempre foram auxiliares para o processo de concepção e desenvolvimento de uma obra, e são os instrumentos intermediadores entre a ideia e a mente idealizadora.

É através dessas ferramentas que se busca um meio para enxergar a ideia fora da cabeça, analisá-la, desdobrá-la, refutá-la ou aprofundá-la. Conforme o avanço das tecnologias informacionais e da computação, as modelagens digitais passaram a prover formas diferentes de interação com essas ideias. Não só como um meio para representar as ideias e projetos, mas como desenvolvê-las a partir de princípios ou de parâmetros novos de forma que a interação com as informações quantitativas e dados científicos passaram a ser capazes de dar forma a novos caminhos metodológicos de se pensar a arquitetura.

Nos meios digitais a informação passa a ser manipulada de maneiras multidirecionais e flexíveis, de forma muito diferente que as mídias físicas, além de que novas ferramentas digitais estão sendo criadas a cada momento. Conforme o passar das décadas, especialmente no fim do século XX, a digitalidade na arquitetura passou a ser algo muito pertinente para a produção arquitetônica e a gerar pontos de inflexão, de forma que a própria teoria da tectônica teve que entender os fenômenos que derivam das abordagens digitais e revisitar os conceitos de tectônica frente a essa nova realidade. A partir disso, foram desenvolvidas teorias sobre design digital, especialmente no design pautado em materiais definidos, de onde derivou a própria linha teórica que se conhece por *tectônica digital*.

É natural o estranhamento inicial sobre o que seria uma *tectônica digital*, afinal de contas, quando falamos em *tectônica* nos referimos àquilo que é concreto, tátil e sólido, enquanto que quando falamos em *digital* falamos do não palpável, de elementos virtuais baseados em dados e processamentos de dados auxiliados pela máquina. Desde que as tecnologias de informação relacionadas a sistemas digitais chegaram ao ponto de ser capazes de reproduzir em cenários virtuais as regras matemáticas e físicas do mundo físico, o projeto arquitetônico passou a se abrir

para novos campos de possibilidades, pautando-se em modelos digitais sofisticados para prever comportamentos físicos.

O “outro” virtual de uma ideia que propõe-se a se tornar física, é um campo de possibilidades no qual se pode trabalhar, moldar, analisar, refletir, alterar diretamente as informações dessa ideia, em uma mídia que não é nem a mente do idealizador que pensou a ideia, nem a execução física da ideia. A virtualidade então traz para o ato de idealizar uma outra natureza de interação, um campo que fica entre a imaginação e a realização. Se nos debruçarmos sobre a definição da palavra virtual, “aquilo que existe apenas em potência, ou como faculdade, não como realidade”⁹, podemos entender que o virtual opõe-se ao que é real, é aquilo que ainda não é real. Uma ideia é virtual, e até mesmo um esboço em um papel tem sua carga de virtualidade, como sendo uma representação de algo que ainda não é realidade.

A virtualidade é natural no trabalho da arquitetura, visto que metade do emprego do arquiteto trata-se de trabalhar com ideias, conjuntos de informações e tomadas de decisões. No entanto a outra metade é sobre a realização da ideia, a virtualidade na arquitetura tem de, necessariamente, estar totalmente embebida de exequibilidade porque em última instância a arquitetura é uma arte que trata da realização concreta da ideia, e é por isso que a tectônica sempre será um assunto pertinente ao fazer arquitetônico.

2.2 Teoria Tradicional da Tectônica

Para a arquitetura, o termo Tectônica não apresenta definição única, é um conceito disciplinar que apresenta diversas nuances de acordo com o teórico que o define, portanto não é um termo monofilético ou homogêneo dentro da teoria. No entanto, sua essência toca alguns aspectos comuns que se consolidaram através das literaturas. Muitos foram os autores que ajudaram a moldar o termo e a disciplina,

⁹ Definição de “Virtual” do dicionário Houaiss.

mas nos debruçamos mais diretamente aqui às contribuições de Gottfried Semper¹⁰, Eduard Sekler¹¹ e Kenneth Frampton¹², por serem mais condizentes com o recorte de estudo deste trabalho.

Semper trouxe contribuições importantes para a teoria da arquitetura no século XIX. Sua teoria contribuiu para os debates sobre a prática arquitetônica corrente a esse século, sobretudo sobre o tema que relaciona a forma da arquitetura com as novas condições de materialidade colocadas pelos materiais industrializados da forma com que era feito naquele momento histórico, em especial destaca o ferro e o concreto armado.

Na obra “Os quatro elementos da arquitetura” de 1851, o autor consegue fazer uma leitura em várias camadas sobre os elementos arquitetônicos, tanto seus valores subjetivos quanto em suas relações com as tecnologias de fabricação e construção e como os materiais de construção. A partir de interpretações sobre um arquétipo da edificação primordial, a cabana Caraíba, o autor relaciona quatro técnicas tradicionais como elementos básicos de análise: a tectônica, o têxtil, a cerâmica, e a estereotomia. A essas técnicas o autor traça relações aos materiais utilizados, indicando o melhor uso dos materiais de acordo com suas características físicas e o emprego apropriado desses materiais, bem como sua simbologia em relação ao uso humano.

Na sua análise o autor aborda o conceito de tectônica como sinônimo de carpintaria, e associa-a à construção do telhado. O telhado é o elemento da recobrir a edificação, cuja função é a proteção às intempéries e que tem a madeira como matéria-prima. O têxtil é relacionado ao invólucro, aos fechamentos da edificação, como paredes, portas e janelas, e tem o tecido como matéria prima. A cerâmica é relacionada à lareira, segundo Semper, o coração do lar (curiosamente destaca que não por acaso a palavra “lar” está contida em “lareira”), relacionado ao fogo, aos utensílios e ao preparo das refeições, cenário de momentos de socialização e confraternização. A matéria-prima da cerâmica é a argila. Por último destaca-se a técnica da estereotomia, que é responsável pela manipulação, tratamento e corte de

¹⁰ “Der Stil”, de 1860

¹¹ “Structure, Construction, Tectonics” de 1965

¹² “Studies in Tectonic Culture”, de 1995

peças em pedra. A essa técnica Semper associa o terrapleno das edificações, as bases firmes sobre as quais se edifica, cuja matéria prima é a pedra. As análises de Semper abrem um precedente interessante tanto para o estudo das particularidades de cada material para a arquitetura, quanto para a tentativa de dissecar os elementos arquitetônicos de acordo com sua função dentro do todo arquitetônico e sua relação com a experiência humana.

Um século depois, o historiador de arte Eduard Franz Sekler (1965), em um esforço de delimitar e discernir os conceitos de “estrutura”, “construção” e “tectônica”, define a obra arquitetônica da seguinte maneira:

“[Architecture is] a synthesis of static-aesthetic sensitivity (tectonics), technical knowledge (structure) and mastery of execution (construction).
(...) Structure (an intangible concept) is realized through construction and given visual expression through tectonics.”
(SEKLER, 1965)

O que em tradução livre para o português brasileiro seria:

“[Arquitetura é] Uma síntese entre sensibilidade estético-estática (tectônica), conhecimento técnico (estrutura) e maestria de execução (construção).
(...) A estrutura (um conceito intangível) é realizada através da construção e dada expressão visual [forma] através da tectônica.”(SEKLER, 1965)

O autor aqui define a tectônica como sendo uma intenção clara de utilizar conscientemente os aspectos construtivos como veículos de um gesto artístico do arquiteto. Ou seja, sob a visão de Sekler, a *Tectônica* para a arquitetura seria a utilização organizada e intencional dos elementos construtivos, tanto em sua forma, quanto em seu material e seus atributos estéticos para fins de causar efeitos e sensações no espectador-utilizador da obra arquitetônica. Quanto ao termo *Estrutura*, o autor não cita-a como a compreendemos atualmente, sinônimo de uma disciplina de engenharia, ou mesmo voltado à parte fisicamente ativa de uma

edificação, mas sim a compreensão dos elementos totais da construção, compreendidos isoladamente e em interação entre si. É sobre a hierarquia de importância, sobre a sobreposição de camadas, e a interconectividade desses elementos. Quanto ao termo *Maestria de Execução*, trata sobre os conhecimentos práticos da construção, e do comportamento da construção. É sobre como executá-la em maestria, como atingir a correta e melhor execução, e pode-se inferir que está muito voltado à compreensão da fabricação e execução da obra, dos detalhes, prevenção de patologias, proteção da edificação, bem como do correto emprego de materiais e técnicas construtivas.

Sekler (1965), discorre que as obras arquitetônicas podem ser mais ou menos tectônicas, no sentido de que podem demonstrar mais ou menos claramente suas intenções estruturais e construtivas, ou por serem menos ou mais explícitas em relação à materialidade e forma de suas estruturas. Construções que deliberadamente escondem seus partidos estruturais, ou confundem o espectador com atributos contraditórios aos seus princípios físicos podem ser consideradas obras *atectônicas*, ou mesmo dizer-se que há uma negação tectônica em suas concepções.

Por outro lado, certas obras podem ser compreendidas como uma realização perfeita de um princípio estrutural. Exemplos clássicos são as obras do espanhol Eduardo Torroja e do italiano Pier Luigi Nervi. Ambos arquitetos-engenheiros que buscavam a estética das obras a partir de lógicas claras de transmissão de forças, buscando alcançar eficiência e economia a partir das formas escolhidas.



Figura 2.1: Hipódromo de Zarzuela, Carlos Arniches, Martin Domingues e Eduardo Torroja. Foto: Ana Amado. Fonte: archdaily.com (acesso dia 1 de abril de 2022)

No projeto do Hipódromo de Zarzuela, de Eduardo Torroja, as formas geométricas básicas que regem o formato das estruturas são claras estratégias de condução das cargas em busca de maior esbeltez e equilíbrio estático. Isso pode ser observado no desenho que define o desenho estrutural da cobertura da arquibancada, onde percebe-se que a grande extensão frontal da cobertura é formada por um grande volume, em balanço, longo e esbelto que é contrabalanceado pelo segmento traseiro dessa mesma coberta, mais curto e mais robusto.

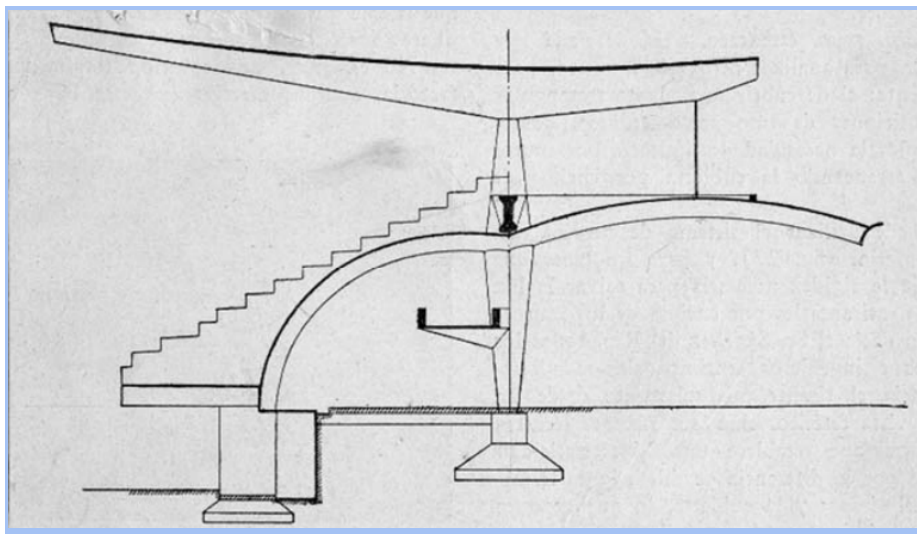


Figura 2.2: Desenho de Eduardo Torroja, Seção Transversal do Hipódromo de Zarzuela. Arquivo Torroja (TIPPEY, 2017)

Os pilares foram simplificados em um único eixo central, no ponto perfeito de equilíbrio de ambas metades em balanço da cobertura. Ambos os volumes desta cobertura são decompostos em grupos de arcos que distribuem o peso da coberta gentilmente nos pilares centrais. As formas das cobertas são mais finas e delicadas quanto mais na ponta do balanço, reduzindo o momento fletor, e mais robustos quanto mais se aproximam dos pilares, alinhando o centro gravitacional no eixo de

transmissão dos pilares. O peso da arquibancada também é distribuído em arcos maciços apoiando-os parcialmente no solo e no eixo central de pilares.



Figura 2.3: Hangar orvieto, finalizado em 1935. Foto: autor desconhecido, usada aqui sob os termos de “fair use”, extraída do domínio archdaily.com, acesso em junho de 2022

O Projeto do Hangar Orvieto finalizado em 1935, atualmente demolido, é um projeto de Pier Luigi Nervi, feito para a força aérea italiana. O Hangar é construído em concreto armado, com um casco fino de aproximadamente 7,5 cm como coberta, e uma malha nervurada mais profunda o sustentando. É como se podemos enxergar nesse projeto claramente o caminho de distribuição das forças da abóbada para os pilares e então para o solo através das nervuras. O sistema construtivo é claro e a massa do projeto é reduzida aos pontos essenciais de transferência de força, enquanto que os trechos menos ativos fisicamente são esbeltos e discretos.

Kenneth Frampton (1990) discute que o termo tectônica nunca pode ser desassociado do tecnológico, e assim como Sekler discorre que o termo traz uma ambivalência com carga de tecnicismo e de efeitos estéticos. Mas o autor enxerga que o objeto construtivo pode ser pertencente a três categorias analíticas:

1. O objeto **tecnológico**, que seria puramente oriundo do atendimento direto de necessidades instrumentais.
2. O objeto **cenográfico**, que teria uma expressividade oriunda de uma intenção demasiadamente artificial, que alude a algo que está escondido ou ausente
3. O objeto **tectônico**, que pode ser ontológico (técnico-estrutural) ou representacional (simbólico-estrutural).

Sendo o ontológico algo equivalente ao que foi postulado por Sekler, uma obra que enfatiza o seu papel estático-físico com efeito estético, porém Frampton expande a leitura desse objeto tectônico para a expressão cultural humana da construção.

O autor faz duras críticas à arquitetura que chama de cenográfica, que privilegia grandes feitos em volume e superfícies. O autor indica que as obras que escondem seus partidos construtivos afastam a humanidade da compreensão empática do que é feita a arquitetura, assim como Sekler o fez quando se referiu ao atectônico. Frampton defende que a construção sempre permanecerá essencialmente sendo algo tectônico invés de cenográfico e clama pela defesa de uma “cultura tectônica”, que seria uma atitude de prática profissional baseada no conceito de verdade estrutural, expressiva e histórica, de forma que os projetos venham a demonstrar clareza construtiva e honestidade estrutural.

Muito alimentado pela crítica ao movimento moderno, especialmente a que embasou o regionalismo crítico, Frampton discute sobre fatores ainda mais subjetivos voltados às relações culturais que se pode traçar com a materialidade das edificações. O autor destaca que o desenvolvimento da arquitetura sempre é um produto entre as condições humanas de produzir e o desenvolvimento da ciência e que a resultante desses dois fatores exprime um momento no tempo-espço da humanidade.

Essas informações vão para além de uma análise técnica ou até mesmo artística sobre a materialidade de uma construção, sua visão traz uma sensibilidade maior para olhar a arquitetura vernacular e sua diversidade, enaltecendo as leituras

de contexto social e cultural a partir do quais as formas de construir nasceram e nascem.

Frampton ainda destaca que uma abordagem [de projeto e de análise] sensível ao contexto é uma reconciliação pós-moderna da arquitetura com os aspectos locais e artesanais de produção. Ao não ignorar seu contexto regional, a projetista ou o projetista estaria assim se contrapondo à mercantilização e generalização da arquitetura.

Vallhonrat (2000) destaca que por mais que se preze pela verdade estrutural e a transparência dos princípios tectônicos, como defendido pelos mestres modernistas, alguns determinados aspectos relacionados à construção são mesmo, por natureza, invisíveis para quem experimenta a obra. Em particular exemplifica como a técnica do concreto armado, por conceito, tem inúmeras sub-estruturas metálicas embutidas no concreto e através dos quais acontece a maior dinâmica de transmissão de forças porém invisíveis para quem observa a obra. Nessa visão mesmo obras com clara intenção estrutural e alta expressividade tectônica podem apresentar alguns aspectos que são mais inconspícuos a quem experiencia a obra completa, sendo somente claro para o momento do projeto e aqueles envolvidos com ele.

Podemos discorrer que obras que têm a madeira como material protagonista também podem assumir partidos atectônicos, se a compreensão construtiva da obra for de difícil apreensão, ou quando esta encontra-se demasiadamente oculta por outros elementos. Porém, um dos aspectos chave do uso construtivo da madeira é sua clareza estrutural, visto que em geral seus elementos são claramente identificáveis e podemos distinguir facilmente o que constitui as peças estruturais, e os elementos construtivos. Se compostas ou simples, e a partir disso inferir as transmissões de forças, travamento, conexão ou engaste. Aí reside sua poética. E é a partir dessa constatação que o significado do que é tectônico faz especial sentido quando atrelado à carpintaria e ao uso da madeira.

