

<http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v12i1.99222>

INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS CAD/CAE/CAM NO ATELIÊ DE ARQUITETURA: UMA APLICAÇÃO NO PROJETO DE EDIFÍCIOS ALTOS

ARTIGO

Integration of CAD/CAE/CAM technologies in the architectural design studio: an application in high-rise buildings

Gabriela Celani¹, Ana Maria Reis de Goes Monteiro¹, Juarez Moara Santos Franco¹, Victor Calixto¹.

RESUMO: Este artigo descreve uma disciplina de ateliê do 9º semestre do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp – em que foi adotada uma estratégia de projeto paramétrico e baseado em desempenho para o desenvolvimento de edifícios altos. A disciplina envolveu o uso de programas de análise ambiental e estrutural, além da modelagem paramétrica e algorítmica como maneira de incorporar os resultados dessas análises à geração da forma, com base no desempenho. Além disso, a disciplina fez um uso intensivo de equipamentos de fabricação digital para a produção de maquetes. Os resultados obtidos demonstram a importância da presença de uma equipe interdisciplinar de instrutores no ateliê de projeto, além da viabilidade de se reproduzir, ainda que de maneira simplificada, o processo de projeto integrado, com o uso de tecnologias CAD/CAE/CAM, que vem se tornando cada vez mais presente nos escritórios de arquitetura.

PALAVRAS-CHAVE: CAD/CAE/CAM no projeto, projeto de edifícios altos, projeto baseado em desempenho, projeto paramétrico.

ABSTRACT: This paper describes a 5th year design studio in an Architecture and Urban Design undergraduate program which adopted a parametric and performance-based design strategy for the design of high-rise buildings. The studio included the use of environmental and structural analyses, as well as parametric and algorithmic modeling for incorporating the results of these analyses to the generation of form based on performance. Besides, the studio included an intensive use of digital fabrication equipment for the production of scale models. The results show the importance of having an interdisciplinary team of instructors in the design studio, and the feasibility of reproducing, even if in a simplified manner, the integrated design process, with the use of CAD/CAE/CAM technologies, which is ever more present in architectural offices.

KEYWORDS: CAD/CAE/CAM in design, high-rise building design, performance-based design, parametric design.

¹Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia e Arquitetura e Urbanismo Civil.

How to cite this article:

CELANI, G. ; MONTEIRO, A. M. G.; FRANCOJ. M. S.; CALIXTO, V..Integração de tecnologias CAD/CAE/CAM no ateliê de arquitetura: Uma aplicação no projeto de edifícios altos. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São Carlos. v.12 n.1 p29-52 Jan/Abr 2017. <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v12i1.99222>



Fonte de financiamento: Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)

Conflito de interesse:

Declara não haver

Submetido em: 21/06/2015

Aceito em: 06/05/2016

INTRODUÇÃO

Após 40 anos de pesquisa e desenvolvimento na área de Computer-Aided Architectural Design (BAYAZIT, 2004; CROSS, 2007), a primeira década do século XXI viu finalmente uma efetiva transformação em termos de tecnologia do projeto de arquitetura aplicada ao processo criativo de maneira acessível a profissionais liberais e estudantes, e não apenas restrita aos círculos acadêmicos e aos grandes escritórios de engenharia e arquitetura. Estamos presenciando, finalmente, a consolidação de um movimento que vinha sendo gestado desde a criação do primeiro software CAD nos anos 1960, por Ivan Sutherland. Um fato que marcou fortemente essa transformação foi a criação do grupo Smart Geometry, em 2001, por Whitehead, Hesselgren e Parrish, que andavam “frustrados com a falta de recursos e de redes de colaboração sobre arquitetura e computação e desejavam redefinir a maneira como os arquitetos utilizavam as ferramentas digitais” (Peters, Peters, 2013, p.8). Aish, Woodburry, Burry, Kiliam e Williams logo se uniram a eles para oferecer workshops e conferências que criaram o ambiente necessário para o desenvolvimento de ambientes de programação para CAD Generative Components. Em 2008, David Rutten desenvolveu o ambiente de programação visual Grasshopper para Rhinoceros, e alguns anos mais tarde, por volta de 2012, seria criado o Dynamo, um plugin semelhante, porém para a plataforma Autodesk. Foram surgindo em paralelo outros plug-ins que permitem associar os modelos paramétricos a programas de análise de desempenho estrutural e ambiental, como o Geco e o LadyBug. Muitas dessas ferramentas são oferecidas atualmente de forma gratuita ou a baixo custo.

Outro tipo de tecnologia que passou por um forte processo de popularização nos últimos 20 anos foi a fabricação digital. As primeiras máquinas de estereolitografia eram equipamentos caríssimos, cujo uso somente se justificava nas indústrias de bens de consumo em massa de alto valor agregado que tinham necessidade de trabalhar com formas livres, como as indústrias automobilística e aeroespacial. Hoje é possível comprar impressoras 3D de tecnologia FDM (fusion deposition modeling) por menos de US\$1.000,00. Esse barateamento dos equipamentos tem levado muitas escolas de arquitetura, inclusive no Brasil, a equiparem suas maquetarias com máquinas de controle numérico.

No entanto, mesmo diante da popularização dessas novas tecnologias, sua inserção no ensino de arquitetura no Brasil ainda se dá de maneira pulverizada, por meio de disciplinas que vão sendo adicionadas ao currículo de maneira isolada e com foco no ensino do software. Nem sempre ocorre uma real integração com o ensino de projeto. Mas a experiência em algumas escolas do exterior, como a Architectural Association, tem demonstrado a viabilidade desse processo de projeto, com resultados que surpreendem pela sua qualidade conceitual, técnica e plástica.

Diante dessa constatação, coloca-se a seguinte questão: como podemos integrar essas tecnologias no ensino de projeto das escolas brasileiras? Nesse contexto, este artigo apresenta as práticas didático-pedagógicas e as ferramentas utilizadas em uma disciplina obrigatória de projeto arquitetônico do quinto ano do curso de Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Campinas (Unicamp), na qual todas essas tecnologias foram empregadas no processo de concepção de edifícios altos. Nela os estudantes foram estimulados a utilizar, em um mesmo projeto, modelagem paramétrica, análise de desempenho ambiental e estrutural e fabricação digital para produzir desde maquetes urbanas até protótipos de detalhes arquitetônicos.

ENSINO DE PROJETO CONTEMPORÂNEO

Nos métodos contemporâneos de projeto os processos computacionais são utilizados como ferramenta generativa, e não apenas para a representação. Esses processos se caracterizam por um intenso uso de recursos de avaliação de desempenho. Nessa nova maneira de projetar há uma grande ênfase no processo, e isso se reflete também no ensino de projeto (OXMAN, 2008; OXMAN 2012). A utilização de scripts, algoritmos e ferra-

mentas paramétricas é indispensável para essa abordagem (SEDREZ, CELANI, 2014). Durante seu desenvolvimento, a forma vai sendo reconfigurada e testada, buscando atender aos requisitos ambientais, estruturais, etc. A forma emerge de um processo de procura pelo desempenho ótimo, tal como definido no “modelo de desempenho” de Oxman (2008) (Figura 1).

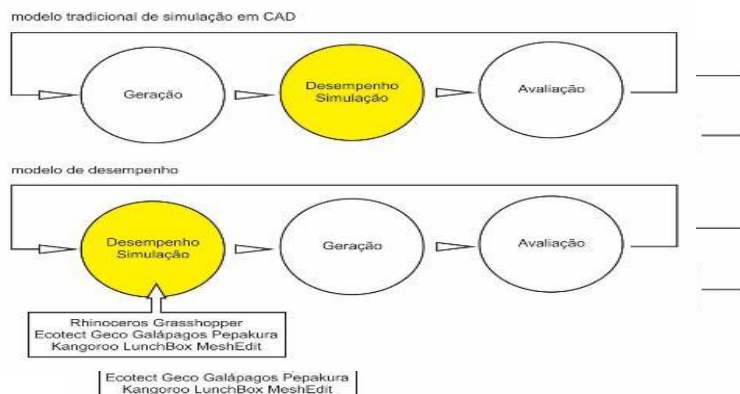


Figura 1 - Modelo de desempenho em comparação com o modelo tradicional de simulação em CAD. Fonte: Sedrez e Celani, 2014, adaptado de Oxman, 2008.

As ferramentas de análise computacional de desempenho (estrutural, ambiental, etc.) permitem testar várias possibilidades antes de partir para o que é senso comum (rules of thumb) (CELANI, 2012). Essas “regras de boa conduta” costumam ser usadas no ensino de projeto tradicional como atalho para a tomada de decisões, evitando o tempo que seria necessário para elaborar análises detalhadas, as quais costumam ocorrer apenas nas disciplinas específicas, porém de maneira pouco contextualizada. Ao introduzirmos ferramentas de análise simplificadas aliadas a modelos paramétricos no ateliê de projeto, é possível gerar e avaliar rapidamente inúmeras alternativas. Isso resulta em projetos mais adequados, cuja configuração emerge, efetivamente, da resposta às condicionantes ambientais e às demandas estruturais.

No curso de graduação em Arquitetura e Urbanismo da Unicamp diversas experiências vêm sendo realizadas, há mais de dez anos, no que tange a introdução de novas tecnologias de projeto em disciplinas eletivas e obrigatórias, como os processos algorítmicos (CELANI, GIACAGLIA, KOVALTOWSKI, 2003), a fabricação digital (DUARTE, CELANI, PUPO, 2011), a gramática da forma (PUPO, PINHEIRO, MENDES, CELANI, KOWALTOWSKI, 2008; MENDES, CELANI, BEIRÃO, 2014), a modelagem paramétrica (SEDREZ, CELANI, 2014; BEIRÃO, MENDES, CELANI, 2015), etc. Neste ano, pela primeira vez, o modelo de desempenho foi aplicado de maneira mais abrangente em uma disciplina de ateliê, na qual os alunos foram estimulados a utilizar, em um mesmo projeto, modelagem paramétrica, análise de desempenho ambiental e estrutural e fabricação digital.

A DISCIPLINA TEORIA E PROJETO IX: VERTICALIDADE

A disciplina Teoria e Projeto IX: Verticalidade é obrigatória, sendo oferecida no 9º semestre do curso de Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. São previstas 90 horas-aula ao longo do semestre, em um total de 15 semanas. Sua ementa prevê a discussão acerca de edifícios verticais, com enfoque nos sistemas construtivos, sistemas estruturais e instalações prediais. Os estudantes que participam da disciplina já cursaram, dentre outras, as disciplinas de fundamentação em desenho urbano, sistemas estruturais, sistemas construtivos, industrialização da construção, estruturas de concreto e metálicas, sistemas sanitários prediais, modelagem paramétrica (com Rhinoceros/Grasshopper) e conforto ambiental (térmico, acústico e lumínico). Para a organização do plano de curso parte-se do princípio de que os estudantes têm uma certa autonomia projetual e que detêm os conhecimentos relativos às disciplinas acima elencadas.

Nesse contexto, a disciplina Verticalidade oferecida no primeiro semestre de 2015 teve como objetivo projetar um edifício alto, utilizando ferramentas de modelagem paramétrica e de análise computacional de maneira

¹O curso de Arquitetura e Urbanismo da Unicamp é noturno e sua integralização se dá em 12 semestres. A experiência aqui relatada contou com a participação de 19 alunos, tendo como docentes os autores deste trabalho.

integrada, de forma a reunir, sintetizar e aplicar os conhecimentos obtidos ao longo do curso. Para tanto, além da retomada e aprofundamento de alguns daqueles conceitos, especialmente aqueles referentes aos sistemas estruturais e de conforto ambiental, lhes foram apresentados os relativos à verticalização das cidades,

ao adensamento urbano, aos marcos urbanos e aos edifícios como símbolo e representação do poder.

Não existe uma definição consensual a respeito do que é um edifício alto. Alguns critérios são baseados na proporção entre base e altura da construção, outros baseiam-se na relação com o entorno, outros ainda afirmam que edifícios altos são aqueles que implicam em desafios não triviais de engenharia, de modo que um edifício que seria classificado como alto há 50 anos talvez não o fosse, caso projetado hoje. Nesta disciplina foram empregados dois critérios simplificados: foram considerados edifícios altos aqueles cujos sistemas estruturais são previstos na literatura e classificados como tais, e sobre os quais as ações de vento desempenham um papel mais significativo do que as forças agindo no sentido da gravidade.

A disciplina foi organizada em quatro grandes unidades de conteúdos: (1) inserção urbana e programa, (2) ferramentas de modelagem paramétrica e de análise ambiental (3), concepção da estrutura de edifícios altos e ferramentas análise de desempenho estrutural, e (4) detalhamento do projeto de arquitetura. A dinâmica utilizada na disciplina, detalhada nas próximas seções, pode ser visualizada na Figura 2.

Em cada unidade foram incluídas bibliografia, ferramentas computacionais, palestras e visitas ligadas ao tema. Ao final de cada unidade os alunos fizeram apresentações de suas propostas de implantação, estruturais, ambientais e de detalhamento construtivo. Essas apresentações deviam ser sempre ilustradas por maquetes físicas e virtuais, com a apresentação de alternativas projetuais e de justificativas das decisões tomadas baseadas nas análises computacionais.

Além das palestras convidadas, foram ministradas apenas três aulas expositivas ao longo do semestre (pelos professores da disciplina), a primeira sobre sistemas estruturais e sua importância para a concepção arquitetônica, a segunda sobre o projeto de um edifício referencial (o Swiss RE Building, de Norman Foster), sob todos os seus aspectos, desde as questões ambientais até a tecnologia construtiva utilizada, e a terceira sobre aspectos teóricos e técnicos relativos ao detalhamento arquitetônico, visando sua aplicação tanto na solução de questões ambientais, como nos sistemas construtivo e estrutural

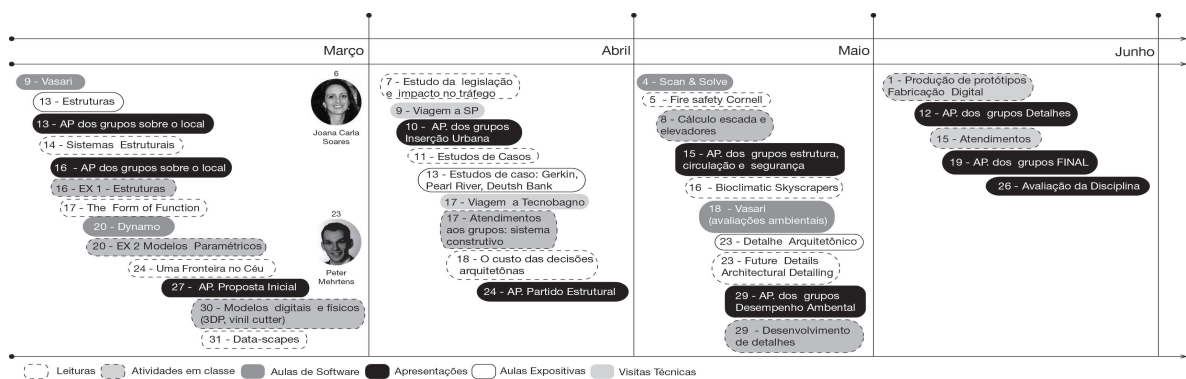


Figura 2 - Linha do tempo da disciplina, com os conteúdos introduzidos e tecnologias utilizadas.

Fonte: : Elaborada pelos autores

Inserção Urbana e Programa

A partir da discussão acerca da verticalização das cidades e do adensamento urbano, foi proposto que os alunos projetassem um edifício comemorativo, símbolo da cidade de Campinas, com cerca de 50 andares, levando-se em conta a complexidade de sua implantação em uma malha urbana existente e com uma proposta programática inovadora. O tema foi apresentado aos alunos sob a forma de uma discussão sobre os principais assuntos que seriam tratados ao longo do semestre: inserção urbana, programa, função da forma, sistema estrutural, prototipagem, fabricação, viabilidade econômica,

eficiência energética, adequação ambiental, instalações prediais, técnicas construtivas e cronograma de obra. Na ocasião, procurou-se estabelecer o conceito de que o melhor edifício alto é aquele que apresenta melhor desempenho ambiental e isso somente ocorrerá se houver uma integração entre a arquitetura, o sistema estrutural, as instalações e o desenho urbano.

Foram convidados dois palestrantes que reforçaram e aprofundaram os conceitos de sustentabilidade e industrialização da construção: a Professora Joana Carla Gonçalves, autora do livro “The Environmental Performance of Tall Buildings” (2010), e o arquiteto alemão Peter Mehrrens, especialista em fabricação digital da indústria de revestimentos metálicos para edifícios Bemo Systems. Os estudantes tiveram acesso a uma vasta bibliografia que incluiu, entre outros, os seguintes textos: “Uma fronteira no céu”, de Otilia Arantes (2011), “The Function of Form”, de Farshid Moussavi (2009), “Re-fabricating Architecture - How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction”, de Kieran e Timberlake (2003). Também foram realizadas visitas a dois edifícios - o Conjunto Nacional e a obra do Instituto Moreira Salles (projeto do escritório Andrade Morettin e planejamento da empresa Canal e Musse), ambos na Av. Paulista, e uma visita a uma indústria de banheiros pré-fabricados.