2.3 Tectônica no Exercício de Projeto

O trabalho do projetista é de exercer uma conduta antecipatória. Uma simulação mental de desenvolvimento de uma ideia e resolução e/ou caracterização dos problemas para os quais o projeto busca atender. (BOUTINET, 2002) O desenvolvimento do projeto arquitetônico é complexo no sentido de que apresenta muitas variáveis a serem consideradas, e consiste em aspectos que vão além da qualidade espacial e programática que por si só já exigem bastante atenção e empreendimento.

O termo tectônica foi conceituado e caracterizado por diferentes autores desde o século XIX até os tempos atuais e contemporâneos. A maioria deles pretendeu focar em como a atenção inicial do projeto nos aspectos construtivos são capazes de trazer expressividade e valor à obra arquitetônica. Isso significa uma verdadeira intenção conscienciosa do uso de materiais e de resolução construtiva. Desse modo, tais aspectos apontam para um ponto de partida para o projeto arquitetônico que é o especial foco na idealização da construção no seu mais íntimo e basal significado.

O desenvolvimento do projeto partindo do tectônico trata desses aspectos que são essenciais para a construção, e de projetar a partir do conhecimento das formas e características construtivas dos materiais com que se trabalha. Também sobre a qualidade imaginativa da exequibilidade dessas ideias. Não é sobre exercer uma conferência *a posteriori* de se são ou não exequíveis, mas a preocupação da resolução material ser uma inserção inicial e elementar da ideia. Isso não é tarefa fácil, visto que exige grande proximidade com todas as questões práticas e técnicas da construção e dos materiais, especialmente quando se entende que cada sistema construtivo tem em si um grande repertório de soluções, comportamentos e uma cadeia complexa de lógicas e agentes envolvidos no fornecimento do material, produtos pré-fabricados, produtos artesanais, e por aí vai.

O arquiteto não trabalha diretamente com o material como o artesão ou o construtor o faz, mas sim com a ideia do material. (AMARAL, 2012) É um trabalho

sobre conseguir concatenar para estruturar uma coerência da estrutura hierárquica dos itens, como pontuada por Sekler. Não só dos elementos fisicamente ativos da construção, mas da totalidade da obra considerando a interrelação entre os sistemas estruturais e construtivos com os subsistemas de fechamento, cobertura e elementos diversos. Isso significa um exercício de prática constante e também uma escolha projetual e metodológica de abordagem do profissional. Projeto e obra são duas entidades distintas, e pode-se indagar se o trabalho do arquiteto consiste em desenvolver o projeto ou garantir o resultado da obra, e claro que há muitos agentes e elementos necessários para ambas as etapas, especialmente na etapa da construção *per se*.

No entanto, quanto mais ausência de informações construtivas e ausência de intenção estrutural e material, leia-se falta de consistência (ou consciência) tectônica no projeto, mais afastada estará a obra do projeto. Quando o projeto não é pautado pela materialidade ele perde seu caráter de ideia passível de ser construído e passa a priorizar aspectos estéticos, programáticos ou espaciais. Deixa-se, assim, uma lacuna, que trará empecilhos no processo de construção e/ou ficará para ser preenchida a partir da decisão de outros agentes. Um projeto que falta informações construtivas em seu desenvolvimento está “à deriva” e muito mais suscetível à imprevisibilidade e à perda de controle durante sua execução. O que pode acabar trazendo dificuldades para os aspectos programáticos e espaciais que foram priorizados em primeiro lugar.

A principal preocupação da construção, por mais que óbvia, é sobre manter o edifício em vitória sobre a gravidade, mantendo seu equilíbrio estático e garantindo a correta transferência das forças e boas soluções de contenção dos esforços sofridos e as resoluções estruturais são dependentes dos sistemas construtivos e dos materiais que são usados.

A autora Izabel Amaral (2012) destaca alguns dos elementos principais que são elencados por autores que discutem a tectônica e interpreta na prática algumas antíteses, ou espectros de parâmetros de escolhas a ser avaliadas durante o processo de projeto, de forma a conectar a forma do projeto às estratégias construtivas

escolhidas. A autora nomeia esses parâmetros de “tensões tectônicas do processo criativo”:

1. A soltura da edificação do solo <> O enterramento da edificação no solo.
2. A variedade construtiva <> A homogeneidade construtiva.
3. A dimensão representacional <> A dimensão técnica.
4. Sistemas construtivo em filigranas <> Sistema construtivo em corpos sólidos

Diante dessas variáveis iniciais, podemos elucidar aspectos práticos de caminhos que podem ser percorridos durante o desenvolvimento de projeto, no que diz respeito à vastidão de aspectos construtivos que uma obra arquitetônica pode vir a ter. dentro desse conjunto de 4 parâmetros, pode-se encontrar uma análise combinatória de 4*4 possibilidades. Como exemplo pode-se citar o desenvolvimento de projeto que priorize uma variedade construtiva dentro do mesmo projeto, focada no enaltecimento das dimensões técnicas que essas escolhas trazem para o projeto, utilizando-se de um sistema construtivo em filigranas que seja solto do solo.

Outras variáveis qualitativas podem ser consideradas para direcionar esse processo: a necessidade dos clientes/usuários finais, o contexto geomorfológico do terreno, realidade orçamentária, disponibilidade de materiais e de mão de obra especializada, o significado simbólico e prático do sistema construtivo escolhido, legislação vigente etc. Além desses atributos, vale destacar que a origem dos materiais, impacto ambiental, eficiência energética, também são extremamente pertinentes para o contexto contemporâneo.

Segundo os autores Vries e Wagter (1991; apud ANDRADE, 2012) processos de projeto arquitetônico em geral são mal resolvidos, abertos e têm dificilmente pontos de partida claros. Em meio a uma grande quantidade de informações, uma das maiores dificuldades de desenvolvimento de um projeto é determinar a hierarquia de problemas a serem resolvidos e a falta de delimitantes. E na busca de soluções, os arquitetos procuram gerar estratégias, desenvolvê-las, pô-las em análise, tanto de forma íntima ou junto a colaboradores externos e posteriormente avaliar se são boas decisões ou não. Essa acaba sendo um fluxo padrão e intuitivo de projeto, que é repetido em ciclos recorrentes até que se cumpra uma validade de prazo, ou que se

entenda que o resultado é satisfatório para posterior aprofundamento. Vries e Wagter também mostram que o que determina a construção da expertise do profissional é exatamente ter registro de inúmeros sucessos e fracassos sobre soluções executadas em um grande número de problemas para afinamento de soluções e maior consciência na escolha da estratégia de projeto a ser utilizada.

Isso nos conecta à importância de construir repertório de experiência em práticas construtivas para fomentar uma cultura tectônica de projeto. O relacionamento com a prática da construção e com procedimentos experimentais impulsiona a proximidade com os materiais e uma sensibilidade sobre o comportamento estático das edificações, e permite que as decisões de projeto tenham mais familiaridade com preocupações construtivas e sejam mais voltadas à prática construtiva.

Kenneth Frampton é bem sucedido ao encarar esse tipo de aproximação de projeto com uma noção de “cultura”, de tal forma que são quesitos influenciados pelo meio em que os arquitetos e engenheiros se formam e desenvolvem seus trabalhos. Influenciado tanto por escolas de prática profissional (relação mestre-aprendiz) e também pelo ensino provido nas universidades. Uma cultura tectônica precisa acontecer dentro do que se entende por uma trajetória pessoal do profissional e também por um meio propício ao diálogo constante entre profissionais, especialmente arquitetos e engenheiros entre si, e desses profissionais com a indústria.

Marina Borges (2019) destaca o papel das Universidades na sensibilização tectônica dos profissionais, leia-se uma capacidade de exercitar a conduta antecipatória dos aspectos construtivos, bem como o de nutrir a prática exploratória no desenvolvimento tectônico de projeto. A autora desenvolve em experimento pedagógico uma disciplina voltada para alunos de arquitetura e engenharia trabalharem juntos em equipe na construção de projetos centrados nas resoluções estruturais respaldando-se em métodos físicos e digitais e explora junto aos alunos a diversidade de concepções estruturais que podem acontecer no desenvolvimento dos projetos.

2.4 Informatização e Computação na Arquitetura

Contemporaneamente as edificações são desenhadas, documentadas, fabricadas e montadas com o auxílio de meios digitais (MITCHELL, 2005). Mesmo essa sendo a realidade contemporânea da quase totalidade dos processos atuais na construção civil, especialmente na arquitetura, há muitas formas de utilização dos meios digitais e precisamos compreender como que essas formas diferem entre si para compreender as diferentes formas de relações que o designer/projetista pode ter com esses meios e o que essas interações podem resultar enquanto produto.

Dois conceitos gerais nos ajudam muito a compreender a relação do projetista com o ambiente digital, são eles os conceitos de *informatização* e *computação*, como explicado por Terzidis (2006). Atualmente o modo dominante de utilização de computadores e meios digitais está relacionado ao conceito de *informatização* muito mais que ao conceito de *computação*.

A *informatização* é o ato de dar entrada, processar ou armazenar informações em um computador e está muito mais relacionada à necessidade de automatização, mecanização, digitalização e conversão. Em termos de processos, essa modalidade de utilização está muito relacionada à manutenção de uma cultura tradicional de projeção e processos pré-estabelecidos na mente e cultura do projetista e sua inserção em um ecossistema digital/computacional. Em outras palavras, já existe um processo pré-estabelecido pelo desenhista, tal qual pensado na prancheta, o qual independe de um meio digital para ser possibilitado, mas usa-se dos meios digitais para inserir, registrar, armazenar essas informações, em geral para facilitar questões de representação, edição, gerenciamento e compartilhamento.

Em contraste, a *computação* é um conceito que é explicado pelo ato de determinar ou calcular por métodos lógicos ou matemáticos, e é muito mais relacionado à exploração de processos indeterminados, vagos e incertos, ou seja, utiliza-se o meio digital para explorar e investigar um processo e para assim tentar chegar em um ponto de interesse. Terzidis (2006) define a *computação* como sendo

um ato que objetiva estender as capacidades da mente humana apoiada pelo funcionamento da máquina e está intimamente associada a palavras-chave como racionalização, lógica, algoritmo, dedução, indução, extrapolação, exploração, estimativa...

A digitalidade no design (projeto) abriu novas formas de interação com a informação de um determinado design/desenho/projeto, bem como a forma com que essa informação respalda processos no desenvolvimento dos mesmos. O raciocínio de design desenvolvido a partir do design digital abriu possibilidades que vão além do ato de informatizar processos que já aconteciam a nível de pranchetas, e meios analógicos. O design digital trouxe novos paradigmas e abordagens para o processo de pensar e desenvolver projetos, com um maior nível de complexidade, maior sensibilidade e flexibilidade às exigências de aspectos contextuais como locação, programa e expressividade artística (MITCHELL, 2005; RIVKA, 2006). De forma que a digitalidade se torna um ambiente exploratório para novos processos não-determinísticos de desenvolvimento de projetos, muito mais do que apenas uma mídia transcritiva de processos pré estabelecidos e pré-determinados.

A arquitetura, a engenharia e a construção têm sido altamente impactadas mundialmente por processos de informatização e de computação, especialmente do final do século XX em diante, e isso trouxe fortes impactos nas capacidades de produção arquitetônica, e de desenvolvimento e concepção de projetos. Podemos citar alguns escritórios e arquitetos de grande destaque internacional envolvidos em processos exploratórios dessa primeira era digital da arquitetura, como Frank Gehry, Zaha Hadid, Norman Foster e Renzo Piano, cujas produções foram altamente impactadas por processos de concepção arquitetônica pautados em processos digitais de design.

Andrade (2012) destaca que as primeiras gerações a explorarem a digitalidade nos projetos arquitetônicos em geral possuíam metodologias e processos muito fragmentados e os implementavam majoritariamente em práticas formalistas, especialmente para gestionar e gerir projetos que tinham formas complexas e

não-euclidianas¹³. Isso foi muito intenso na década de 1980, mas a partir dos anos 1990 em diante houve inovações metodológicas concretas que passaram a modificar a forma com que os arquitetos eram capazes de desenvolver, avaliar e representar a forma arquitetônica. A década de 1990 foi o período do desenvolvimento de novas metodologias e processos de Design Digital, especialmente em relação à investigação da materialização usando meios digitais, relacionadas a simulações e análises digitais de desempenho das formas e na criação de algoritmos e lógicas matemáticas para desenvolvimento de projeto.

2.5 Design Digital e Materialidade

Design digital é um campo amplo que envolve teoria, metodologia e prática, e que diz respeito a profissionais de diferentes áreas de atuação, incluindo designers, arquitetos, engenheiros, entre outros. Esse campo reúne um grande conjunto de conceitos e processos na concepção e desenvolvimento de projetos através do uso de modelos digitais e ferramentas digitais auxiliares. O campo do Design Digital foi responsável por causar uma mudança cultural na forma de desenvolver projetos nos diferentes campos de atuação, e ainda têm um potencial exploratório imenso que ainda está em constante desenvolvimento.

Segundo Leach (2009), essas mudanças na arquitetura estão relacionadas especialmente à exploração de processos que buscam por melhor desempenho como prioridade, ao invés de uma preocupação sobre aspectos estéticos ou de estilo. Aspectos, antes considerados como secundários ou considerados posteriormente como questões estruturais, construtivas, econômicas e de impacto ambiental, passam a ser informações de inserção prioritária, a partir do qual se desenvolve o projeto.

Leach entende que essa mudança cultural está relacionada às investigações do paradigma da Morfogênese, que seria uma busca por uma forma (form-finding)

¹³ Geometrias euclidianas são construídas a partir de linhas retas e planos paralelos entre si. As geometrias não-euclidianas são construídas a partir de planos elípticos ou hiperbólicos.

ao invés da imposição de uma forma (form making), processos bottom-up ao invés de top-down, em que ao invés de estabelecer uma forma para o projeto, estabelece-se um modelo de formação, mais fluido e relacionado a investigações processuais, e características variáveis e são especialmente pautados em parâmetros de desempenho. A morfogênese digital busca desenvolver processos de projeto inspirados em biomimetismo, ou seja, observar métodos e processos naturais aos seres vivos e a evolução a processos de projeto. Não se trata de replicar formas tais quais encontradas na natureza, mas sim o processo pelo qual essas formas se desenvolveram ao longo dos anos. Isso é baseado na exploração das capacidades dos materiais, sua forma e performance, e cujos resultados são obtidos a partir de lógicas evolutivas, onde se testa, e otimiza até encontrar soluções mais adequadas.

Segundo PUIG (2020) três ações elementares são chave para compreendermos a morfogênese digital, são elas: *Geração, Simulação e Otimização*. A *Geração* está relacionada a processos de criação de uma forma, solução ou design, através de métodos de form-finding (busca da forma). A *Simulação* envolve uma replicação virtual que mimetiza processos reais de sistemas reais e provê a possibilidade de avaliações de diferentes cenários para auxiliar na tomada de decisão. A *Otimização* é feita a partir da busca pelas melhores soluções em um determinado sistema ou cenário, a partir da comparação de diferentes opções de design e a partir das avaliações de suas capacidades em resolução de problemas específicos ou performance.

2.6 Tectônica Digital

A partir das abordagens de Design Digital intrinsecamente embasadas na materialidade e nas características físicas da fabricação, surgiu a noção da Tectônica Digital, como formas de aprimoramento das capacidade de concepção tectônica na arquitetura utilizando mídias digitais e tecnologias computacionais. A primeira menção de Tectônica Digital foi dada por William Mitchell (MITCHELL, 1998; apud

OXMAN, 2012) o qual propunha um termo chamado *Materialidade Virtual*, que buscava descrever um ambiente virtual computacional que acomodasse uma representação dos comportamentos matemáticos e físicos da matéria.

Oxman (2012) a partir da leitura de contexto de literatura daquele momento detalha categoricamente o conceito de *tectônica digital* como as nuances de seus significados:

- a) Tectônica digital é relacionada a formas de simular, analisar e interpretar a matéria dentro de um ambiente virtual;
- b) Tectônica digital é formativa no desenvolvimento de novas tecnologias construtivas atreladas a sistemas de inteligência, como sistemas adaptativos e responsivos com características dinâmicas como movimento, sensibilidade ambiental ou capacidade de controle de interação entre edificação e ambiente externo.
- c) Tectônica digital representa uma mudança entre métodos tradicionais de construção com a contribuição das tecnologias de fabricação atreladas a métodos de projeção digital e sua comunicação com produção de obras.
- d) Tectônica digital representa uma mudança no paradigma de Design Thinking (ou raciocínio de projeto) como uma mudança na relação da arquitetura com a estrutura e uso de materiais, assim como na síntese criativa entre arquitetura e engenharia civil
- e) Tectônica digital representa metodologias de busca de forma e processos morfogénéticos
- f) A tectônica digital trata também dos avanços científicos e tecnológicos de novas materialidades adaptativas, como o desenvolvimento de "*smart materials*", materiais adaptativos, que exploram comportamento material em novas configurações e novos sistemas arquitetônicos.