Em um primeiro momento os estudantes foram organizados em grupos de 5 alunos, num total de 4 equipes, e lhes foi solicitado que propusessem uma área, na cidade de Campinas, que, em sua opinião, fosse significativa para a cidade e que tivesse porte para receber um edifício com as características propostas. A partir do levantamento realizado (Figura 3) foi feita uma discussão sobre o impacto dos edifícios altos sobre os pedestres, as calçadas, o tráfego de veículos, bem como as questões de escala humana, barreiras urbanas, dinâmicas socioeconômicas e ambientais que poderiam ser comprometidas e eventuais medidas mitigadoras, densidade e diversidade. A classe como um todo escolheu umas das 4 áreas para trabalhar. Essa atividade foi extremamente produtiva pois demonstrou a maturidade da turma no entendimento da cidade contemporânea, seus desafios e potencialidades.



Figura 3: Levantamento da área de estudo da equipe dos estudantes Pedro Langella, Paula M. Siqueira, Maria José Reche e Tais Herig

Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

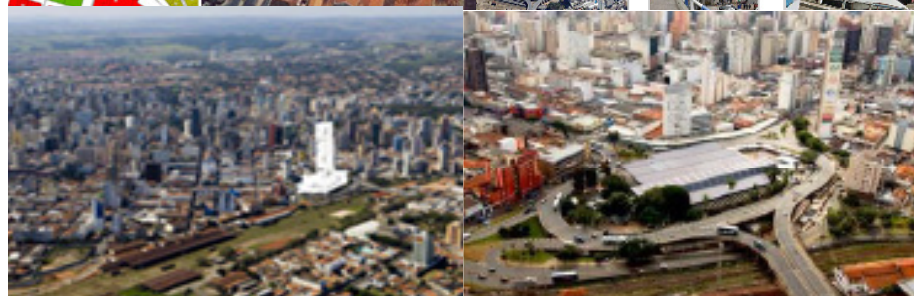


Figura 4: Situação atual da área de estudo

Fonte: <http://i1158.photobucket.com/albums/p607/dadobordini/terminalcentral.jpg>

A área escolhida pela turma localiza-se no centro da cidade, no interior de um viaduto onde, atualmente, funciona o terminal de ônibus central (Figura 4). Apesar de complexa, a área escolhida tem potencialidades inegáveis: trata-se de um ponto de entrada da cidade, pode ser visto em perspectiva a partir de diversas avenidas importantes da cidade e encontra-se ao lado de área de patrimônio ferroviário. A área apresenta também alguns desafios: a existência do terminal urbano mais movimentado da cidade, por onde passam diariamente cerca de 70.000 pessoas, a existência de comércio ambulante e, principalmente, o fato de estar rodeada por um viaduto.

A partir desse momento, os alunos foram organizados em duplas para o desenvolvimento dos projetos. Em seguida, foi produzida uma maquete em escala 1:1.000 da região escolhida, com papelão ondulado cortado a laser, sobre a qual as equipes deveriam testar sua volumetria com relação ao entorno urbano em uma apresentação da proposta inicial. Como primeiro exercício de projeto, solicitou-se que os alunos organizassem uma prancha síntese (Figura 5) com seu conceito formal, proposta de programa arquitetônico, inserção urbana e principais referências projetuais. Também foi pedido que eles produzissem uma maquete física de sua proposta inicial, em escala 1:1000, para ser inserida na maquete do contexto urbano.



Figura 5: Exemplos de pranchas-síntese e maquete da área
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

A apresentação das maquetes logo no início do processo de projeto permitiu que fossem discutidas questões relativas à implantação urbana e às estratégias projetuais adotadas. A rapidez com que a maquete urbana foi produzida só foi possível pelo fato de utilizarmos uma cortadora a laser na confecção da mesma. O estudo da maquete permiti-

tiu evidenciar que preservar a qualidade ambiental é também promover a vitalidade socioeconômica do espaço público, e que o projeto deveria espelhar os conceitos relativos aos edifícios energeticamente eficientes, com redução do consumo de energia através da iluminação e ventilação naturais. Também foram apresentados os programas multifuncionais dos edifícios e discutido o problema da sedução da forma, especialmente pela facilidade com que ela é gerada nos softwares paramétricos, versus a necessidade de se adotar estratégias projetuais baseadas em parâmetros conceituais e técnicos. O exercício de simulação consistiu em utilizar a ferramenta do Vasari para analisar o acúmulo de energia térmica nas fachadas do edifício ao longo de um determinado dia do ano, em um dado local. Os períodos escolhidos foram o solstício de verão, solstício de inverno e equinócio. Esse exercício de simulação foi um passo importante para os alunos pois, por meio dele, puderam explorar o desempenho ambiental de algumas composições geométricas complexas (sólidos torcidos, flexionados e/ou escalonados), onde o grau de complexidade geométrica impossibilitaria o uso de rules of thumb (regras baseadas na experiência), uma vez que as fachadas possuíam orientação variável.

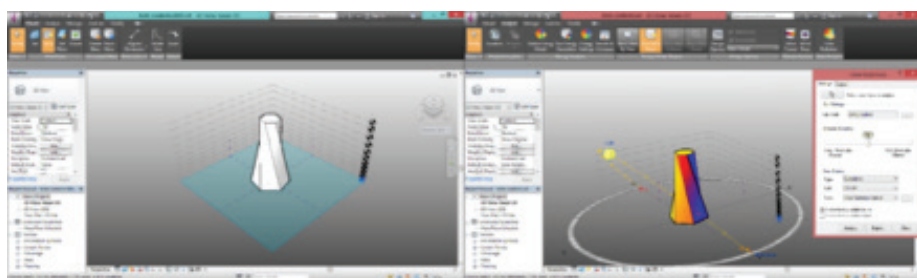


Figura 6 - Modelagem e simulação no software Vasari
Fonte: Elaborada pelos autores

O conhecimento prévio dos alunos relacionado às disciplinas de conforto ambiental foi essencial nessa etapa de simulação, visto que, através dele, puderam avaliar a coerência dos resultados obtidos. Esse tipo de simulação só é viável quando o estudante quer validar sua “intuição” sobre determinado aspecto do objeto, de forma a obter dados mais precisos. Quando o estudante não possui esse conhecimento prévio existe a possibilidade de que ele acredite em dados inverídicos, resultantes de informações erroneamente inseridas (informações geométricas ou numéricas) no software.

O segundo exercício proposto foi sobre modelagem paramétrica em Autodesk Dynamo. Trata-se de um ambiente de programação visual com interface semelhante à do Grasshopper (plug-in do Rhinoceros). A Figura 7 ilustra as semelhanças entre as interfaces desses dois ambientes para a modelagem de um círculo.



Figura 7: Modelagem de um círculo no ambiente do Grasshopper e do Dynamo
Fonte: Elaborada pelos autores

Tanto no Dynamo quanto no Grasshopper é possível desenvolver modelos paramétricos e componentes em script. A grande diferença entre os dois é que o Dynamo está sendo desenvolvido para funcionar de forma integrada com o software BIM Autodesk Revit e também com o software de concepção, análise e simulação ambiental Autodesk Vasari. A escolha do Dynamo para a disciplina deveu-se à possibilidade de integração com o software Vasari, em razão do foco proposto no desempenho ambiental de edifícios altos. Desse modo, a modelagem paramétrica poderia ter uma resposta quase instantânea aos requisitos ambientais e poderiam ser utilizados métodos de formfinding de maneira automática. A versão escolhida foi a versão Dynamo 0.75, que é instalada como plug-in no software Vasari. Os temas abordados na introdução ao Dynamo foram a interface, o manejo de listas, a construção geométrica, blocos de script, a instalação de plug-ins, interoperabilidade geométrica e análise ambiental entre Vasari e Dynamo. Após a apresentação introdutória desses tópicos, foi desenvolvido, passo-a-passo, um exercício de modelagem paramétrica juntamente com os alunos. O tema proposto foi um edifício hipotético (isolado de um contexto urbano), onde os elementos de vedação da fachada eram dimensionados de acordo com o vetor solar em determinada hora e data do ano, com o intuito de controlar a entrada de luz direta na edificação. A Figura 8 ilustra esse processo.