Enquanto a tectônica analógica ou tradicional é explorada e desenvolvida a partir de mídias físicas, do uso do papel e das modelagens físicas, a tectônica digital

é desenvolvida a partir de metodologias digitais de design de forma intrincada a técnicas de fabricação e construção. Vemos então que a tectônica digital acaba se tornando um campo de interesse e de interseção entre designers, arquitetos e engenheiros, e até mesmo outros profissionais como físicos, químicos no desenvolvimento de novas tecnologias construtivas, práticas e metodologias de projeto e novas possibilidades nas ciências da construção.

O autor Neil Leach, no livro “Digital Tectonics” (2004) define que as inovações do design digital trouxeram uma divisa paradigmática na forma de fazer a arquitetura e vê a tectônica digital como sendo um processo de concepção e de projeto baseada na Análise, Geração e Otimização das formas. O autor reforça que esse processo de design torna-se um exercício de *sensibilização tectônica* enquanto a experimentação tectônica é promovida e respaldada nas avaliações de performance e de eficiência das mais diversas disciplinas, entre elas podemos destacar análises de performance estrutural e análises de conforto (térmico, lumínico, acústico).

A autora Rivka Oxman (2012) tratou detalhadamente das diferentes formas de interações e metodologias entre essas etapas conceptivas e de fabricação/construção e chegou a sugerir um novo termo “*Informed Tectonics*” ou “*Tectônica Informada*”, como sendo um termo pragmático que diz respeito a uma resolução clara de matéria, forma, sistema construtivo e métodos de execução/fabricação/construção para chegar na forma definitiva do projeto, de forma que toda essa informação faça parte do *input* inicial da concepção do projeto, ou seja como sendo elemento essencial com o qual se desenvolve o Modelo Digital.

Para ilustrar alguns dos conceitos aqui discutidos temos o projeto do Clube de Golfe das Nove Pontes, desenvolvido para o estabelecimento sul coreano pelo escritório japonês Shigeru Ban Architects. [Ver figura 3.1] A partir de uma noção clara e tectônica, a forma é inspirada nos travesseiros tradicionais de corpo inteiro da cultura sul-coreana, feitos em treliças de bambu e fabricadas artesanalmente. O escritório desenvolveu um sistema de malha que em certos momentos forma pilares e em outros um sistema de vigas entrelaçadas. A complexa malha de formas não-euclidianas em dupla curvatura, foi desenvolvida a partir de ‘modelos formativos’ (explicaremos melhor no próximo tópico teórico) com processos de

‘busca de forma’ (form-finding), onde se obteve uma forma mãe, que depois foi traduzida e sintetizada em peças de menor tamanho, montáveis por métodos de encaixe madeira-madeira.

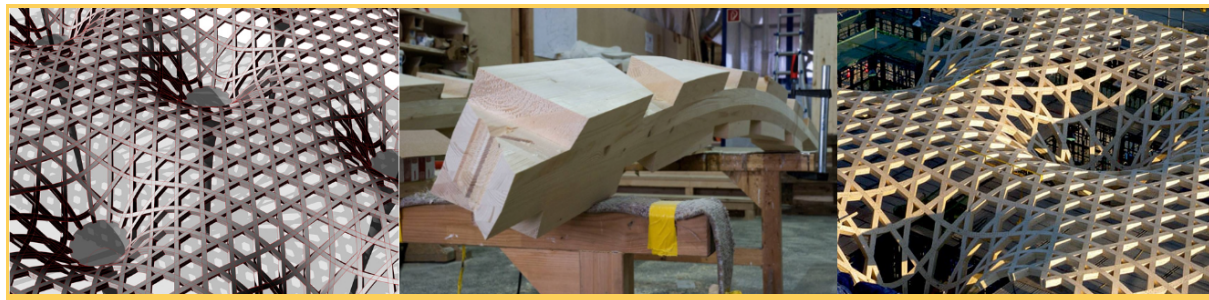


Figura 3.1: Projeto do Resort de Golfe das Nove Pontes em Yeosu, Coreia do Sul. Shigeru Ban Architects.

Blumer-Lehmann AG SJB Kempter-Fitze & Création Holz; consultoria de Fabian Scheurer.

Da esquerda para a direita: a) Modelo formativo do projeto b) Peça segmento da malha de vigas entre-cruzadas feita em madeira lamelada, e cortada através de máquina CNC. c) Montagem do sistema de malha.

2.7 Modelos Digitais

O design digital é construído a partir de modelagens ou modelos digitais. Se considerarmos que os conceitos de *informatização* e de *computação* são duas pontas de um espectro em que podemos localizar um item de estudo, o modelo digital pode estar em qualquer lugar desse espectro por poder apresentar características muito distintas, especialmente quando observamos as possíveis interações entre a informação contida no projeto e o projetista. Tão plural é sua natureza que torna-se então necessário aprofundar os nossos estudos sobre as possíveis naturezas dos modelos digitais, e categorizá-los de forma a facilitar sua compreensão. Vamos aqui adotar os modelos descritos por Oxman (2006), que consistem nas cinco categorias principais a seguir:

- a. Modelos CAD (Desenho Assistido por Computador)
- b. Modelos Formativos
- c. Modelos Generativos
- d. Modelos Performativos

e. Modelos Integrados Compostos

Na publicação em questão, a autora desenvolveu uma análise categórica sobre os Modelos Digitais desenvolvidos para vários campos de conhecimento, para citar alguns, foram contemplados modelos usados para as engenharias, arquitetura, design, geologia, física, entre outros, embora o enfoque principal tenha sido para a área da arquitetura e construção. As categorias são baseadas nas propriedades dos Modelos Digitais e nas possíveis formas de interação entre o designer¹⁴ e quatro distintas ações-elementares, tidas pela autora como os quatro componentes do Design Digital: *representação, geração, avaliação e performance*. Pressupomos que as quatro ações em questão estão sempre presentes nos processos de projeto, mesmo que de forma basal, e acontecem de maneira intuitiva ou não controlada. As mesmas são essenciais para compreender o tipo de projeto, bem como se a natureza da interação com tais componentes-ações ocorre de forma explícita ou implícita. A interação é dita explícita se o modelo digital atua de forma determinante para o resultado e desenvolvimento da ação-chave/componente de estudo. Caso contrário a ação acontecerá de forma implícita, fora do ambiente digital, ou fora do modelo em questão, através de mídias não digitais, através de pranchetas, croquis, ou outras mídias, quer seja de forma controlada, ou intuída.

O objeto com o qual se interage também é um fator importante a se destacar aqui. Há basicamente quatro principais tipos de objetos de interação. No primeiro desses tipos, o designer/projetista interage com uma *forma livre*, relacionada a um design baseado em mídias físicas, tal qual o papel, escultura ou maquete. Por vezes tratamos essa forma de interação como tradicional. O segundo tipo de objeto é um *Constructo Digital*, o designer interage com um croqui digital, um desenho digital ou uma maquete digital. O terceiro e quarto tipos de objeto de interação são dois lados da mesma moeda. O terceiro tipo de objeto é uma *representação gerada por um mecanismo*, nele o designer interage com um produto de um Mecanismo de Design Generativo, que tem como base uma série de regras de geração de forma como regras geométricas, matemáticas ou conformativas. O quarto e último tipo de objeto

¹⁴ Consideramos neste trabalho o termo designer de forma ampla equivalente a “projetista, aquele que desenvolve um projeto, um desenho” nos diferentes campos de atuação.

é um *ambiente digital gerador de uma representação digital*, o designer interage com a parte operacional do Mecanismo de Design Generativo para alterar indiretamente o modelo final.

2.6.1 Modelos CAD (*Desenho Assistido por Computador*)

Os modelos CAD são os modelos mais frequentemente utilizados no mercado e na prática profissional, esses funcionam principalmente como suporte de representação 2D e 3D em ambiente digital. É um modelo cuja interação entre designer e *representação* se dá de forma explícita, porém a *geração*, *avaliação* e *performance* acontecem de forma implícita, fora do meio digital. Existem duas subcategorias de Modelagens CAD: o CAD descritivo, e o CAD para avaliação e geração.

O Modelo CAD Descritivo é o que mais se utiliza de abordagens próximas do conceito de informatização, citado no início do capítulo, e é também um modelo que teve pouco efeito qualitativo em mudanças de processo de projeção/design quando comparado aos processos baseados em representação física. Os modelos CAD são modelos que facilitam a editabilidade dos elementos, o gerenciamento de informações, especialmente as informações representacionais, e são mais comumente utilizados como modelagens geométricas e ou volumétricas.

Já o Modelo CAD para Avaliação e Geração são modelos que apresentam uma integração automatizada entre análise e síntese, e são modelos com função preditiva ao invés de descritiva. Geralmente estão associados a estimativas de custos, comportamentos materiais e performance ambiental. Esses modelos apresentam avanços comparados aos modelos descritivos de CAD, por incluírem processos formulados e controlados de avaliação e de geração, no entanto, o raciocínio de design e a interação entre designer e o objeto do modelo se dá de forma tradicional, em outras palavras os procedimentos de transformação e manipulação de formas e informações são inseridos manualmente. No caso de necessidade de uma mudança basal no modelo, é necessário a refeitura manual desse modelo, o que demonstra

um fluxo linear de informação e o que diferencia esse modelo dos modelos que veremos mais adiante.

2.6.2 Modelos Formativos

Os modelos formativos apresentam um novo patamar na relação entre o designer e a geração da forma. Nesse tipo de modelo de design, implicações de metodologias fixas ou até implicações formais fixas acabam sendo improdutivas ao fluxo de trabalho. O conceito de “forma” como algo previamente concebido é substituído pelo processo de “formação” que se mostra menos estagnado e apresenta maior dinamismo processual. A geração de forma é baseada na interação entre o designer e uma técnica digital que propicia o processo para alcançar essa forma. A formação é alcançada a partir de atributos ou parâmetros gerenciáveis e o conjunto dessa interação de parâmetros gera um produto formal. Os parâmetros da forma são definidos, e através de sua programação alcança-se um resultado dinâmico e de ajustes interoperantes. O designer aplica técnicas como o design scripting (leia-se, roteirização/programação de desenho) e opera diretamente com um ecossistema virtual de geração formal, ao invés de trabalhar diretamente na representação explícita do projeto, quer seja ela baseada em CAD ou em papel.

Essa categoria de modelagem apresenta três subcategorias: design topológico, design associativo e design dinâmico.

O Design Topológico é baseado na exploração de topologia, ou seja, de superfícies complexas e geometrias não-euclidianas.

O Design Associativo é baseado nos princípios de design paramétrico e componentes generativos.

O Design Dinâmico é baseado em técnicas de modelagem baseadas na temporalidade, num continuum dinâmico, especialmente na interação entre elementos quando subjugados a forças e movimentos, e quando são analisados frames (momentos) de um todo de uma certa interação de elementos ou sistema.

2.6.3 Modelos Generativos

Os Modelos Generativos de design digital são caracterizados a partir de uma estrutura complexa de mecanismos computacionais para processos de geração formalizados. A diferença entre os modelos de formação e os modelos generativos é sutil, mas se torna mais clara na diferença entre a natureza dos seus mecanismos, e ainda mais na entrega de seus resultados. Enquanto que no modelo formativo o script precisa ser desenvolvido de forma a permitir que cada parâmetro seja escolhido e lido individualmente. No modelo generativo o designer interage diretamente com um mecanismo generativo sofisticado e intrincado, com certo grau de inteligência artificial. Trata-se de um módulo interativo que provê uma série de ferramentas de controle e opções de escolha para que o designer possa orientar o universo experimental para as soluções desejadas. Tal modelo funciona a partir das qualidades do resultado final que se deseja alcançar, sendo que aqueles mecanismos encontram meios de chegar até esse resultado. A modelagem aqui é produto da interação entre esses mecanismos complexos e as escolhas orientadas pelo designer. A qualidade e planejamento da interação é prioridade nesse tipo de modelo, a fim de garantir controle do design e o universo correto de escolhas. Dois processos são essenciais para o funcionamento e a compreensão dos modelos generativos: a gramática da forma e os modelos evolucionários.

A gramática da forma é feita a partir de expressões matemáticas para mecanismos computacionais generativos através de regras de transformação de formas. Através da lógica da gramática da forma torna-se capaz de estabelecer diretrizes para o desenvolvimento de diferentes composições geométricas, através da adição, subtração, e modificação dos seus subconjuntos, ou elementos, bem como a experimentação de diferentes preenchimentos espaciais entre determinadas fronteiras estabelecidas. E os modelos evolutivos, são oriundos dos modelos matemáticos e biológicos de mesmo nome. A partir da compreensão dos algoritmos

matemáticos que geram variação, diversidade e otimização dos genes, esses mesmos conceitos e algoritmos foram aplicados à metodologia de exploração de design foram capazes de abrir um novo leque de possibilidades de design.

Tendo em vista esses dois conceitos chave, vemos que dentre os modelos generativos há duas subcategorias identificadas: o modelo de design gramatical-transformativo e o modelo de design evolutivo. O primeiro é um modelo generativo derivado a partir de uma gramática de forma, que pode ser usada não só para fins de explorações compositivas, mas também para melhores buscas de resultados em relação a adequações espaciais e topológicas. Já no modelo de design evolutivo a geração da forma acontece a partir de códigos genéticos internos ao projeto que substitui a interação direta entre o designer com a forma em si. Os algoritmos genéticos geram um padrão específico de variação, recombinação e adaptação, e os modelos evolutivos estão muito relacionados à formação de um grande leque de opções generativas a partir dessas variáveis. A partir desse leque de opções pode haver uma etapa de avaliação sobre o grau de adequação de cada um desses modelos aos atributos almejados, e seleção dos designs mais adequados. Essa metodologia de design acaba fazendo um paralelo aos processos biológicos de evolução e adaptação, daí deriva seu nome. O modelo de design evolutivo surge num ensejo de busca das melhores soluções a problemas postulados, bem como ao processo de otimização e refinamento de design baseado na avaliação desta resolução de problemas.

2.6.4 Modelos Performativos

Os modelos digitais podem ser submetidos a avaliações diretas e unilaterais, ou seja, a partir de um modelo estabelecido, submeter a testes avaliativos para um determinado fator como vemos nos modelos analíticos CAD, sem que os resultados dessa análise possam influenciar mudanças explícitas ou automáticas diretamente no processo de design. Nesse caso as mudanças de design aconteceriam apenas de

forma implícita, através do intermédio de mudanças basais de design a partir do projetista. Com os modelos performativos a lógica é diferente. Os modelos performativos são modelos cujo design é desenvolvido a partir de um feito de performance específico que se almeja atingir, em outras palavras, são aqueles em que a performance do design é um fator decisivo e explicitamente contribui para o desenvolvimento de uma determinada construção de forma ou para um processo generativo.

A partir do posto, temos dois tipos de Modelos Performativos: Modelos Formativos Baseados em Performance e Modelos Generativos Baseados em Performance. A performance do design pode ser avaliada em diversos fatores, entre eles está a performance estrutural, estabilidade, performance ambiental, performance de custo, cultural, sociológica, entre outras...

O que acontece em um modelo formativo baseado em performance, é que as simulações digitais, especialmente relacionadas a forças externas contribuem para processo de formação topológica. As análises de performance produzem expressões matemáticas paramétricas de performance atreladas a atributos de formação, os mecanismos por sua vez geram alterações no modelo em busca do resultado almejado de performance.

Já o modelo generativo baseado em performance é um modelo feito para o processo generativo que no entanto tem a análise de performance como atributo catalisador do processo generativo, que comumente também apresenta processos paralelos de formação. Dados de simulação de performance geram processos generativos, como contra-respostas generativas às forças sendo testadas, para assim então alcançar uma forma específica. O designer pode interagir com diferentes ferramentas com esse tipo de modelo, a ferramenta de performance, a ferramenta generativa e pode interagir diretamente com a forma representativa da modelagem que está sendo produto dos outros dois processos.

Esse é o modelo que mais se aproxima de um modelo real integrativo em que os quatro componentes do design digital atuam quase que interoperantes entre si, e com transparência para o processo de design.