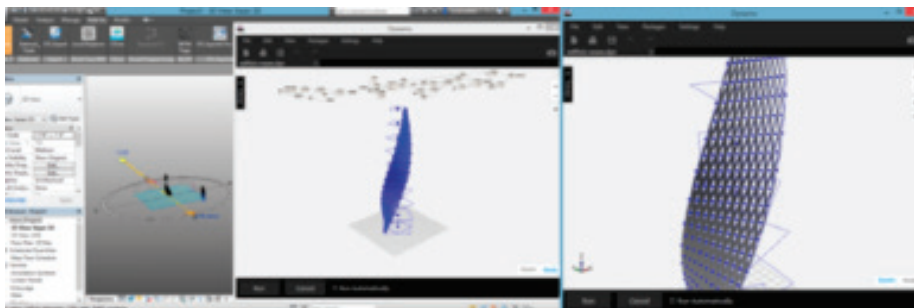


Figura 8: Modelagem no software Dynamo
Fonte: Elaborada pelos autores

O exercício de parametrização em Dynamo foi essencial para que os alunos compreendessem alguns aspectos importantes para o processo de projeto com o uso de ferramentas de modelagem algorítmica-paramétrica. Muito mais que simplesmente aprender a utilizar um software específico, a introdução desse tipo de instrumental no processo de projeto estimula o estudante a explicitar suas decisões e a incorporar suas decisões ambientais na definição da forma. Nessas etapas ele deve decidir “o que”, “por quê” e

“para quem” há a necessidade de relacionar parametricamente determinados elementos da edificação.

Após as aulas introdutórias de modelagem paramétrica e simulação, os estudantes deram início ao desenvolvimento dos projetos em duplas, enfrentando o desafio de pensar um edifício vertical no contexto urbano do centro de Campinas levando em consideração inúmeras variáveis.

No processo de modelagem paramétrica do projeto, cada grupo utilizou software de modelagem paramétrica-algorítmica com o qual se sentia mais a vontade (Grasshopper ou Dynamo). O Grasshopper foi escolhido pela maioria dos grupos, provavelmente porque os alunos já possuíam alguma experiência nesse software, mas também porque já existe uma grande quantidade de informações disponíveis na Internet sobre ele, como e-books, tutoriais em vídeo, plug-ins e fóruns de discussão onde é possível encontrar a solução para problemas de simulação, geométricos e numéricos. Devido ao seu pouco tempo de desenvolvimento, o Dynamo ainda carece de plug-ins e de determinados componentes essenciais, que são bem conhecidos pelos usuários de Grasshopper.

Após discussões teóricas sobre programa e técnicas de projeto, os estudantes tiveram que determinar quais estratégias paramétricas adotariam, de acordo com o partido arquitetônico de cada grupo. Contudo, a falta de experiência dos alunos em modelagem paramétrica com o uso de dados de análise ambiental e estrutural não permitiria o desenvolvimento de seus projetos da maneira como desejariam. Para compensar essa dificuldade, um dos instrutores auxiliou os alunos na produção dos modelos.

A seguir, são apresentadas quatro das estratégias generativas adotadas pelas equipes, por sugestão dos instrutores: (1) recursividade e atratores como agentes do desempenho ambiental, (2) simulação física do sistema estrutural, (3) atratores como efeito visual e controle de luz, e (4) simulação computacional de águas pluviais sobre uma cobertura. As técnicas para a implementação dessas estratégias na modelagem dos projetos foram apresentadas individualmente a cada equipe pelo instrutor assistente, que é aluno de mestrado, por meio de sessões tutoriais fora do horário de aula.

Recursividade e atratores como desempenho ambiental

Os grupos de alunos que utilizaram esse tipo de estratégia parametrizaram as relações dos elementos de vedações arquitetônicas e as condições ambientais, mais precisamente o acúmulo de calor nas faces dos edifícios e os vetores solares para determinada data e horário do ano. Foram duas estratégias de recursividade adotadas e uma utilizando atratores dentro dessa temática ambiental.

O primeiro grupo a usar a recursividade adotou-a como recurso para controlar a entrada de luz no edifício, através da angulação criada entre o vetor solar e as faces de vedação do edifício que foram criadas com base no diagrid estrutural e depois separadas em 3 domínios de angulação ($\alpha = 90^\circ$; $\alpha > 45^\circ$ e $\alpha < 135^\circ$; e entre $\alpha < 45^\circ$ e $\alpha > 135^\circ$). A estratégia adotada por esse grupo foi subdividir as faces triangulares com base no triângulo de Sierpinski, que é um método matemático de subdivisão de triângulos de maneira fractal e recursiva. A ideia foi adotar mais interações para as faces mais ensolaradas e menos interações para as menos ensolaradas.

A recursividade foi utilizada pelo segundo grupo de maneira semelhante ao primeiro, mas esse grupo adotou o acúmulo de calor nas faces dos edifícios como parâmetro de subdivisão. Nesse caso, a estratégia paramétrica adotada foi o “ice-ray design” que é uma técnica construtiva tradicional chinesa, em que ripas de madeira são apoiadas umas nas outras formando uma triangulação da superfície, de maneira a subdividir um painel. As faces que recebiam mais calor durante o dia foram mais subdivididas, enquanto as que recebiam menos calor foram menos subdivididas.

¹O desenvolvimento do Vasari como software independente foi recentemente descontinuado pela Autodesk, como descrito em [vide http://autodeskvasari.com/forum/topics/important-message-about-the-vasari-timeout-on-may-31-2015](http://autodeskvasari.com/forum/topics/important-message-about-the-vasari-timeout-on-may-31-2015). Neste momento, ele está sendo desenvolvido para trabalhar de maneira integrada com a plataforma de Softwares BIM e de simulação da empresa Autodesk.

O terceiro grupo a utilizar dados ambientais como estratégia paramétrica empregou atratores para controlar os brises com base no acúmulo de calor nas fachadas ao longo de um dia (Figura 9). Os atratores utilizados eram pontos no espaço que estavam relacionados a pontos da subdivisão da curva dos brises. Após a avaliação da distância entre eles, os números obtidos eram usados como base para escalonar a geometria dos brises.

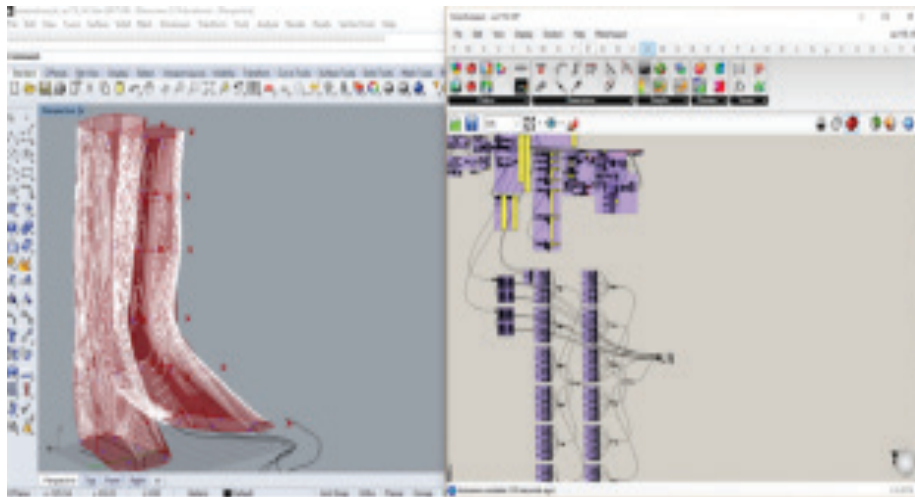


Figura 9: Atratores com base no acúmulo de calor nas fachadas e linhas base dos brises, elaborado pelos estudantes Fernanda Bernava Martinez e Guilherme da Silva Carvalho
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

Simulação física do sistema estrutural

Um dos grupos em uma etapa do processo utilizou um recurso computacional que tem sua origem em estudos desenvolvidos por Gaudi no final do século XIX. Gaudi utilizou modelos onde analisava o caminho das forças através de cabos que estavam somente sobre a ação de tração, e que o modelo geométrico resultante invertido estaria somente sobre a ação de forças de compressão. Se apropriando desse princípio, o grupo idealizou que através de simulações físicas do plugin para Grasshopper chamado Kangaroo iriam desenvolver uma cobertura baseada nos princípios de Gaudi. A estratégia paramétrica foi criar uma malha de pontos que estavam sofrendo ação de uma força gravitacional negativa, isso quer dizer que ao invés dos pontos tenderem a se aproximar do solo os pontos tenderiam a se afastar dele. Foram definidos pontos ancoras que serviram de pontos de apoio para a estrutura e depois foi rodado o componente de simulação. Esse experimento serviu para os estudantes entenderem a relação entre os vãos e as dimensões dos arcos necessários para vencer cada um deles (Figura 10).