2.6.5 Modelos Integrados Compostos

Ainda não existe, em sua plenitude, um modelo completo de integração explícita entre os quatro componentes do design aqui estudados (representação, geração, performance e avaliação). Esse modelo teórico aponta para uma era futura em que os processos podem seguir um fluxo livre de influências entre si, e que os fatores podem ser alternados e livremente escolhidos durante o processo de design. Nesse modelo teórico um processo generativo pode ser construído baseado em uma perspectiva de performance, e sua avaliação pode livremente alterar o processo generativo, bem como poder-se-ia alterar diretamente o resultado final da representação e encaminhar todas as outras atividades para um novo rumo. O fluxo de influência é livre e multidirecional, e o designer tem controle claro sobre todos esses aspectos.

2.6.6 Algumas Considerações sobre Modelos Digitais e Projetos Arquitetônicos

Quando falamos de modelos digitais, especialmente sobre as categorias aqui apresentadas não estamos dando ênfase a um ambiente digital específico ou mesmo a um *software*, isso porque os softwares podem ser utilizados com diferentes fins de design, ou de projeto, e podem apresentar inclusive a possibilidade de interoperabilidade de ferramentas auxiliares que podem movê-los para diferentes categorias de acordo com a forma que se destina essa modelagem. O que nos propomos aqui, ao utilizar a metodologia classificatória de Oxman (2012), é exatamente poder enxergar a modelagem por sua função no campo de possibilidades do processo de design e de desenvolvimento de um projeto, muito mais do que atrelá-la a um software ou meio digital específico.

Muito pode ser suscitado a respeito do lugar do BIM (*Building Information Modeling*, ou *Modelagem de Informação Construtiva*) nessa classificação. O BIM não é

um modelo teórico sobre desenvolvimento conceitual de projeto, o BIM propõe-se a ser um modelo de cultura interdisciplinar que inclui modelagens que facilitem essa cultura interdisciplinar, a troca de informações e o trabalho colaborativo. Um modelo digital BIM é um modelo que pode ser utilizado para facilitar o fluxo informativo entre disciplinas, e com informações palpáveis em termos de fabricação e produção de obras. No entanto, ao falarmos de um projeto ou mesmo uma modelagem digital que está de acordo com a filosofia BIM, que tem essas características de interoperabilidade e mediação entre disciplinas e construção, não estamos falando sobre a natureza da concepção de design. Um modelo digital que se adequa à filosofia BIM, pode ser pertencente a um projeto que foi desenvolvido a partir de um Modelo Formativo, por exemplo, baseado em Scriptings de Desenho e parâmetros bem definidos em uma abordagem não-determinista. Da mesma forma, essa modelagem também pode ter suas origens em um Modelo Generativo baseado em Performance, ou um modelo clássico padrão, desenvolvido a partir de metodologias baseadas no papel e em mídias físicas.

2.8 Fabricação Digital

Compreender os aspectos da fabricação digital nos ajuda a completar o quebra-cabeças de um ciclo que se inicia com o projeto digital, desde a idealização até a realização da obra. Os processos de manufatura e fabricação digital tornam-se necessários quando há a necessidade de grande precisão na criação de peças e itens, ou mesmo na criação de sistemas mais rápidos de corte, fabricação e produção. A fabricação digital consiste em sistemas e métodos de fabricação que se comunicam diretamente com modelos digitais, também conhecido pelo termo de CAM (Computer Aided Manufacturing) ou Manufatura Auxiliada por Computador. A fabricação geralmente é feita através de máquinas de CNC (Controle Numérico Computadorizado), ou máquinas DNC (Controle Numérico Direto). De acordo com Oxman (2012) o processo de fabricação digital é responsável por causar uma

aproximação íntima das profissões de design, especialmente da arquitetura, com as etapas finais do ciclo de um projeto, especialmente com as especificidades dos materiais usados na fabricação, no sentido de que a fabricação digital impulsiona o processo de design já orientado às especificidades do método de fabricação e das características dos materiais de produção. Dessa forma a síntese de arquitetos, engenheiros e fabricantes novamente controlam em conjunto a responsabilidade de todos os processos desde a conceitualização à materialização da ideia.

CAPÍTULO 3

Lições da Prática Profissional sobre
Tectônica Digital Voltada a Projetos em
Madeira

3.1. Introdução ao Capítulo

Discutimos nos capítulos anteriores como a *tectônica digital* é um conceito relacionado com o desenvolvimento dos projetos tomando como ponto de partida uma preocupação estrutural e material, com o respaldo de ferramentas digitais sofisticadas usadas para análise, simulação, otimização e geração de elementos do projeto.

Escolhendo como objeto de estudo de análise alguns agentes protagonistas na expansão da madeira massiva na construção civil brasileira, representando a si mesmos e as empresas de que fazem parte, buscamos compreender como essas ferramentas estão sendo utilizadas metodologicamente no desenvolvimento de projetos.

Partimos dos pressuposto de que a tectônica digital é uma realidade para esses agentes e suas empresas, e que são processos chave para o desenvolvimento de suas atividades, e que esses processos auxiliam o diálogo entre arquitetos, engenheiros e fabricantes.

Foram realizadas três entrevistas semi-estruturadas, com profissionais do campo de construção utilizando madeiras massivas. Dois dos entrevistados são engenheiros, dos quais um é engenheiro projetista-gerenciador, o outro é engenheiro projetista-construtor, o outro entrevistado, um arquiteto projetista e professor. As entrevistas foram divididas em três partes.

1. A primeira bateria de perguntas buscava entender melhor o entrevistado enquanto pessoa e profissional. Onde perguntou-se o histórico de vida dessa pessoa, sua função na empresa e como se enxerga enquanto profissional.
2. A segunda bateria de perguntas buscava compreender o fluxo de funcionamento padrão de concepção de projetos.
3. A terceira bateria de perguntas era relacionada ao uso de ferramentas digitais nesses processos e algumas perspectivas de futuro

As entrevistas foram gravadas para posterior transcrição e análise, com permissão de todos os entrevistados.

Algumas perguntas foram removidas ou alteradas entre uma entrevista e outra, por percebermos que o primeiro formato dessas perguntas não estava compreensível, e também nos casos em que havia sobreposição de respostas em diferentes perguntas. Não houve mudanças significativas entre uma entrevista e as seguintes em termos de cobertura de conteúdo ou semântica.

No trecho baseado na entrevista com o arquiteto Marcelo Aflalo buscou-se compreender melhor processos criativos, e respalda-se mais em trechos da própria fala do entrevistado para elucidar os procedimentos. Para esse trecho foi utilizado como apoio duas publicações de autoria do entrevistado: sua tese de doutorado (AFLALO, 2020) e um artigo intitulado “Residência Pio IX: Uma análise gráfica” de autoria de Marcelo Aflalo e Akemi Ino, disponível em:

<<https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/20.233/7555>>

Metodologia de Estruturação e Análise de Fluxos

A partir dos dados obtidos dessas entrevistas, foram desenvolvidos fluxogramas para análise dos fluxos de informações que ocorrem durante o projeto e um quadro descrevendo os modelos digitais utilizados em cada etapa.

Buscou-se compreender as diferentes interações entre agentes no desenvolvimento de projeto, com enfoque principal nas linhas de evolução dos projetos arquitetônico e estrutural. As linhas representam diferentes interações entre elementos informativos. Uma linha contínua representa a evolução cronológica do projeto, as linhas tracejadas representam relações de diálogo entre disciplinas (inserção ou intercâmbio de informações de diferentes projetos). As linhas pontilhadas representam uma relação de informação importante enquanto insumo de desenvolvimento de projeto. [Ver figura 3.1]

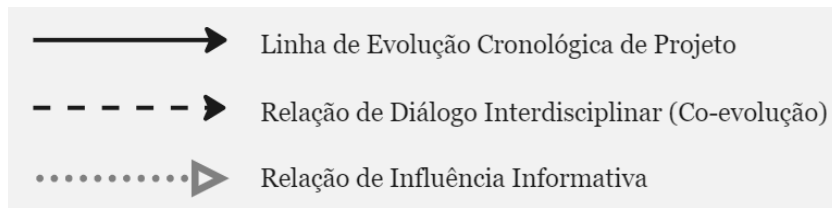


Figura 3.1: Legenda de tipologias de linhas representativas para modelo de análise de fluxos. Fonte: autor.

Tendo isso como ponto de partida, foram feitos fluxogramas que identificam os agentes, linha cronológica de desenvolvimento do projeto e as diferentes interações entre os projetos e ou insumos e interações outras que são cruciais e interferem no desenvolvimento desses projetos. [Ver figura 3.2]

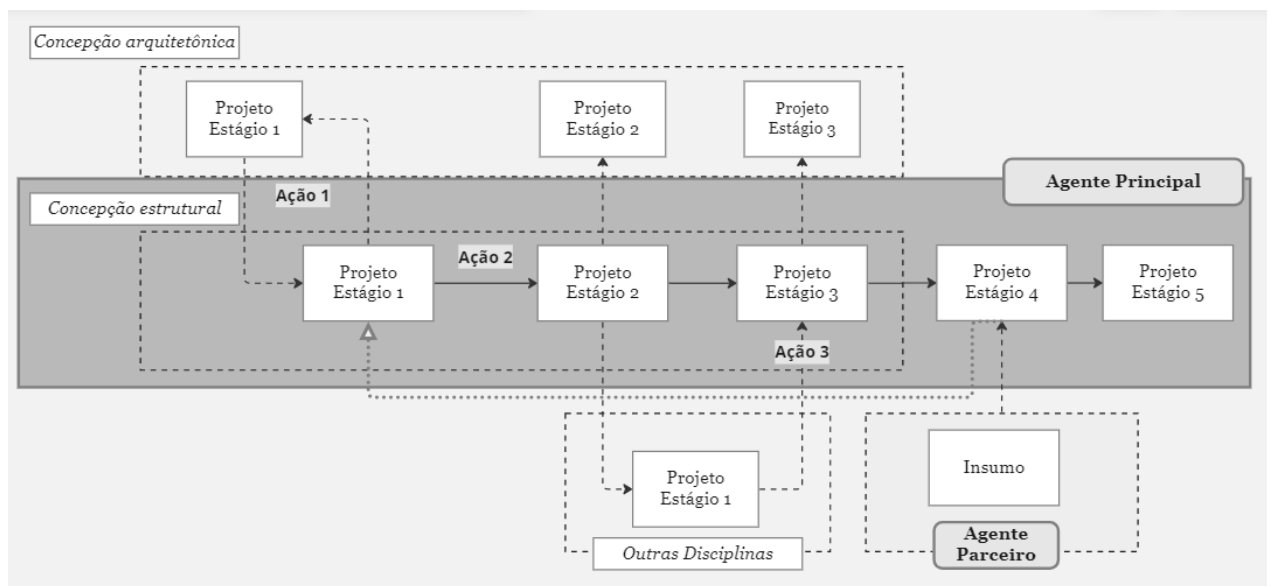


Figura 3.2: Modelo genérico de fluxo de processos. Fonte: autor.

3.2 Arquiteto Marcelo Aflalo

Sobre o Entrevistado

Marcelo Aflalo é arquiteto e professor. Fundador do Núcleo da Madeira (uma iniciativa que busca criar uma rede de profissionais e instituições em prol da divulgação, da pesquisa e experimentações relacionadas às tecnologias construtivas da madeira e que busca aproximar relações entre a academia e a prática profissional). Fundador do escritório Univers Design. Coordena a pós-graduação de Arquitetura em Madeira no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

O trabalho de Marcelo Aflalo é marcado pela grande intimidade com a materialidade da obra e pelo desenvolvimento do projeto a partir de sua resolução tectônica, com especial atenção ao detalhamento estrutural e com os aspectos de baixo impacto ambiental e reciclabilidade da construção. Aflalo também se dedica a desenvolver projetos baseados em design digital com princípios claros ancorados na materialidade dos seus projetos, e considera os aspectos de fabricação desde o princípio das suas concepções.

O arquiteto mora na residência Pio IX, projetada por ele mesmo e construída pela ITA Construtora, em 1999 (23 anos atrás). Apesar de sua forte prática atualmente com métodos digitais, a casa de 4 andares foi idealizada principalmente por métodos baseados em papel e foi construída em um terreno de declive acentuado, feita em estrutura de Madeira Lamelada Pregada, técnica raramente utilizada, escolhida por Aflalo para evitar colas e químicos agressivos na colagem das lamelas de madeira.



Figura 3.3: à esquerda, foto do interior da Casa Pio IX . Projeto: Marcelo Aflalo e Marta Aflalo. Foto Antonio Saggese. Fonte: <https://www.itaconstrutora.com.br/portfolio/residencia-pio-ix/> (acessado em 10 setembro 2022). À direita: exposição da maquete física da Casa Pio IX na escala 1:20. Foto: Marcelo Aflalo

Sobre Concepção de Projetos e Processos Tectônicos

Em seu fluxo de trabalho, o arquiteto inicia o processo por um briefing aprofundado das expectativas, necessidades e restrições dos clientes, e prioriza uma intensa etapa de pesquisa e investigação de soluções para atender as restrições que o projeto traz consigo, especialmente as especificidades do contexto da construção, prazo de conclusão de obra, expectativa orçamentária e dificuldades de locação. A partir do *brainstorming* para conseguir decidir o método construtivo, as modulações, e as formas construtivas e só posteriormente resolver a forma da estrutura como um todo e os aspectos estéticos finais da edificação.

“Você desenha em função do tempo. O design não é uma explosão de ideia, não é um furúnculo que brota “ideia!” Eu acredito no projeto como processo e como pesquisa. À medida que você vai elaborando e desenvolvendo uma pesquisa, ela vai se construindo e vai gerando uma identidade própria, e uma estética própria. [...] E o projeto final é resultante do tempo que eu tenho pra fazer. Então eu levo em consideração uma cadeia enorme de fatores: questões sustentáveis que envolvem a origem do material, legalidade, baixo consumo de

produção, baixo consumo de energia no transporte e na fabricação, reciclabilidade e análise de ciclo de vida completo de cada um desses produtos... Então tudo isso vai se somar com as outras questões de linguagem, de desenho e de tempo. Se eu tenho um tempo ‘x’ para projetar, construir e entregar, eu começo desde o zero já pensando em como é que eu vou fazer isso. Eu não vou fazer uma coisa que não dá tempo. Eu não vou ficar pondo adição de contrato pedindo mais tempo pra entregar a obra. Ela é viável nesse prazo e foi desenhada para ser entregue nesse prazo e sem alteração de custo. Logo eu me dedico muito mais tempo ao projeto do que à construção.” (AFLALO, 2022)

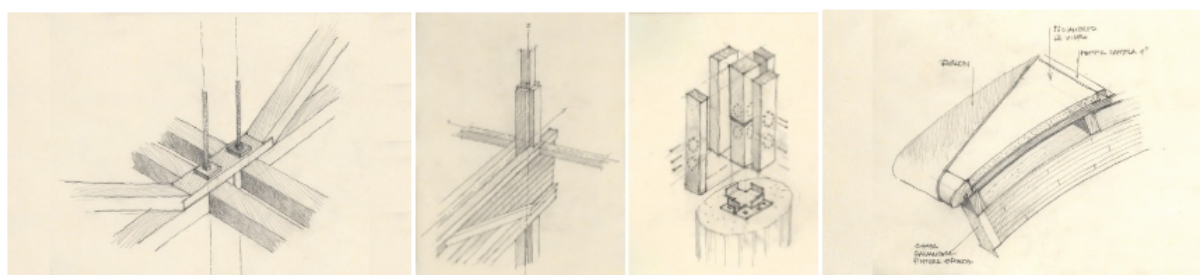


Figura 3.4: Croquis de detalhes construtivos da Casa Pio IX, feitas pelo arquiteto em 1999. Fonte: Marcelo Aflalo

Em nossa investigação ficou evidente que os processos conceptivos de Aflalo são totalmente embebidos na preocupação com a tectônica do projeto desde os primeiros momentos. Muitas vezes os estudos do detalhamento estrutural embasam ou iniciam o processo criativo, especialmente na decisão do sistema construtivo relacionado à facilidade de construção e restrições geográficas e orçamentárias. Seus estudos de conexões e encaixes de peças de madeira envolvem desenhos, modelagens digitais, fabricação digital, mock-ups e protótipos em escala reduzida. E esses estudos antecipam a concepção estrutural como um todo, numa preocupação de atender características específicas de performance da obra.