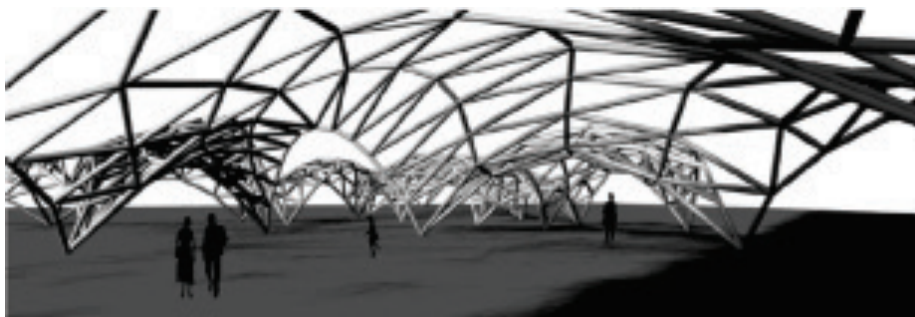
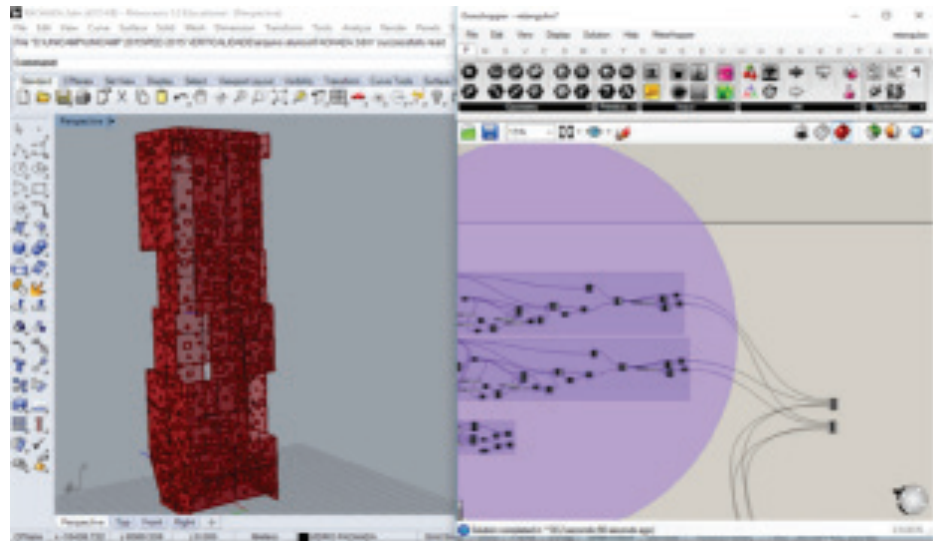


Figura 10: Cobertura desenvolvida com os princípios de Gaudi, pelos estudantes Laura Rodrigues Parizi e Rafaella Mayumi de Almeida Silva.
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

Figura 11: Pontos Atratores como efeito visual na fachada, desenvolvido pelos estudantes Anne Mayara Almeida Capelo e Camila Midori Yoshida.
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina



Simulação computacional de águas pluviais sobre uma cobertura

A simulação computacional de águas pluviais sobre uma cobertura foi utilizada para ajudar na tomada de decisão do detalhamento arquitetônico. Uma das equipes desenvolveu uma cobertura com formas livres e resolveu simular o caminho que a água percorreria sobre a superfície da cobertura (Figura 12), a fim de identificar e solucionar problemas de acúmulo e escoamento das águas pluviais. A simulação foi feita com um plugin para o Grasshopper chamado NudiBranch. A superfície foi subdividida em pontos randomicamente e foi determinado o número de interações em que o ponto deslizaria ao ponto mais próximo e abaixo da superfície. Após esse procedimento, uma linha é traçada interligando esses pontos, criando assim o caminho de escoamento das águas pluviais e indicando os possíveis locais de acúmulo da água.

Ao fim dos atendimentos, ficou claro para os alunos que o conhecimento dos componentes do software era importante para o desenvolvimento desse processo mas que, além disso, o método de concepção algorítmica do projeto é tão, se não mais, importante que o próprio conhecimento de um software específico. O gerenciamento do fluxo informacional de um projeto de alta complexidade como um edifício alto através de um pensamento algorítmico/paramétrico dá ao aluno a possibilidade de pensar o projeto de maneira holística, sem perder o foco nos aspectos técnicos mais específicos. Além disso, o processo paramétrico-algorítmico do projeto possibilita ao estudante explorar novas possibilidades formais/volumétricas que não seriam possíveis ou imagináveis com o uso dos métodos tradicionais de projeto.

Simulação computacional de águas pluviais sobre uma cobertura

A simulação computacional de águas pluviais sobre uma cobertura foi utilizada para ajudar na tomada de decisão do detalhamento arquitetônico. Uma das equipes desenvolveu uma cobertura com formas livres e resolveu simular o caminho que a água percorreria sobre a superfície da cobertura (Figura 12), a fim de identificar e solucionar problemas de acúmulo e escoamento das águas pluviais. A simulação foi feita com um plugin para o Grasshopper chamado NudiBranch. A superfície foi subdividida em pontos randomicamente e foi determinado o número de interações em que o ponto deslizaria ao ponto mais próximo e abaixo da superfície. Após esse procedimento, uma linha é traçada interligando esses pontos, criando assim o caminho de escoamento das águas pluviais e indicando os possíveis locais de acúmulo da água.

Ao fim dos atendimentos, ficou claro para os alunos que o conhecimento dos componentes do software era importante para o desenvolvimento desse processo mas que, além disso, o método de concepção algorítmica do projeto é tão, se não mais, importante que o próprio conhecimento de um

software específico. O gerenciamento do fluxo informacional de um projeto de alta complexidade como um edifício alto através de um pensamento algorítmico/paramétrico dá ao aluno a possibilidade de pensar o projeto de maneira holística, sem perder o foco nos aspectos técnicos mais específicos. Além disso, o processo paramétrico-algorítmico do projeto possibilita ao estudante explorar novas possibilidades formais/volumétricas que não seriam possíveis ou imagináveis com o uso dos métodos tradicionais de projeto.



Figura 12: Simulação do escoamento da água pela cobertura, elaborado pelos estudantes Laura Rodrigues Parizi e Rafaela Mayumi de Almeida Silva
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

CONCEPÇÃO DA ESTRUTURA E FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESTRUTURAL

Conceber estruturas de edifícios altos com intencionalidade estética é um desafio fascinante, que envolve lógica, criatividade e experiência. Na prática profissional, as estruturas são consideradas sistemas extremamente complicados, que demandam grandes equipes integradas de especialistas em diversas áreas do conhecimento, com obstáculos que precisam ser contornados para sua abordagem nos ateliês de projeto em cursos de graduação em Arquitetura. Do ponto de vista cultural, é sabido que o perfil médio destes estudantes é refratário à modelagem matemática necessária para a compreensão de tópicos avançados de análise estrutural. O segundo obstáculo, de natureza técnica, diz respeito à disponibilidade de ferramentas numérico-computacionais adequadas à avaliação do desempenho mecânico destes sistemas. Os softwares consagrados para este tipo de simulação (Abaqus, Ansys e SAP2000) ainda apresentam, como desvantagem, o alto custo de suas licenças e treinamento especializado para o correto intercâmbio de dados com os sistemas CAD, modelagem estrutural e interpretação dos resultados.

Nesse sentido, é preciso ressaltar que o objetivo desta disciplina não foi formar arquitetos-engenheiros capazes de resolver sozinhos todos os problemas do projeto de um edifício. Pelo contrário, procurou-se instigar a discussão e troca de informações como parte do processo criativo, de modo a aprimorar a capacidade destes estudantes de arquitetura e urbanismo em discutir seus projetos com engenheiros mais experientes, assimilar críticas e sugestões e, com base nisso, aprimorar suas concepções arquitetônicas e incentivar o uso das ferramentas computacionais disponíveis e que permitem, ainda que de maneira simplificada, antever os conceitos dos softwares de simulação mais robustas que estarão disponíveis para estes profissionais em grandes escritórios. No futuro, espera-se que o desenvolvimento destas ferramentas e de sua interoperabilidade torne cada vez mais fluidas as fronteiras entre bons profissionais de arquitetura e engenharia. É para este debate e para este futuro cada vez mais próximo que esta disciplina foi desenhada e conduzida do ponto de vista dos sistemas estruturais.

Como já observado, a aquisição de licenças para as ferramentas computacionais de simulação mais robustas não são um investimento compatível com as necessidades usuais de estudantes de graduação em Arquitetura. Algumas das alternativas viáveis consistem em recorrer a aplicativos gratuitos ou que possuam versão estudantil, de demonstração (prazo cur-

to de expiração) e versões beta de aplicativos robustos, que costumam ser disponibilizados gratuitamente pelos fabricantes para a identificação de falhas. Estas últimas oferecem recursos inovadores, mas atualizações ou interrupção do suporte podem ocorrer a qualquer momento do decorrer de um semestre letivo, de modo a transformação acelerada dos aplicativos acessíveis e gama de alternativas diferentes para a consecução de uma mesma tarefa constituem dificuldade adicional para professores e alunos.