“Desde o primeiro dia eu estou em contato com algum fabricante, como o Hélio é meu vizinho aqui, a maior parte das vezes eu falo com ele. Às vezes não, às vezes eu pego livros mesmo, e vou dissecando até chegar num conceito estrutural e de fabricação etc. Isso às vezes nasce antes do primeiro rabisco. Eu já juntei o quebra-cabeças antes de começar a rabiscar. Aí eu vou pro papel, eu desenho bastante coisa no papel. Do papel eu vou pro 3D direto. Eu trabalho com o Rhino. Jogo as coisas no Rhino, faço o 3D já com todas as dificuldades que ele vai apresentar, de forma, de encaixes,

tudo. Antecipo as dificuldades de processos. Se eu já estiver trabalhando desde o começo numa obra nova, por exemplo, eu vou rabiscar essa obra junto com o Hélios e a gente já vai discutir [...] "E se eu trabalhar com dois pilares e uma viga, o que é que acontece?" Então vai essa discussão com o Hélios, que combina processo de fabricação, com transporte, com estrutura e com montagem. A gente analisa esses quatro fatores juntos. "Esse sistema de montagem é legal, essa peça não vai ser muito pesada, eu não preciso de um caminhão pesado. Eu posso subir isso em uma talha pequena, lá em cima... Quatro andares? Dá pra o carinha puxar as peças na corda, lá... A gente já desenha um suporte para pegar as vigas." Muitas vezes a gente já faz isso, já calcula onde é que vai ser o ponto para prender a corda lá pra cima. Chega nesse nível de detalhe.

Até agora eu não falei de brise, se a cadeira é *eames* ou não. A última coisa que eu vou olhar é isso, o tom da madeira etc. Porque não interessa. Aí depois que a gente vai ver com quem a gente vai trabalhar. O Hélios [Olga] só trabalha com uma madeira, então a gente já sabe qual é a textura. A madeira que ele usa hoje é a mesma que eu usei na minha casa em 96, vai fazer 30 anos. Tá inteirinha aqui, tá ótima, a cor dela é maravilhosa, e a gente já sabe como ela se comporta.

Aí depois que eu chego nesse processo de conceito definido, eu sei que ela para de pé e o dimensionamento tá mais ou menos naquela parte. Eu vou e começo a estudar conexões mais interessantes. Reduzir a quantidade de peças metálicas por uma questão de [resistência a] incêndio, e de custo. Aí eu mudo o desenho, altero o ângulo para fazer o encaixe melhorar. Muitas vezes duas peças de madeira que se encontram inclinadas apoiadas uma na outra, dependendo do corte que você faz para madeira encaixar e não escorregar, ela pode estar comprimindo no sentido da fibra e essa peça de madeira pode abrir nesse ponto, então às vezes a gente desenha isso, depois faz um pequeno chanfro nisso para evitar que a carga pontual vá toda parar num único lugar. É um pouco, se você pensar nos teus dentes... Se você pegar um pedacinho de borracha e apertar com teu canino no dente de baixo, a carga que vai acontecer naquele ponto é de algumas toneladas, embora você não saiba. Mas quando você faz uma estrutura e aquela estrutura descarrega em um único ponto. Não interessa a massa que você tem, interessa o peso. Se a viga é pesada e está apoiada num único pontinho. Caramba, você vai ter duas ou três toneladas apoiadas numa viga de madeira por um pontinho só. Cara, ela vai furar, essa viga! Vai estourar, essa viga! [...] Então você já desenha pensando nisso, mexe no ângulo, mexe no encontro da chapa. Estuda o caminho de forças que se distribuem ao longo dessa estrutura. "Como é que essa força vai chegar no piso sem criar nenhum ponto crítico desse caminho da carga?" Isso é um projeto em madeira! Um projeto em concreto você

faz um desenho, joga na mão do calculista, e o cara enche de ferro os pontos críticos, porque ele não vai ter que resolver... Ele sabe que se ele encher de ferro e der um monte de nós lá, ele sabe que aquela carga vai se dissipar ao longo da viga de concreto, e ele vai falar assim “Ah, tudo bem, vai...”. Não importa quantos caras vão ter que dobrar ferro aqui para fazer emenda. Não interessa a quantidade de trabalho, esses caras recebem mal de qualquer jeito, vão ficar dobrando ferro até morrer lá, para fazer o nó que segura aquela viga que o arquiteto decidiu que vai ter que ser assim... Na madeira não tem isso. Na madeira você tem que resolver antes.

Aí depois que você resolver todas essas questões, você vai ter que ter todas as questões de proteção da madeira contra a chuva, contra as intempéries, contra bichos, contra umidade, contra isso, contra aquilo... Aí você começa a ter a arquitetura. Começa a pensar no fechamento nos caixilhos, no vidro, na carga que você está colocando nessa estrutura. Como proteger a base da estrutura. Como eliminar os contactos com áreas molhadas. Aí você começa a desenvolver toda a pele de proteção dessa estrutura. Aí você está falando de arquitetura como o povo conhece, o jeitão.

Pra mim a arquitetura já acabou. Já passou. Já resolvi na estrutura do desenho, na simbologia do desenho, na tectônica, como ele se relaciona com o chão e com o céu. Eu já fiz a arquitetura toda. Agora vem detalhamento e proteção. E aí você pode ser criativo nesses processos. Pode fazer o tratamento de fechamento, pode filtrar a luz, amplificar a luz... Você pode proteger seu invólucro através de recursos de desenho, e aproveita e faz recursos de fabricação, quer dizer, trabalhos que sejam de baixa mão de obra intensiva. E se concentra em processos industriais de fabricação de baixa energia também.” (AFLALO, 2022)

Sobre Processos Digitais Direcionados à Tectônica

Em 2019, quase 23 anos após a concepção do Projeto Pio IX, movido pela observação prática cotidiana de alguns comportamentos estruturais da sua própria casa, Aflalo revisitou a estrutura do projeto, submetendo-a a análises de elemento finito para investigar os pontos de fraqueza da estrutura que poderiam estar gerando algumas deformações indesejadas. Utilizando uma modelagem paramétrica feita a partir de Scripting de Desenho e a submetendo a testes de comportamento de carga,

o arquiteto estudou as deformações apresentadas pelos testes do modelo digital e conseguiu identificar pequenas soluções de ajustes da estrutura. [Ver figuras 3.5 e 3.6]

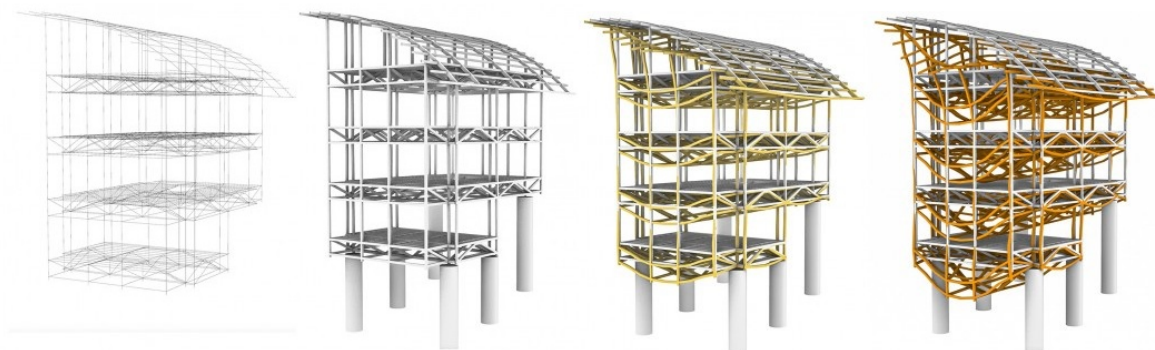


Figura 3.5: Série de modelagens feitas para estudo de comportamento estrutural, construídas no software Rhino, com plugins grasshopper e karamba. Da esquerda para a direita: (a) modelo linear para análise de elementos finitos, (b) modelo volumétrico sem simulação de carga, (c) modelo de simulação de comportamento da estrutura quando aplicadas cargas verticais 50x mais intensas que a carga de uso prevista (valor de referência). Em branco estrutura estática, em amarelo estrutura sob deformação, (d) o mesmo modelo quando aplicadas cargas verticais 100 vezes mais intensas que o valor de referência. Em em laranja estrutura sob deformação. Modelo e imagens geradas por João Pini para Marcelo Aflalo, e cedidas por Marcelo Aflalo.

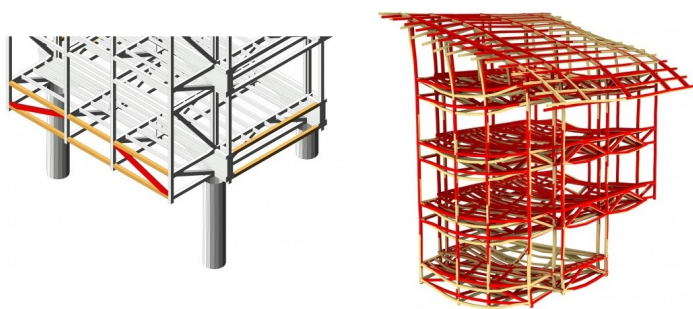


Figura 3.6: À esquerda: proposta de modificação estrutural, com travamento do módulo de vigas do pavimento inferior. À direita, modelo analítico mostrando modificação do comportamento estrutural após modificação da estrutura, quando aplicado uma carga teórica de 50 vezes o valor de referência. Modelo e imagens geradas por João Pini para Marcelo Aflalo, e cedidas por Marcelo Aflalo.

Quando você faz uma análise estrutural, os pontos críticos vão aparecer lá em vermelho. E você vai saber o nível de risco de certas situações, e você vai entender porque é que está acontecendo aquilo, e vai fazer as modificações pra isso. Com isso eu consigo fazer projetos mais arriscados do que ficar em um território seguro em

que fique tudo verdinho ali no 3D. O que eu quero é que tenham uns amarelos e vermelhos lá pra saber “opa, passou da conta! Vou engrossar aqui e diminuir lá. E eu percebo que tem certas situações que nunca vão mudar, e outras que são críticas, aí eu presto atenção e no meu próximo projeto eu já tenho um aprendizado. (AFLALO, 2022)

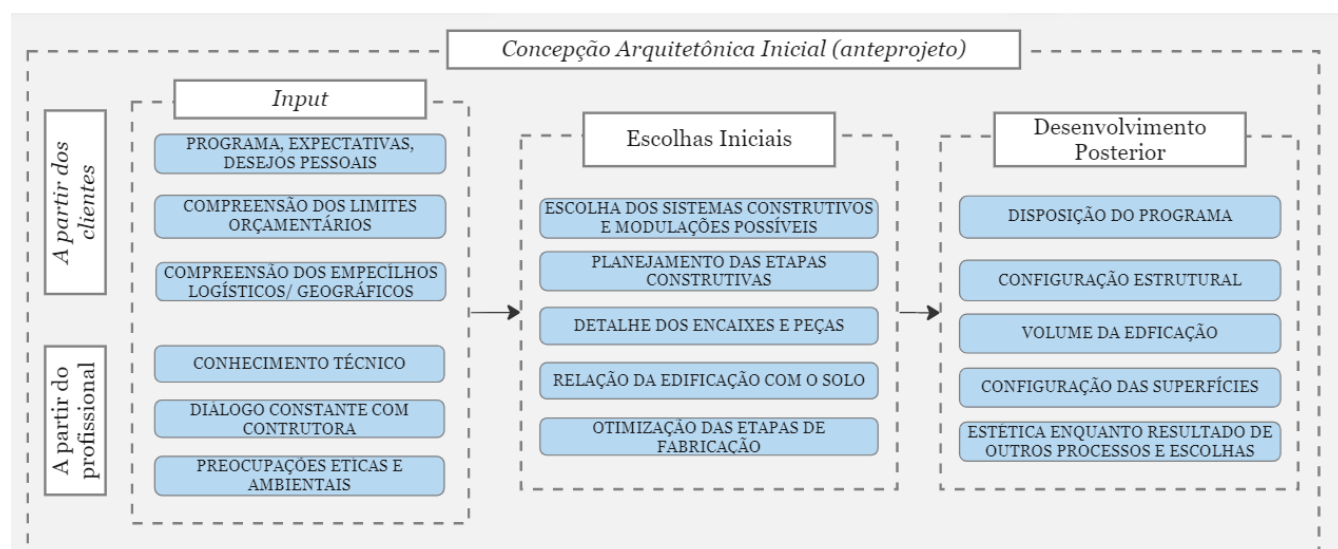


Figura 3.7: Quadro resumo das etapas e dos aspectos-chave no processo criativo de desenvolvimento de projeto de Marcelo Aflalo. Fonte: autor.

Pensando nas etapas de fabricação digital o arquiteto destaca a emergência de profissionais específicos voltados para a programação e planejamento da fabricação (processo relacionado ao G-Code):

“Um arquiteto que não tem controle do processo, ou não tá interessado no controle do processo, ele nem sabe que esse profissional existe. Um arquiteto que participa do processo e quer bons resultados, e quer reduzir as etapas de fabricação, ele vai controlar isso também, e falar assim “cara, por que que você vai fazer essa movimentação 3 vezes na máquina e gastar mais energia? Quando, se a gente não fizer esse chanfro aqui e entrar de tal jeito, você consegue eliminar duas operações. Isso vai reduzir a fabricação da viga em 20 minutos, se temos 10 vigas isso já dá 3 horas e 20 min. Aí cê fala “pra que que eu vou pensar nisso?!” Existem softwares que fazem esse cálculo de operação. Eu uso, por exemplo, o fusion 360 pra fazer a rotina, e ele tem um módulo que te permite otimizar

processos, reduzir o número de cortes, chanfros e operações em geral. (AFLALO, 2022)

3.3 Timbau Estruturas

Sobre o Entrevistado

Alan Dias é engenheiro projetista e gerenciador, com 12 anos de experiência em construção em madeira. Alan é sócio fundador da Timbau Estruturas, que é uma gerenciadora de obras em madeira que surge como empresa irmã, ou subdivisão da Carpinteria Estruturas, da qual também é sócio e que existe desde 2010. Criada pelos mesmos sócios da Carpinteria Estruturas, a Timbau Estruturas foi criada em 2022, e é voltada para o nicho de obras em madeira de grande escala. Apesar de recém criada, seus sócios carregam junto com o Alan a experiência de 12 anos em trabalhos com estruturas de madeira, de pequeno a grande porte, e a experiência de mais de 200 mil metros quadrados de estruturas montadas no Brasil. Por essa razão, em alguns aspectos, o fluxo de trabalho da Timbau e da Carpinteria podem apresentar similaridades, mas o enfoque aqui será na Timbau Estruturas, que é a empresa que o entrevistado optou por aprofundar.

Timbau Estruturas em Madeira

A empresa, criada em 2022, se identifica como gerenciadora de obras em madeira por se propor a administrar toda a construção até sua entrega. Em seus processos estão inclusos estudo de viabilidade financeira; adaptação de projetos estruturais ao sistema construtivo de expertise da empresa; análise e compatibilização estrutural com outras disciplinas, como hidráulica e elétrica; detalhamentos de fabricação das peças construtivas (*shop drawings*); construção e montagem da obra. Algumas etapas do ciclo de obra são terceirizadas, especialmente a fabricação das peças construtivas e os projetos estruturais executivos, porém há uma intensa intermediação entre a empresa e os prestadores de serviços.

Fluxo Padrão de Informações

O início do processo se dá com o input de um projeto externo, especialmente provenientes de um escritório de arquitetura, uma empresa, uma incorporadora, gerenciadora ou construtora. Raramente o contato inicial é realizado pelos clientes finais do projeto, mas sim por esses outros grupos de profissionais da construção civil que já estão com um projeto em andamento e intermediam o contato com a Timbau. A partir desse input de um projeto inicial e externo, é feito um estudo de viabilidade, que é baseado em uma modelagem em software RFEM levantada pela Timbau que tem duas funções principais: a primeira sendo a de estimar a escala da obra em relação ao volume de material, custos totais e tempo de execução; a segunda, a função de avaliar a performance da estrutura proposta para averiguar pontos críticos de mudança necessária no projeto, especialmente relacionadas a mudanças de sessões e ou reforço estrutural.

O estudo de viabilidade então serve como uma primeira etapa de avaliação de performance estrutural e orçamentária do projeto, e pode desencadear um processo de revisão da concepção estrutural ou mudanças na concepção arquitetônica. Caso a concepção estrutural, da forma que chegou, esteja resultando um volume grande de madeira e possa ser realizada de outra forma, os profissionais da Timbau comunicam-se com os projetistas e é discutida a possibilidade de uma mudança da estratégia/lógica estrutural. Em alguns outros casos, a concepção inicial prossegue sem grandes mudanças, apenas ajustes oriundos da avaliação de performance e ou da análise clínica e implícita dos profissionais da Timbau. Dessa forma, o estudo de viabilidade é o principal momento de flexão da concepção arquitetônica/estrutural, no fluxo da manifestação tectônica da obra. Diante disso, caso não seja atingida uma concordância completa entre arquitetura, estrutura e viabilidade financeira, a decisão de construção em madeira pode ser declinada e/ou redirecionada para outra empresa ou sistema construtivo.

Ao atingir concordância plena entre arquitetura, estrutura e viabilidade financeira o projeto entra em uma nova etapa de refinamento pautada em uma modelagem de compatibilização, baseada em um modelo BIM, essa modelagem superpõe os projetos arquitetônico, estrutural e de outras disciplinas, como hidráulica e elétrica para previsão de colisões e pontos críticos para análise detalhada. Após o trabalho de compatibilização existe um momento de conclusão definitiva da forma estrutural e construtiva com todos os agentes envolvidos e o projeto entra em uma nova fase de detalhamento para fabricação de peças construtivas, também conhecidos por *shop drawings*. Desse procedimento são extraídos os desenhos e orientações mais detalhadas de todo o ciclo do projeto, da concepção à construção. Esses desenhos são então encaminhados para as fábricas terceirizadas. As peças fabricadas são transportadas para o sítio de construção e as equipes de construtores e montadoras entram em ação até a finalização do ciclo de construção e entrega da obra. Em média, os processos demoram 6 meses entre uma obra e outra. Estima-se que 2/6 da duração do processo sejam destinados aos projetos, 3/6 do processo voltado à fabricação das peças construtivas, e 1/6 voltado para a montagem da obra.

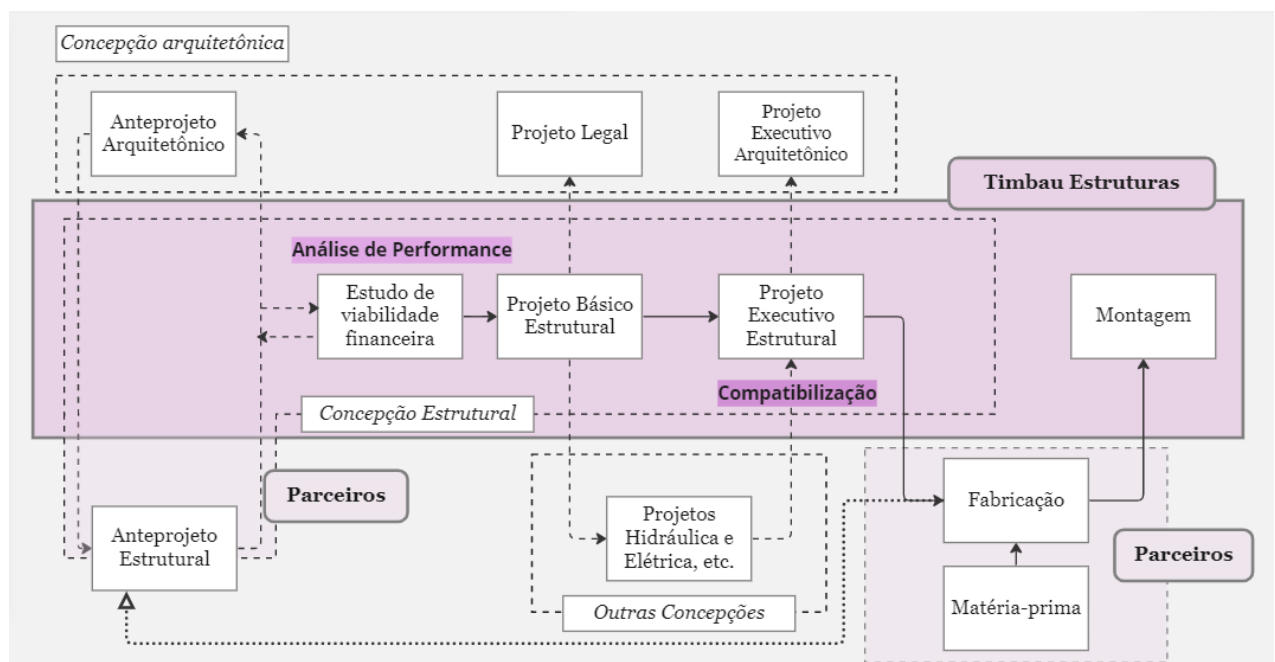


Figura 3.8: Modelo de fluxo de processos, Timbau Estruturas. Fonte: autor.

Modelos Digitais utilizados e Processos Tectônicos

A partir das entrevistas foram reconhecidos três tipos de modelagem principais dentro do fluxo padrão de trabalho. A primeira sendo uma modelagem feita para o estudo de viabilidade de projeto, construída no software RFEM, para estudo volumétrico e análise de performance estrutural. A segunda sendo uma modelagem feita em Revit, para estudo de compatibilização entre disciplinas, para identificação de colisão e refino estrutural. A terceira é uma modelagem feita no software Revit ou Cadworks para desenvolvimento dos desenhos de fabricação. A primeira modelagem é categorizada como sendo um *Modelo CAD Avaliativo*. As duas seguintes são categorizadas como *Modelos CAD Descritivos*.

O fluxo de trabalho padrão é em geral atribuído a *estruturas isostáticas*, que são estruturas formadas a partir de geometrias euclidianas e que apresentam maior previsibilidade comportamental. Quando o projeto está relacionado a *estruturas de formas livres*, relacionadas a geometrias não euclidianas tornam-se necessários processos mais experimentais. Nesse caso há uma mudança no fluxo de trabalho, a primeira modelagem é feita a partir de uma associação entre os softwares Rhinoceros e os plugins Grasshopper e Karamba. Essa modelagem é categorizada como *Modelo Formativo baseado em Performance* onde cada peça estrutural, mesmo tendo um formato já previamente estabelecido pelo projeto arquitetônico, tem seus parâmetros registrados para que a forma seja gerada a partir de um script de desenho, e associados a processos formativos. A forma é então testada em múltiplos cenários baseados em pequenas alterações de sessões, para que se encontre opções de ótimo estrutural e economia de materiais. Esse processo é mais lento por requerer uma modelagem paramétrica mais complexa e por exigir mais tempo de processamento de dados na busca dos cenários possíveis. Esse tipo de modelagem também requer maior expertise do profissional que a desenvolve.

ETAPA	Estudo de Viabilidade	Projeto Básico	Executivo (Desenhos de Fabricação)
MODELO DIGITAL	Modelo CAD Avaliativo	Modelo CAD Descritivo	Modelo CAD Descritivo
SOFTWARES UTILIZADOS	RFEM	Revit	Revit/ Cadwork
FUNÇÃO	-Estimativa Orçamentária -Avaliação Estrutural	- Detecção de Colisões - Refinamento Estrutural	-Detalhamento de peças e conexões

Figura 3.9. Resumo das tipologias de modelos digitais, usados pela Timbau Estruturas, para estruturas isostáticas. Fonte: autor.

ETAPA	Estudo de Viabilidade	Projeto Básico	Executivo (Desenhos de Fabricação)
MODELO DIGITAL	Modelo Formativo baseado em Performance	Modelo CAD Descritivo	Modelo CAD Descritivo
SOFTWARES UTILIZADOS	Rhino + Grasshoper + Karamba	Revit	Revit/ Cadwork
FUNÇÃO	-Avaliação Estrutural -Otimização	- Detecção de Colisões - Refinamento Estrutural	-Detalhamento de peças e conexões

Figura 3.10. Resumo das tipologias de modelos digitais, usados pela Timbau Estruturas para estruturas livres. Fonte: autor.

3.4 ITA Construtora

Sobre o Entrevistado

Hélio Olga Jr. é engenheiro civil, especialista em madeira, fundou junto ao pai, Hélio Olga, a ITA Construtora em 1980, 42 anos atrás. Hélio é altamente atuante na empresa, fazendo diversos papéis, tanto no desenvolvimento inicial de projetos na empresa, como em funções administrativas e de relações comerciais. Hélio também exerce um papel ativo enquanto propagador de informações a respeito de projetos em madeira em defesa do uso do material e da expansão do setor no Brasil.

ITA Construtora

A ITA Construtora é uma empresa com 42 anos de existência, fundada em 1980 por Hélio Olga, e Hélio Olga Jr. Pai e Filho. A empresa, localizada em São Paulo, é especializada em construção em madeira e já executou mais de 1500 obras, e mais de 400 mil m² de área construída, segundo materiais oficiais da empresa. Os sete primeiros anos da ITA eram voltados para projetos que utilizavam madeira serrada nativa para construção. Após o ano de 1987 a empresa passou por um forte processo de industrialização e mudanças filosóficas e passou a utilizar madeiras exóticas de silviculturas. Hoje em dia a matéria prima principal é a madeira lamelada colada feita de eucalipto cultivado.

A ITA Construtora é especializada em construções em madeira a partir de processos semi-industriais, onde parte dos processos são automatizados com processos CAM, com o auxílio de máquinas CNC, e parte produzida manualmente pelos carpinteiros da empresa. A ITA tem um modelo mais verticalizado, sendo responsável por vários processos unificados, tanto por desenvolver os projetos, fabricar as peças construtivas, e também pela montagem, construção e produção de obras. A ITA Construtora não é responsável pela silvicultura, pela serralharia e pelo desenvolvimento de projetos complementares. O fornecimento de matéria prima, a

serragem primária da madeira e peças metálicas conectoras são realizadas por empresas parceiras, enquanto os projetos são totalmente voltados para os pormenores do sistema de fabricação da companhia. A ITA também é conhecida pelo seu trabalho educacional, contribuindo com a divulgação dos conhecimentos em madeira, participação em eventos e cursos.

Fluxo Padrão de Informações

O fluxo padrão de funcionamento da ITA se inicia respaldando-se em um projeto arquitetônico para feitura de um estudo preliminar que irá fundamentar a proposta comercial para contratação. O estudo preliminar inclui uma proposta inicial de estrutura e estimativas dos custos da obra. A contratação dos serviços pode ser apenas do projeto estrutural básico, ou do projeto estrutural e construção. O primeiro caso se dá principalmente quando os clientes precisam de mais tempo para planejamento da obra, junto aos projetos complementares e orçamentos paralelos, ou se a obra em si virá demorar a acontecer. O mais comum é a contratação do projeto junto à obra. Segundo Hélio Olga Jr, o projeto estrutural não serve para ser construído por outras empresas, por ser desenvolvido de forma totalmente voltada para os comandos do maquinário interno da empresa, seus moldes de fabricação e usinagem. Com os comandos específicos para o maquinário utilizado na fábrica.

Quando a contratação é efetivada, é iniciado um diálogo entre disciplinas de arquitetura e engenharia para adaptar o projeto para refinamentos necessários e exigidos para uma construção em madeira, e para os padrões construtivos da ITA. Visto que em alguns casos, os projetos arquitetônicos que chegam para a ITA não são pensados desde sua concepção para a materialidade da madeira, essas adaptações em geral são feitas para garantir uso correto do material, como proteção às intempéries, afastamento do solo, mudanças nas modulações estruturais, aumento ou criação de beirais, entre outras estratégias; porém, também podem ser adaptações para melhor ajustar o projeto às limitações de usinagem da empresa, ou

de logística do projeto. A partir desse diálogo o projeto é refinado em várias versões até que haja concordância entre a múltiplas partes, arquitetos, clientes e construtora.

Uma vez que o projeto chegou em um ponto estável de concordâncias, ele é posto em uma etapa de avaliação de performance, Vários aspectos são aferidos: comportamento de deformações, estabilidade do todo estrutural, eficiência de contraventamento, robustez estrutural e de conexões. Junto a isso são feitos testes de otimização das dimensões dos elementos estruturais e otimização de conexões, essa etapa redefine as dimensões dos elementos estruturais, o número e posição ideal de pinos, e tamanho das juntas de conexão. Essa otimização é feita principalmente para a redução material e de custos. A partir desses estudos, estabelecem-se as dimensões definitivas dos elementos construtivos. Com essas informações a empresa já consegue entregar um produto, que é um Projeto Básico com informações essenciais para o desenvolvimento de projetos complementares e para refinamento do projeto executivo arquitetônico, nesse projeto estão incluídas plantas, cortes, elevações e cargas totais nas fundações. A estrutura aqui já encontra-se em um formato muito próximo ao definitivo.

Após o recebimento dos projetos complementares existe um último processo de compatibilização e ajustes finos do projeto, que segue para a etapa executiva. O Projeto Executivo aqui apresenta informações exaustivas sobre cada peça estrutural para fabricação. Com esses desenhos e informações começa o processo de usinagem e fabricação das peças em madeira dentro da fábrica da ITA. Os elementos de conexão metálicos são fabricados por parceiros. As peças são transportadas para o sítio de construção e a obra é produzida até sua entrega.

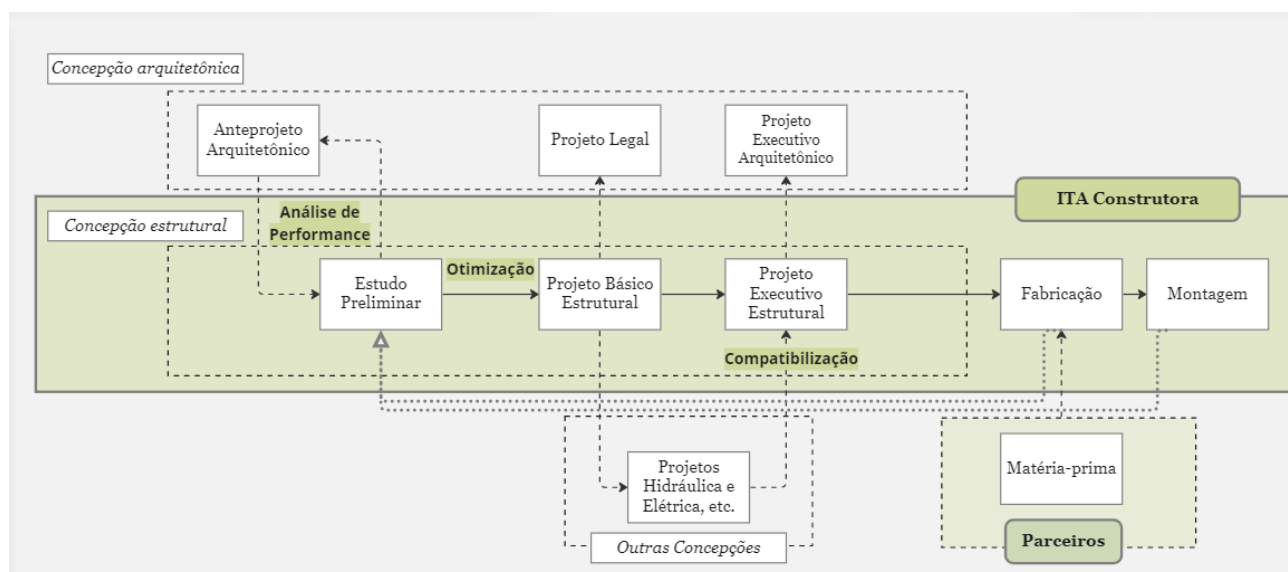


Figura 3.11. Modelo de fluxo de processos, ITA Construtora. Fonte: autor.

Modelos Digitais utilizados e Processos Tectônicos

Foram identificadas três principais tipologias de modelos digitais utilizados pelos processos da ITA Construtora. O Modelo CAD Descritivo, presente na fase de estudo preliminar, de projeto básico e também para os projetos de fabricação. Esses modelos são modelos volumétricos, voltados para previsões orçamentárias, e para a compreensão e desenvolvimento da concepção estrutural e construtiva da obra de forma geral.

A ITA possui uma série de processos de avaliação de performance, voltados à estrutura, e para esse fim foram identificados dois tipos de modelos, um modelo cad avaliativo, especialmente modelagens feitas no software RFEM e no Rhinoceros que são as voltadas para análises de comportamento e performance estrutural pós deformações iniciais, análise de estabilidade estrutural e análise de eficácia ao contraventamento, entre outras.

Posterior ou concomitantemente a esses procedimentos o projeto passa por uma fase de otimização estrutural, que é feita utilizando um Modelo Performativo, mais especificamente um Modelo Formativo Baseado em Performance. O software

utilizado é o Rhino associado aos plugins Grasshopper, Karamba e Beaver. A modelagem é construída a partir de Scripting de Desenho e submetida a um processo de otimização estrutural explicitamente atrelado a uma análise de performance. São simulados diversos cenários com pequenas variações das dimensões das peças levando em consideração o todo estrutural. A partir disso são obtidos cenários comparativos em que se busca um ótimo desempenho com maior esbeltez das peças, a partir da redução dimensional e economia material.

ETAPA	Estudo Preliminar 1	Estudo Preliminar 2	Projeto Básico	Projeto Executivo
MODELO DIGITAL	Modelo CAD Descritivo	Modelos CAD Avaliativos e Modelos Performativo	Modelo CAD Descritivo	Modelo CAD Descritivo
SOFTWARES UTILIZADOS	Autocad/ Cadwork	RFEM + Rhino (Grasshopper, Beaver, Karamba)	Cadwork	Cadwork
FUNÇÃO	Estimativa Orçamentária	Análise e Otimização	Encaminhamento para complementares	Detalhamento de peças e conexões

Figura 3.12. Tabela de Resumo de Modelos Digitais, ITA Construtora. Fonte: autor.