Adicionalmente, seria desejável que fundamentos teóricos e inovação fossem discerníveis aos olhos de estudantes que abordam este tema pela primeira vez, pois a lógica generativa subjacente ao processo de concepção da forma arquitetônica independe de computadores, a decisão de automatizar a geração da forma pertence ao projetista e estas implementações devem obedecer a propósitos bem definidos. O cerne deste desafio consiste na própria criação de sistemas generativos, ou seja, de um certo tipo de dispositivo capaz de prever todas as possíveis alternativas envolvidas na resolução de um problema, estabelecer relações de dependência entre decisões projetuais e estar apto a criar todas as possíveis combinações entre as alternativas básicas. Quando um sistema generativo é implementado em uma plataforma computacional, a velocidade de criação de alternativas é aumentada em uma ordem de grandeza muito superior à da capacidade humana. No entanto, o tempo e energia necessários para efetuar uma implementação bem-sucedida geralmente superam o da elaboração de algumas poucas alternativas pelo “método manual”. Dadas as limitações de tempo, nem sempre estes questionamentos são assimilados pelos estudantes.

Para enfrentar estas dificuldades, a estratégia didática da disciplina, em relação aos sistemas estruturais, foi baseada em três etapas, duas curtas e uma mais longa: (1) conceituação, na qual os estudantes foram guiados a conceber a forma de um edifício alto baseada em um sistema generativo relativamente rígido, sem levar em consideração qualquer outro fator de projeto além do sistema estrutural e (2) instrumentalização, na qual os alunos aprenderam a utilizar ferramentas computacionais simplificadas de dinâmica de fluidos (CFD) e deformação de corpos por ação das forças externas e (3) desenvolvimento do sistema estrutural em paralelo com o projeto de arquitetura, com a apresentação periódica do trabalho acompanhada por críticas, discussão e revisão. Os objetivos da primeira fase foram desenvolver a intuição estrutural e apresentar aos estudantes uma metodologia da concepção inicial de sistemas de estruturas baseados em malhas reguladoras e critérios de pré-dimensionamento, de tal modo que o processo criativo não fosse atrasado por modelagens computacionais, mas levasse em consideração as restrições que cada sistema estrutural de edifício alto impõem a seu projeto. Essa fase consistiu, basicamente, em um exercício de entendimento de um sistema generativo “manual”, na qual uma escolha condicionava as regras das decisões subsequentes. A primeira decisão consiste na adoção de uma das “malhas reguladoras” (Engel 2001) para o desenho de edificações

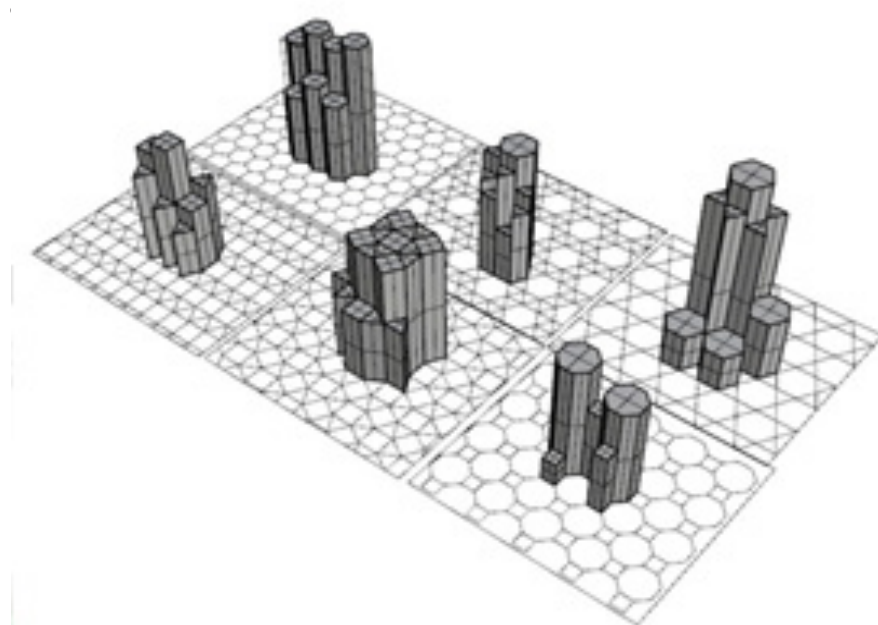


Figura 13: Seis exemplos de malhas reguladoras para o desenho de edificações altas
Fonte: Elaborada pelos autores, a partir de ENGEL, 2000.

Uma das vantagens da adoção das malhas reguladoras para o desenvolvimento das plantas do sistema estrutural reside na padronização de vãos, o que reduz a necessidade de empregar peças estruturais de perfis muito variados. A malha reguladora condiciona o lançamento da estrutura segundo os sistemas básicos propostos por Engel e por manuais especializados (CTBUH 2012) listados na Tabela 1. A segunda escolha, do sistema estrutural, adiciona uma restrição ao problema, pois cada modelo é mais recomendado para determinado limite mínimo e máximo de andares e pavimentos. Sistemas básicos podem ser recombinaados de acordo com a criatividade do projetista, mas neste primeiro exercício eles deveriam ser instanciados em sua expressão “pura”.

Tipo	Nome	Andares
Tipo I: Shear frames	Semi-rigid frame	17
	Rigid frame	30
Tipo II: Interacting system	Frame with shear truss	48
	Frame with shear, band and outrigger trusses	60
Tipo III: Partial tubular system	End channel framed tube with interior shear trusses	63
	End channel and middle “I” framed tube	68
Tipo IV: Tubular system	Exterior framed tube	90
	Bundled framed tube	112
	Exterior diagonalized tube	115

A terceira escolha diz respeito ao material estrutural (aço ou concreto) do sistema, o que pode implicar em uma série de ajustes nos vãos propostos inicialmente, pois dadas a altura padrão de piso a piso e uma relação média entre altura de viga e distância entre apoios, os elementos estruturais nunca devem violar o espaço útil do usuário, contido entre o piso e o forro. Na ausência de tabelas recentes na literatura nacional sobre edifícios altos, foi empregada uma comparação entre construções norte-americanas executadas em aço ou concreto no século XX (BLANC, 1993) (ver Tabela 2).

Tabela 1: Sistemas estruturais básicos e seus limites de altura
Fonte: Adaptado de ENGEL, 2000.

Material estrutural	Relação altura de viga / vão
Aço	1/19
Concreto	1/22

Por fim, nos sistemas estruturais que requerem núcleos rígidos, os estudantes deveriam escolher entre um e quatro núcleos e posicioná-los dentro ou fora do perímetro da edificação. Esta perturbação poderia implicar uma nova cadeia de ajustes na altura das vigas. Não foi imposta como restrição a taxa de área útil do pavimento, embora seja usual mantê-la em torno de 75% (Blanc, 1993). A restrição foi suspensa para que os estudantes tivessem mais liberdade no gerenciamento do espaço. Adicionalmente, foi imposta a restrição entre largura da base e altura do edifício em função do material estrutural escolhido, como apontado na Tabel 3.

Tabela 2: Relação média entre vãos e altura de viga em edifícios norte-americanos
Fonte: Adaptado de BLANC, 1993.

Material estrutural	Relação base / altura do edifício
Aço	1 / 2.9
Concreto	1 / 4.7

Tabela 3: relação entre base e altura da edificação
Fonte: Adaptado de BLANC, 1993

A Figura 14 apresenta dois diferentes trabalhos de estudantes da disciplina nesta primeira fase. Além de darem forma a um sistema estrutural que obedecesse às restrições apresentadas neste artigo, as apresentações deveriam apresentar o “caminho das forças”, identificando como os carregamentos são transmitidos das lajes e das paredes sob ação de vento para as vigas e daí para os pilares, até a fundação.

No conjunto das soluções propostas a partir deste sistema generativo, percebe-se uma tendência a subordinar a intencionalidade estética aos imperativos técnicos e repetir as tipologias propostas por Engel (2000) apenas como ilustração de conceitos. Torna-se evidente, em alguns casos, a opção por considerar o núcleo rígido como único elemento estrutural responsável por dirigir os esforços até as fundações e que elementos de barra em tração são, eventualmente, representados como cabos. É possível perceber, a partir deste exercício simples, o estágio da intuição estrutural dos estudantes no início da disciplina, o que foi útil para efeitos de comparação com os trabalhos finais.