Estudo de Caso: Projeto de Pavilhão Estábulo+Picadeiro, Jacobsen Arquitetura + ITA Construtora

Um fluxo padrão e pré-estabelecido no mercado é que a concepção arquitetônica antecede a estrutural, em menor número de casos ambas nascem juntas de forma preliminar nos processos da disciplina arquitetônica e posteriormente a estrutura é refinada pelos processos da disciplina de engenharia

estrutural. Em alguns casos, devido a uma natureza peculiar de programa de necessidades de projeto, o fluxo se inverte ou mesmo o processo exige ainda mais proximidade entre as disciplinas desde o princípio da concepção de projeto. O estudo de caso aqui escolhido é um exemplo em que a concepção estrutural teve um papel primordial e inicial no desenvolvimento do design, visto que a premissa inicial do projeto traz a necessidade de vencer um pavilhão com vão desafiador de 40 m, dentro do qual seria desenvolvido o programa arquitetônico.

Para atender essa demanda a ITA testou uma série de concepções estruturais, em meio ao processo de diálogo entre disciplina, em processos mistos que eram respaldados em concepções baseadas em papel, modelos CAD descritivos, CAD Avaliativos e Modelos Formativos Baseados em Performance usados para otimização das peças estruturais. Cada concepção feita detém estéticas específicas e também diferentes níveis de dificuldade construtiva e volume de consumo de madeira, que também corresponde a um gasto maior com a produção da obra. As opções em questão poderiam consumir entre 165 m³ a 320 m³ de madeira. Após esse diálogo inicial o escritório de arquitetura escolheu a concepção estrutural definitiva levando em consideração esses três principais aspectos. Foi escolhida uma das estratégias mais econômicas, tendo 175 m³, dez metros cúbicos de madeira a mais que a opção mais econômica, porém foi a opção que conseguiu melhor atender aos anseios estéticos e também à facilidade de construção.

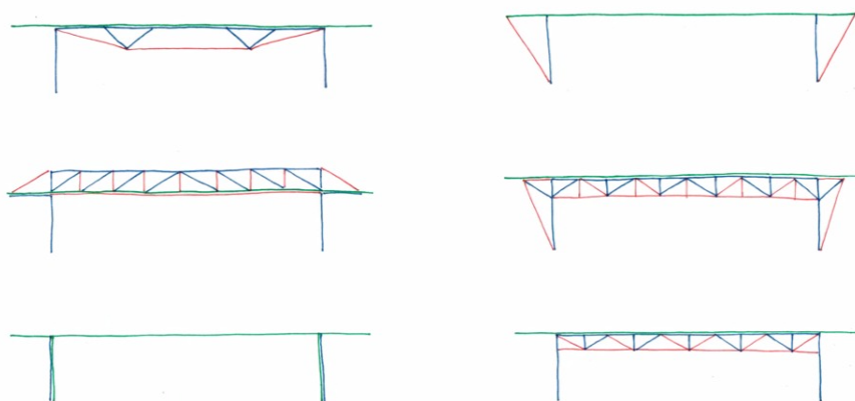


Figura 3.13. Conjunto de croquis esquemáticos das 6 concepções estruturais feitas pela ITA para desenvolvimento do projeto do pavilhão. As cores representam os principais esforços sofridos por cada peça dos componentes. Azul para compressão, vermelho para tração, verde para flexão. Fonte: João Pini, ITA Construtora.

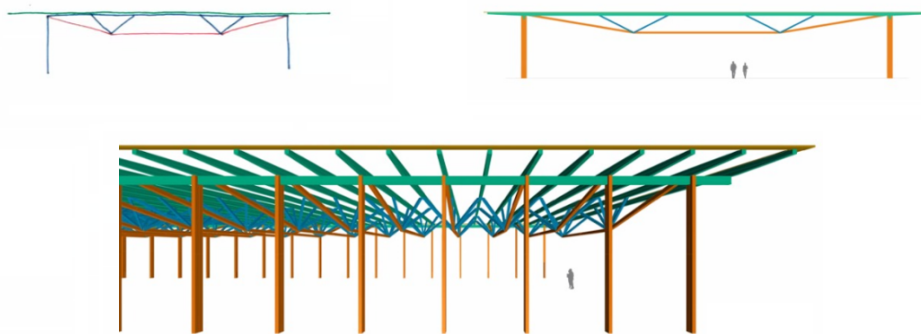


Figura 3.14. Primeira concepção estrutural. A ideia é um sistema de treliças tridimensionais baseado nos princípios de uma viga vagonada, apoiado em pilares de madeira. Essa concepção resultava em uma utilização total de 185 m³ de madeira. Croqui esquemático com a ideia inicial (superior esquerdo), Modelagem CAD descritiva da estrutura, elevação (superior direito) e perspectiva (inferior). Fonte: João Pini, ITA Construtora

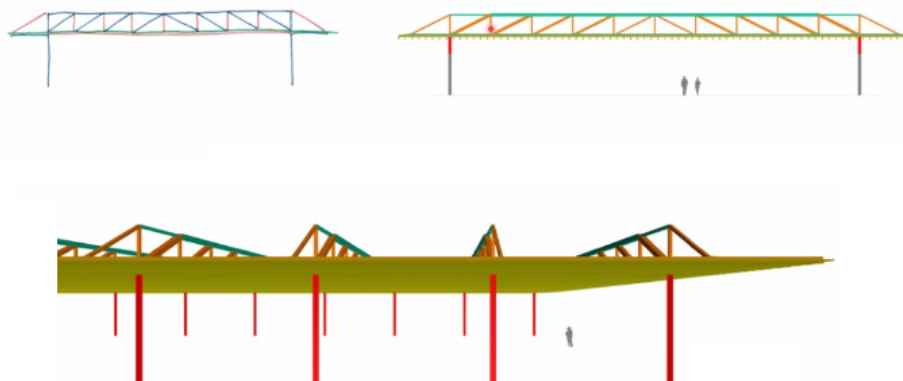


Figura 3.15. Segunda concepção estrutural. Os princípios norteadores foram o de vigas treliçadas invertidas com caibros suspensos. Essa concepção resultou em uma utilização total de 190 m³ de madeira. Croqui esquemático com a ideia inicial (superior esquerdo), Modelagem CAD descritiva da estrutura, elevação (superior direito) e perspectiva (inferior). Fonte: João Pini, ITA Construtora

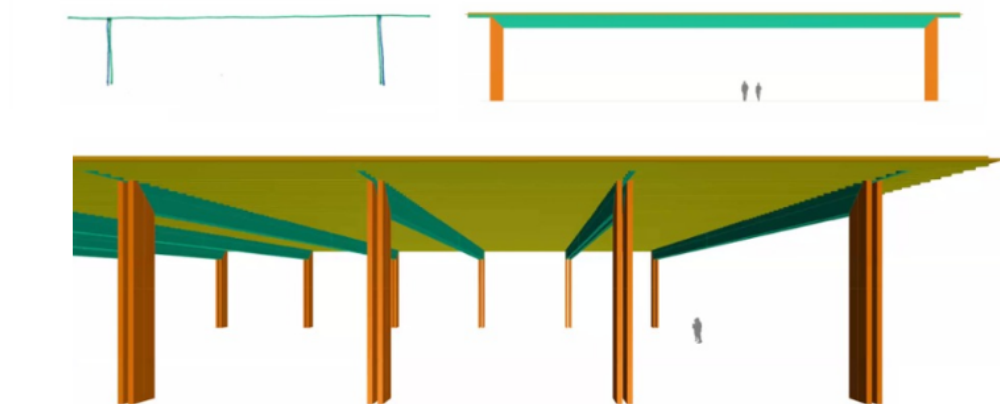


Figura 3.16. Terceira concepção estrutural. Os princípios norteadores foram o de pórticos com pilares duplos para amarração rígida. Essa concepção resultou em uma utilização total de 320 m³ de madeira. Croqui esquemático com a ideia inicial (superior esquerdo), Modelagem CAD descritiva da estrutura, elevação (superior direito) e perspectiva (inferior). Fonte: João Pini, ITA Construtora

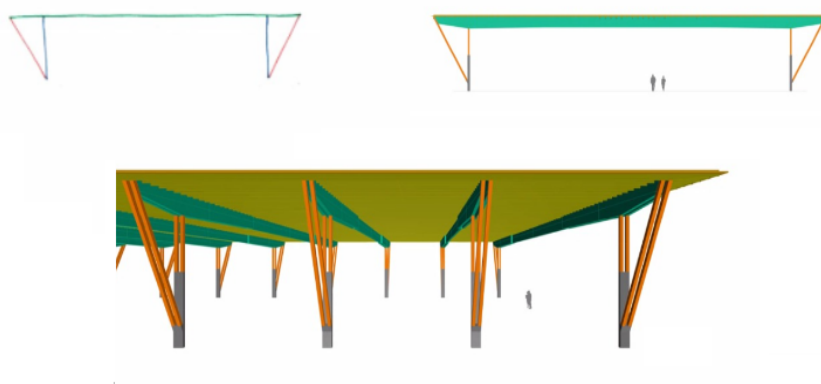


Figura 3.17. Quarta concepção estrutural. Os princípios norteadores foram o de grandes vigas tricompostas, apoiadas em quatro pontos, e fixação rígida na base de cimento. Essa concepção resultou em uma utilização total de 250 m³ de madeira. Croqui esquemático com a ideia inicial (superior esquerdo), Modelagem CAD descritiva da estrutura, elevação (superior direito) e perspectiva (inferior). Fonte: João Pini, ITA Construtora

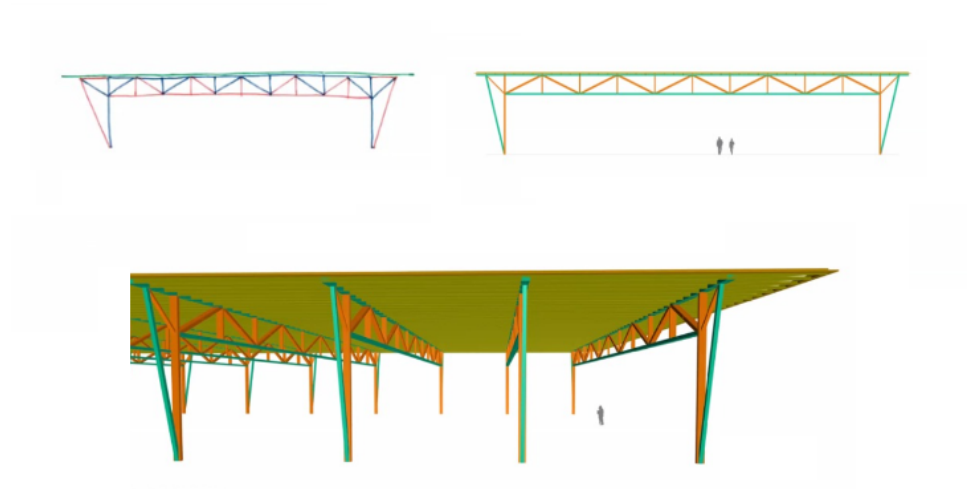


Figura 3.18. Quinta concepção estrutural. A ideia principal foi a de usar grandes pórticos treliçados. Essa concepção resultou em uma utilização total de 165 m^3 de madeira. Croqui esquemático com a ideia inicial (superior esquerdo), Modelagem CAD descritiva da estrutura, elevação (superior direito) e perspectiva (inferior). Fonte: João Pini, ITA Construtora

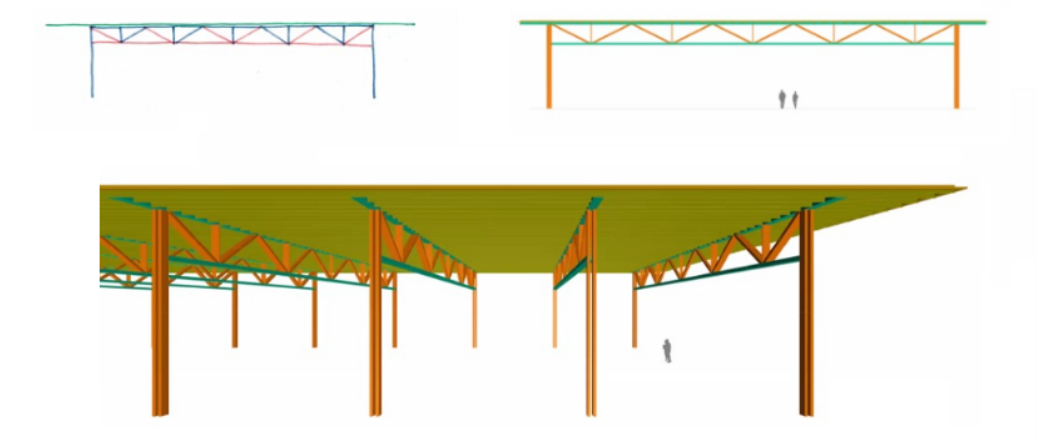


Figura 3.19. Sexta concepção estrutural e que foi escolhida para o projeto. A ideia principal foi a de usar grandes vigas treliçadas apoiadas em pilares duplos de articulação rígida. Essa concepção resultou em uma utilização total de 175 m^3 de madeira. Croqui esquemático com a ideia inicial (superior esquerdo), Modelagem CAD descritiva da estrutura, elevação (superior direito) e perspectiva (inferior). Fonte: João Pini, ITA Construtora

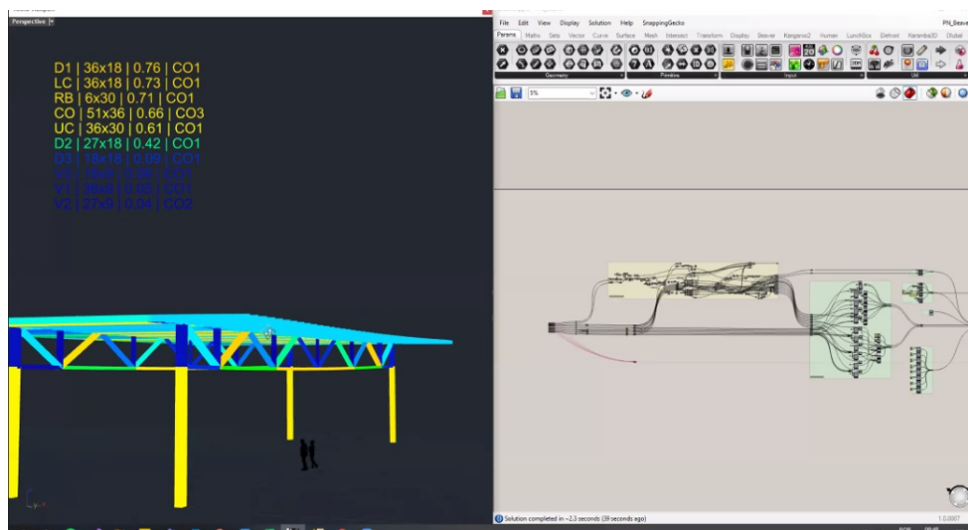


Figura 3.20. Processo de otimização baseado em análise de performance. Modelagem paramétrica e scripting de design feitos no software Rhino com auxílio dos plugins grasshopper, karamba e beaver. Fonte: João Pini, ITA Construtora.

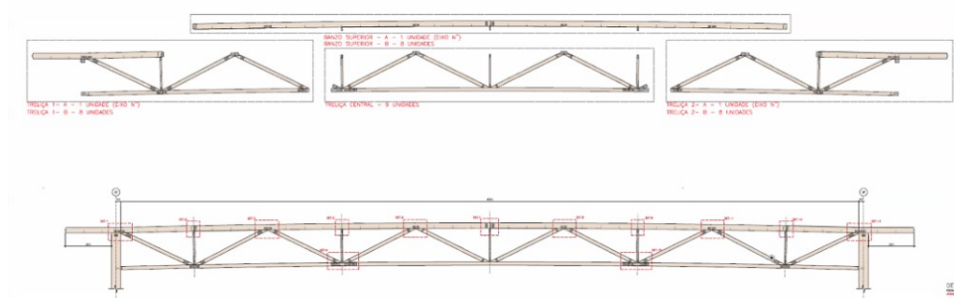


Figura 3.21. Desenho de Fabricação de viga treliçada com detalhamento de conexões. Fonte: João Pini, ITA Construtora.



Figura 3.22. Montagem da viga treliçada ainda em fábrica. Fonte: João Pini, ITA Construtora.



Figura 3.23. Canteiro de obras e finalização da montagem da viga treliçada in situ. Fonte: João Pini, ITA Construtora.