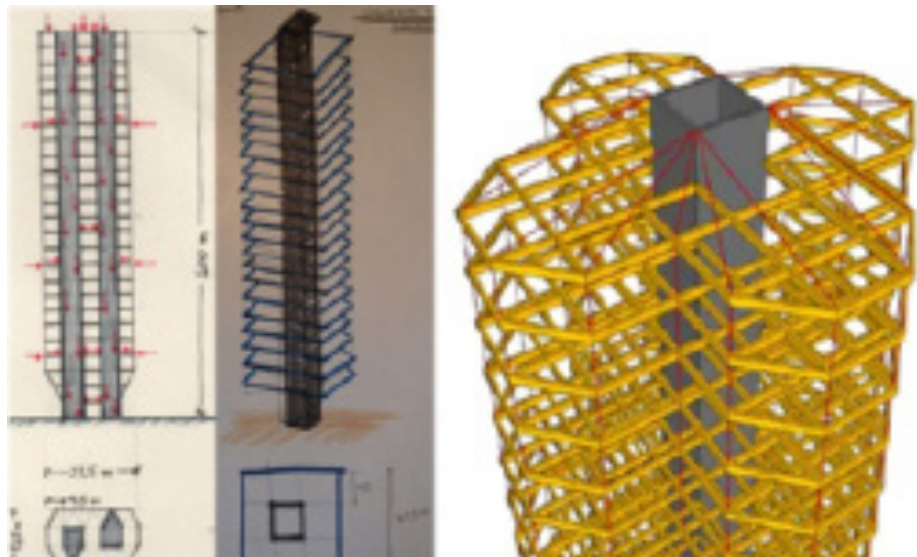


Figura 14. Concepções estruturais de estudantes na primeira etapa do desenvolvimento estrutural
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

Na segunda etapa foram apresentados dois programas de análise, um para estimar a intensidade das ações de vento sobre o edifício e outro para o entendimento do processo de deformação das estruturas em consequência destas forças externas. As ferramentas computacionais utilizadas foram o EasyCFD e o Scan-and-Solve. A interação fluido-estrutura é um tema a ser resolvido em estágios intermediários de desenvolvimento dos projetos, onde as principais decisões já foram tomadas, mas ainda há margem para ajustes. É interessante, nesta etapa, criar modelos geométricos das edificações em Rhinoceros com programação em Grasshopper, para investigar o efeito destas variações paramétricas sobre o desempenho mecânico dos sistemas sob ação de vento. As ferramentas de modelagem geométrica e análise estrutural adotadas são integradas no mesmo aplicativo, mas o aplicativo de CFD (Computer Fluid Dynamics) possui baixa interoperabilidade com o Rhinoceros. Para efetuar a integração entre as três ferramentas, é preciso conhecer as características e as limitações de cada uma.

O programa Scan-and-Solve de análise estrutural, que pode ser acessado no ambiente do Rhinoceros, foi desenvolvido para estudos de engenharia mecânica em peças monolíticas e seus outputs não incluem informações básicas para a análise estrutural em engenharia civil, tais como forças axiais, forças cortantes, momentos fletores e de torção. Tampouco é possível informar os graus de liberdade restritos nos apoios e as condições de en-

gastamento das ligações, usar elementos de cabo ou aplicar protensões, nem é possível recorrer a nenhuma norma brasileira de dimensionamento de estruturas de aço, concreto ou mistas para verificar a segurança das dimensões adotadas. Quando aplicado à análise estrutural de um edifício, o Scan-and-Solve impõe simplificações, pois a edificação é considerada um corpo maciço ou oco, onde a estrutura periférica é modelada como um domínio contínuo, sem furos e sem conexão com o núcleo rígido. Este tipo de abordagem não seria empregado em projetos usuais de engenharia de estruturas (Figura 15).

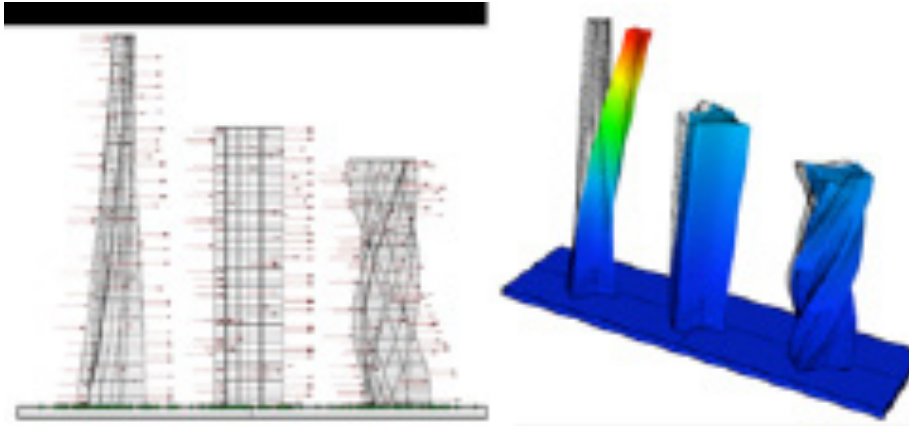


Figura 15: Três estudos de ação de vento em Scan-and-Solve apresentados aos alunos na aula-tutorial sobre o programa
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

Obviamente, este tipo de modelagem não é uma abordagem realista da rigidez do edifício, mas se presta de maneira excelente como ferramenta didática, porque conceitos elementares e comuns a todos os programas de análise estrutural, como definição de geometrias e materiais, carregamentos, apoios e visualização de tensões e deformações são explorados facilmente pelos estudantes, graças a uma interface gráfica extremamente simples e intuitiva.

A modelagem da ação de fluidos sobre estrutura em softwares robustos, tanto quanto a modelagem de estruturas, requer treinamento especializado. Um dos objetivos destes programas é substituir o ensaio experimental em túneis de vento para determinação dos coeficientes de pressão. Ambos, aplicativos comerciais robustos e experimentos em túnel de vento, levam em consideração a volumetria do edifício e, eventualmente, seu entorno. O EasyCFD, por outro lado, procede apenas a uma simulação plana da ação do vento sobre uma determinada geometria (Fig. 12b), o intercâmbio de dados com o Rhinoceros é bem mais restrito e sua interface gráfica não é tão simples e intuitiva quanto o Scan-and-Solve (Figura 16).

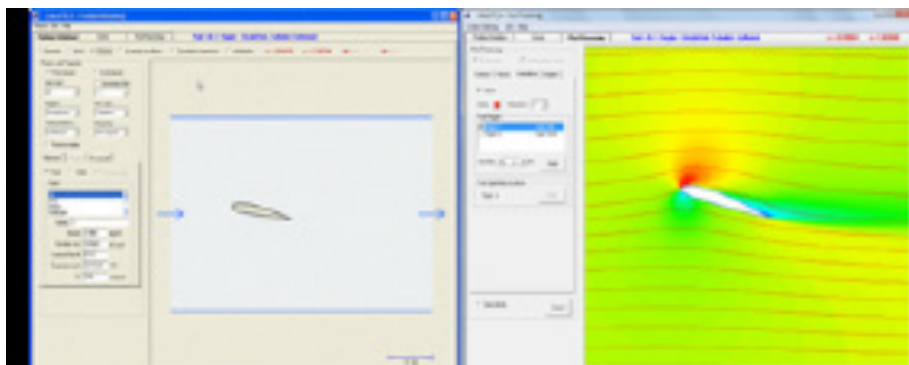


Figura 16: Interface gráfica do EasyCFD e ações de vento
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

No easyCDF o usuário deve importar um arquivo DXF com o contorno de seu edifício, que neste exercício foi extraído do modelo geométrico parametrizável gerado em Rhinoceros, e então informar as características e a intensidade do fluxo de vento e interpretar os valores de força ou pressão sobre as superfícies. Uma vez obtidas estas grandezas, é possível informá-las ao Scan-And-Solve para proceder à análise estrutural do modelo do edifício. O objetivo deste exercício foi, a partir das respostas forne-

cidas pelos programas de simulação, minimizar o efeito da ação de vento sobre a estrutura, pelo monitoramento dos deslocamentos e das tensões de van Mises. Foram sugeridas cinco estratégias básicas para mitigação destes efeitos (Figura 17): redução contínua da seção transversal ao longo da altura; redução discreta de seção transversal ao longo da altura (escalonamento); adoção de vértices arredondados entre panos de fachada; adoção de grandes aberturas transversais; torção do edifício ao longo da altura.