3.5 Conclusões do capítulo

Sobre Processos Tectônicos do Projeto em Madeira

Segundo os relatos da Timbau e da ITA, ainda é muito frequente que projetos cheguem sem materialidade definida, ou voltados para outras materialidades, o que demonstra um conflito de consistência tectônica dos projetos. Isso nos leva a refletir se, em casos como esse, em que a materialidade do projeto não é fator essencial e imutável do projeto, se de fato estamos nos debruçando sobre projetos tectônicos. Na verdade, não seriam eles projetos atectônicos que encontrarão um árduo caminho de definição de sua natureza material, com tradução e adequação para uma materialidade escolhida como definitiva? Em casos de estruturas isostáticas, essa tradução pode se mostrar mais favorável ou possível de ser feita, mas pensando em formas livres pode ser catastrófico, e o projeto pode ser totalmente descartado precisando abrir caminhos que façam sentido para a lógica da construção com madeira.

Para obras em madeira, os processos tectônicos têm que ser exaustivamente compartilhados entre arquitetos, engenheiros e fabricantes desde os momentos de concepção, para que haja um bom fluxo produtivo e bom funcionamento das etapas de fabricação e produção de obra. De outra forma, muito tempo é gasto com as adequações do projeto para a materialidade final, ou a construção simplesmente não se possibilita. Então, o papel das construtoras e gerenciadoras é crucial para intermediar esses processos tectônicos, e aproximar as concepções arquitetônicas às realidades de fabricação das tecnologias industrializadas da madeira. Isso se dá devido à expertise e prática que aquelas têm, tanto sobre o método construtivo quanto sobre as limitações e potencialidades dos meios de fabricação. Nesse cenário os modelos digitais têm um papel educacional e facilitador no diálogo e desenvolvimento dos projetos.

É comum ver o papel dos agentes dessas construtoras muito envolvidos com processos educacionais devido a um interesse de difundir as lógicas de

funcionamento da madeira, e os requisitos elementares de se projetar com esse material. Esse esforço é tido com o objetivo de incentivar a cultura do projeto em madeira, de estreitar laços com escritórios e grupos de profissionais, incentivando o aumento dessa cultura, é um movimento que busca que, no futuro, a construtora possa eventualmente se beneficiar com projetos advindos já desde o princípio em consonância com as lógicas próprias da madeira. Isso já acontece com profissionais que estreitaram suas relações com as construtoras há muitos anos.

O fluxo padrão que atende a maioria das demandas mercadológicas de projeto tende a ser um processo linear, em que a concepção de projeto inicia-se com a disciplina de arquitetura, e posteriormente é enriquecida pelas contribuições da engenharia estrutural e pelos conhecimentos sobre a fabricação. No entanto, alguns projetos naturalmente abrem fluxos de exceção, em que a concepção estrutural é o fator estruturador do restante dos processos de projeto, ou que ela precisa necessariamente nascer junto da concepção arquitetônica. Nesses casos o trabalho a posteriori dos engenheiros e ou fabricantes seria altamente contraproducente, e pode impossibilitar a produção.

Sobre o papel das modelagens digitais

As tecnologias industriais da madeira são quase que intrinsecamente inter relacionadas a processos digitais de projeção e de fabricação, especialmente em fluxos CAD/CAM, tanto pela necessidade de velocidade de fabricação, quanto pela necessidade de precisão para a sofisticação construtiva.

Há um grande investimento de tempo e recursos intelectuais no processo de projeto e no diálogo entre arquitetos, engenheiros, fabricantes e clientes finais. As informações de projeto em geral são exaustivamente repassadas, conferidas e avaliadas por ambas as partes, para que a estruturação da construção esteja completamente resolvida antes da obra, visto que esse processo é essencial no fluxo de fabricação industrial, Isso se dá porque a construção em madeira é majoritariamente pautada no design de peças de madeira e suas interconexões,

tanto entre si quanto com outros materiais construtivos. Essas peças precisam ser usinadas na fábrica e saídas de lá prontas para montagem *in situ*. Não há muito espaço para ajustes no canteiro de obra, qualquer erro de fabricação e necessidade de reusinagem significaria muita perda material e revés econômico, e a etapa construtiva tende a ser muito rápida. Esses aspectos do sistema de fabricação e construção reiteram a razão do trabalho intensivo e o tempo investido dos processos de projeto, e da utilização de modelos digitais no ensejo de gerenciar todas as informações e detalhes de obra, de forma a manter controle dos procedimentos.

Modelos digitais baseados na materialidade têm importante papel para elucidar o comportamento material de um conjunto construtivo ou um todo estrutural. Os métodos avaliativos baseados em performance ajudam a prever possíveis problemas construtivos e criar soluções mais robustas, respaldadas e registradas cientificamente, especialmente em cenários mais complexos. Isso se torna ainda mais claro quando são usados Modelos Formativos baseados em Performance, que conseguem unir os processos avaliativos à busca de soluções mais eficientes e econômicas.

Mesmo em fluxos mais convencionais de projeção e concepção, baseado em concepções criadas em papel e modeladas em Modelos CAD Descritivos, as modelagens contribuem para conseguir desenvolver com maior velocidade diferentes cenários tectônicos, como visto no estudo de caso do Pavilhão Estábulo. Não obstante, isso é significativamente potencializado quando métodos avaliativos são implementados a esses processos.

Sobre Processos de Tectônica Digital

De acordo com os exemplos estudados reforça-se que a expertise e acúmulo de experiência relacionada ao uso de madeira nas construções, tanto a respeito do comportamento material, uso apropriado, correta proteção do material, repertório amplo de conexões e detalhes, e compreensão dos sistemas construtivos e de

fabricação são basais e essenciais em qualquer exploração tectônica de design, o mesmo acontece com as explorações digitais. O que comprova que nesses casos, o conhecimento formal e tradicional não é excluído pelos procedimentos de tectônica digital, pelo contrário, são fundamentais para maiores explorações digitais e definirão a qualidade da obra construída.

Encontramos em nossos exemplos processos de *simulação/avaliação* e de *otimização* atrelados à exploração e refinamento da natureza tectônica dos projetos estudados centrados no uso de madeira. Em todos os exemplos estudados, a preocupação com desempenho estrutural está atrelada. Nos casos dos processos de *avaliação/simulação* em geral buscou-se dois principais aspectos: compreender o comportamento do todo estrutural do projeto para estudos e tomadas de decisões, o que geralmente desenvolve-se em alterações implícitas de projeto; ou, utilizar a *avaliação/simulação* como aspecto modificador (explícito) de formação para o processo de *otimização* como no uso dos modelos formativos baseados em performance.

Não conseguimos ainda elucidar aspectos de *geração*, realizado inteiramente por equipes e empresas brasileiras, o que indica caminhos para futuras investigações e pesquisas. Isso pode ser explicado pelo fato de que processos de *geração* exigem alto grau de expertise dos profissionais e grande proximidade interdisciplinar desde o início da concepção do design. Aparentemente os grupos voltados a isso são raros no mercado brasileiro, especialmente com ampla experiência e obras já construídas e que conseguem incluir profissionais multidisciplinares em suas equipes. Por essa razão ainda não conseguimos elucidar processos que incluam Modelos Generativos ou Modelos Compostos Integrados.

Processos de *simulação* e *análise* de performance, mesmo em Modelos CAD Avaliativos já tão muito fortes na cultura de projeção da Engenharia brasileira. É comum que esses profissionais tenham contato com programas de cálculo e análise estrutural desde o ensino. Esse uso computacional contribui para melhoria de aspectos de segurança, atendimento às normas e aceleração de processos de cálculo e registros. No entanto, processos de *otimização* requerem procedimentos mais sofisticados e complexos, por demandarem conhecimentos em scripting de desenho

e parametrização. A otimização vista aqui ainda é no sentido de aprimoramento de formas desenvolvidas por paradigmas de design mais próximos dos baseados em papel, no entanto, não deixam de apresentar aspectos de *computação* interessantes e válidos para o aprimoramento de projeto. Ainda resta explorarmos a otimização feita como busca de formas (form-finding), e métodos generativos ou de morfogênese atrelados à madeira.

Em resumo vemos que nos exemplos estudados os arquitetos estão mais fortemente envolvidos ou protagonizando processos de tectônica digital relacionados a busca de forma (form-finding), simulação e otimização de processos de fabricação. Enquanto os engenheiros mais envolvidos com processos de simulação de comportamento estrutural, análise de desempenho, otimização de massa estrutural, e otimização de processos de fabricação. [ver figura 3.24]

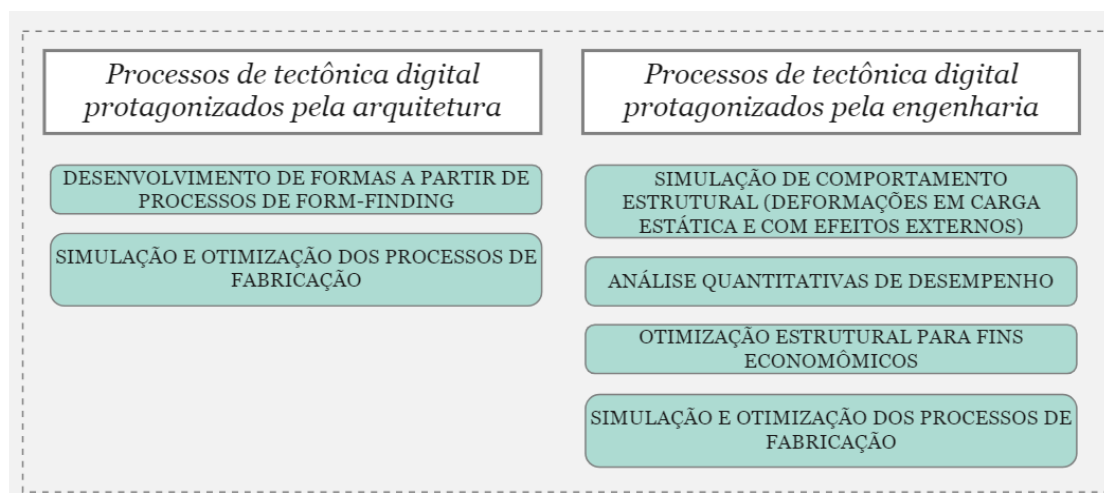


Figura 3.24 Resumo dos processos de tectônica digital quando enquadrados pelo protagonismo arquitetura e engenharia, tal qual encontrados nas investigações desse trabalho, com o recorte postulado.

3.6 Considerações Finais

A partir dos exemplos investigados, conseguimos afirmar que a Tectônica Digital voltada ao desenvolvimento de obras centradas em madeira, contribui bastante para um aumento no cientificismo, no controle de informações, no atendimento às normas de segurança e padrão de qualidade, na busca de melhores soluções projetuais e de economia material.

Os exemplos que foram encontrados aqui apontam que estamos em um momento de transição em que em projetos centrados na madeira, a Tectônica Digital que é explorada é ainda muito mais baseada em procedimentos de Avaliação, Simulação e Otimização voltados à performance.

Não encontramos processos generativos ou morfogênicos voltados à madeira enquanto material principal, o que precisa ser melhor elucidado em estudos futuros.

Os fluxos padrões de relacionamento entre arquitetura e engenharia não conseguem ser tão elucidativos quanto a investigação exige. Afirma-se então aqui que, para estudos futuros, o enfoque deve ser maior na investigação de casos de projetos escolhidos taticamente, especialmente na compreensão de como foi o processo do desenvolvimento do projeto à construção da obra. A relação entre criação inventiva de um projeto e seu processo de tangibilidade é complexo, cheio de nuances entre conhecimentos previamente estabelecidos e conhecimentos obtidos durante o próprio processo de desenvolvimento de um projeto, e é a partir dessas dinâmicas que conseguimos entender melhor o papel dos agentes e o produto de seus diálogos.

Referências bibliográficas

AFLALO, Marcelo. Estruturas em madeira: forma e método. 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, A. C.; YAMASHITA, A. C. Arquitetura indígena. Revista de Ciências Exatas e da Terra UNIGRAN, v2, n. 2, 2013.

AMARAL, Izabel. Ressaltando as tensões tectônicas: a complexidade dos conflitos criativos e construtivos na concepção do projeto. ENANPARQ II Encontro Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Natal:[sn], 2012.

ANDRADE, Max Lira Veras Xavier de. **Projeto Performativo na Prática Arquitetônica Recente: Estrutura Conceitual. 2012.** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

BORGES, Marina Ferreira et al. Conversas entre arquitetos e engenheiros no ensino de projetos. 2019.

BORGES, Marina Ferreira. CONVERSA EXPANDIDA. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, v. 28, n. 42, p. 280-315, 2021.

BOUTINET, Jean-Pierre. Antropologia do projeto. 5. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2002

CHAHUD, Eduardo; LAHR, Francisco Antônio Rocco; PERES, Róccio Rover Rosi. O uso de espécies nativas comercializadas em Belo Horizonte na composição de madeira laminada colada. Construindo, 2009.

CRUZ, Helena; NUNES, Lina. A madeira como material de construção. Núcleo de Estruturas de Madeira, p. 27, 2005.

FIGUEROA, Manuel Jesús Manriquez; MORAES, Poliana Dias de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. Ambiente construído, v. 9, p. 157-174, 2021.

FRAMPTON, Kenneth. Rappel à l'Ordre: The Case for the Tectonic. Architectural Design, Londres, v. 60, n. 3-4, p. 19-25, 1990.

FRAMPTON, Kenneth. Introdução ao Estudo da Cultura Tectónica, selecção de textos e introdução de Paulo Martins Barata. Lisboa: Associação dos Arquitectos Portugueses, Matosinhos: Contemporânea Editores, 1995.

GESUALDO, Francisco A. Romero. Estruturas de Madeira. 2003. Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~zacarias/Notas_de_Aula_Madeiras.pdf>. Acesso em: julho 2022.

LEACH, Neil; TURNBULL, David, WILLIAMS, Chris (E.). **Digital tectonics**. Chichester: West Sussex, U.K.; Hoboken, NJ: Wiley-Academy, 2004, 152p.

MARTINS, Gisele Cristina Antunes et al. Análise numérica e experimental de vigas de madeira laminada colada em situação de incêndio. 2016. Tese de Doutorado. Tese de doutorado apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

MITCHELL, William J. The logic of architecture: Design, computation, and cognition. Cambridge, MA: MIT press, 1990.

MITCHELL, William J. Constructing complexity. In: Computer aided architectural design futures 2005. Springer, Dordrecht, 2005. p. 41-50.

NAKAHARA, K. O. J. I. et al. Earthquake response of ancient five-story pagoda structure of Horyu-Ji temple in Japan. Proceedings of the WCEE, 2000.

OLIVEIRA, Maria Eduarda Santos de. Desempenho de vigas de madeira lamelada colada de três espécies amazônicas, utilizando dois tipos de adesivos. 2021.

OXMAN, Rivka. Theory and design in the first digital age. Design studies, v. 27, n. 3, p. 229-265, 2006.

OXMAN, Rivka. Informed tectonics in material-based design. Design Studies, v. 33, n. 5, p. 427-455, 2012.

OXMAN, Rivka. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. Design studies, v. 52, p. 4-39, 2017.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. Estruturas de Madeira. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2003. 241 p.

PUIG, Rafael Jeí Fuhr; BRUSCATO, Underléa Miotto. Teoria da tectônica: do tradicional ao digital. Revista brasileira de expressão gráfica [recurso eletrônico].[Florianópolis, SC]. Vol. 8, n. 2 (2020), p. 22-43, 2020.

RITTER, Michael A. Timber bridges. Design, Construction, Inspection and Maintenance. Washington: Forest Products Laboratory, 1990.

SANTOS, Lara Monalisa Alves dos. MADEIRAS. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII, Nº. 000131, 05/09/2018

SEKLER, Edward. Structure, construction, tectonics. In: KEPES, Gyorgy (Org.). **Structure in art and in science**. Nova York: George Braziller, 1965, p. 89-95.

SEMPER, Gottfried (1. ed. 1851). The four elements of architecture: a contribution to the comparative study of architecture. In: SEMPER, Gottfried. The four elements of architecture and other writings. Tradução de Harry Francis Mallgrave e Wolfgang Herrmann; introdução de Harry Francis Mallgrave. Cambridge; Nova York: Cambridge University Press, 1989.

SEMPER, Gottfried (1860, 1863). Style in the technical and tectonic arts, or, practical aesthetics. Introdução de Harry Francis Mallgrave; tradução de Harry Francis Mallgrave e Michael Robinson. Título original: Der Stil in den technischen und tektonischen Künsten; oder, Praktische Aesthetik: Ein Handbuch für Techniker, Künstler und Kunstfreunde. Los Angeles: Getty Research Institute, v. 2, 2004, 980p.

SHIGUE, Erich Kazuo. Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos. 2018. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

TIPPEY, Brett. Eduardo Torroja, Concrete and Spain's Indigenous Structural Types. Victoria, v. 4, p. 7, 2018.

TERZIDIS, Kostas. Algorithmic architecture. Routledge, 2006.

VALLHONRAT, Carles. The in-visibility of tectonics: Gravity and the tectonic compacts. Perspecta, The Yale Architectural Journal, no. 31 Reading Structures, 2000, pp. 23-35.