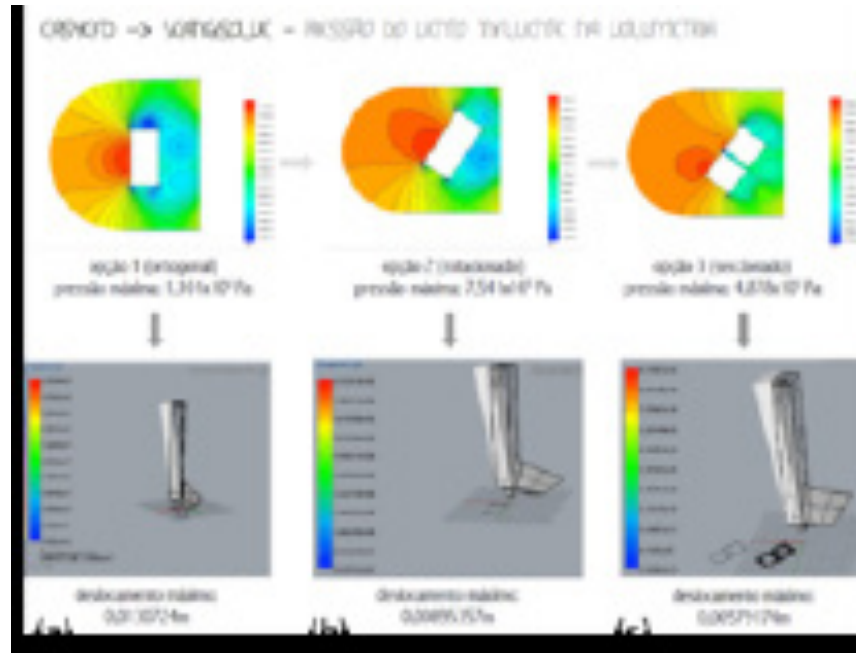


Figura 17: Estudos de interação fluido-estrutura (elaborado por estudantes da disciplina)
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

É preciso enfatizar que estas ferramentas representam, de maneira simplificada e potencialmente imprecisa, suas congêneres mais robustas de simulação em escritórios de engenharia especializados. Estas características não invalidam este desafio do ponto de vista didático, enquanto primeira aproximação ao uso de aplicativos para o estudo de interação fluido-estrutura.

Na terceira etapa, os alunos passaram a projetar um sistema para os edifícios que estavam sendo desenvolvidos em duplas, com acompanhamento quinzenal do especialista em estruturas. Para melhor compreender a estabilidade de suas estruturas, eles foram estimulados a produzir modelos físicos de seus elementos estruturais (Figura 18). O projeto de edifícios altos baseado apenas em tabelas constitui uma boa estratégia para a assimilação de critérios lógicos e desenvolvimento da intuição estrutural, mas é preciso aceitar que tabelas tratam de informações simplificadas e, como tal, permitem apenas decisões com o mesmo grau de limitação. Uma das principais vantagens oferecidas pelos softwares robustos de simulação é, justamente, fornecer informações para o projetista com mais precisão do que as tabelas poderiam oferecer ou mesmo para situações inovadoras, para as quais não há informação precedente em manuais. As ferramentas computacionais disponibilizadas permitiram aos estudantes lidar com um volume de dados maior e fazer explorações fora da zona de conforto que o exercício anterior oferecia. Obviamente, quanto mais distante uma solução formal se afasta de concepções para as quais existe conhecimento acumulado, mais complexas se tornam as interações que devem ser previstas em uma situação real de projeto a fim de garantir a segurança da edificação, o que nem sempre é possível prever sem uma grande equipe de especialistas. Como já apontado anteriormente, o objetivo desta disciplina foi apresentar aos estudantes esta metodologia avançada de projeto, ao invés de prepará-los para substituir equipes inteiras.

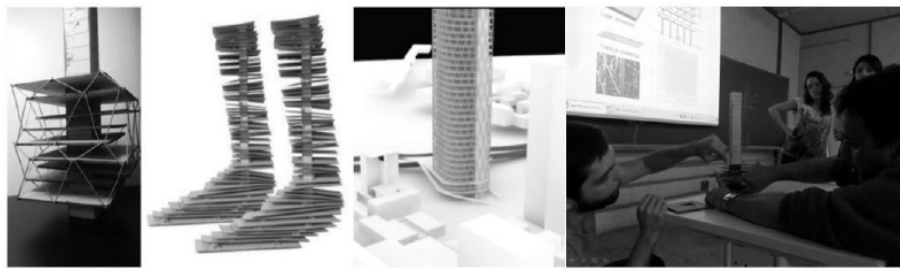


Figura 18: Concepções estruturais de estudantes, na terceira etapa do desenvolvimento estrutural, e discussão a partir de modelo físico de elemento estrutural de um projeto
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

Quando os estudantes concebem uma edificação com programa funcional, priorizando a intencionalidade estética e fazendo uso de ferramentas CAD com suporte a modelagem geométrica parametrizável, nota-se que o uso de malhas reguladoras como elemento generativo tende a ser ignorado, bem como as relações paramétricas entre os elementos estruturais. Isto não significa que estes elementos não sejam empregados como meio de expressão, pois diversos dos sistemas de fachada desenvolvidos recorrem às estruturas geradas algoritmicamente onde a estrutura perimetral é mantida visível a partir do exterior. A intencionalidade estética implícita a quase todas as soluções guarda em comum o desejo de se afastar de qualquer solução pré-existente. Este desejo de originalidade é, em geral, restrito à fachada, pois no interior das edificações, onde a estrutura não é aparente, os princípios de pré-dimensionamento foram, via de regra, aplicados sem maiores complicações. Quando as soluções estruturais não estavam previstas nas restrições originais, foram atendidas por tabelas complementares (REBELLO, 2000).

Os desafios em relação à previsão do desempenho mecânico são maiores no comportamento global da estrutura do que no pré-dimensionamento de elementos isolados. Isto se deve tanto à opção por formas incomuns, para as quais não é possível prever os efeitos da ação de vento segundo as normas brasileira quanto pela opção por sistemas estruturais criativos, onde a interação entre o núcleo rígido e a estrutura perimetral sob a ação das diversas situações de carregamento não são intuídas facilmente. Este são exemplos típicos de soluções nas quais, em uma situação real de projeto, haveria necessidade de investigação com o emprego de programas robustos de simulação.

DETALHAMENTO

A última parte da disciplina consistiu na introdução, por meio de uma aula expositiva, de conceitos sobre o detalhamento de edifícios sob os pontos de vista técnico e teórico e de sua relação com a indústria de ponta.

Para as questões técnicas, foi utilizado o livro de Allen e Rand (1993), que é organizado em três partes: função, construtibilidade e estética, inspiradas pelas categorias de Vitruvius *utilitas*, *firmitas* e *venustas*. A primeira parte do livro inclui conceitos relacionados ao correto funcionamento do edifício, tais como proteção contra as intempéries, fluxo de ar, entrada e perda de calor, transmissão de som e a passagem das instalações elétrica, hidráulica e de ventilação. A segunda parte, construtibilidade, refere-se à montagem, tolerâncias, manutenção, durabilidade e utilização eficiente dos recursos na construção. A terceira parte, Estética, mostra como decisões projetuais de detalhamento podem influenciar na maneira como o edifício é interpretado.

Embora este livro dê maior importância aos aspectos funcionais e construtivos de detalhamento, os autores entendem o processo de detalhar um edifício como uma forma de comunicar ideias. Outra questão importante que está presente em toda a obra de Allen e Rand (1993) é a sustentabilidade. Os autores ressaltam a importância de um bom detalhamento para reduzir o consumo de energia por meio, por exemplo, de isolamento térmico, barreiras térmicas e vidro duplo, ou da utilização do conceito de inércia térmica, dependendo das características do clima local. Eles também nos lembram a necessidade do uso de materiais renováveis, da redução do desperdício

e da compreensão do ciclo de vida dos materiais de construção, sugerindo a utilização de materiais recicláveis para peças que têm uma vida útil mais curta, os quais deverão ser substituídos periodicamente.

Para uma interpretação teórica do detalhamento arquitetônico, o autor Edward Ford foi utilizado como referência. Poucos autores analisaram especificamente o detalhamento arquitetônico como uma fonte de discussão teórica. Ford, arquiteto praticante e professor da Universidade de Virgínia, é um deles. Ele é o autor, entre outros livros, de *The details of modern architecture* (1990), *The Details of Modern Architecture: Volume 2* (2003), e *The Architectural Detail* (2011).

Neste último livro, Ford propõe uma categorização dos detalhes arquitetônicos de acordo com o seu propósito retórico no prédio. Um detalhe pode dizer ao observador como o edifício foi construído ou pode negar completamente qualquer ornamentação. Um canto do Alumni Memorial Hall no IIT (Chicago, 1946) desenhado por Mies van der Rohe é apresentado por Ford como um exemplo de como o detalhe pode ter um significado importante na leitura da obra. Embora as colunas de aço estejam cobertas por concreto, por razões de segurança, o concreto, por sua vez, foi revestido com uma chapa de aço para fingir que a estrutura metálica estava aparente, por razões retóricas. Rem Koolhaas, por outro lado, deliberadamente faz seus edifícios parecerem não ter detalhes, a fim de negar qualquer ornamentação. No que diz respeito a sua relação com o todo, um detalhe pode reproduzir a forma geral de construção, ou pode ter suas próprias regras e propósitos. As casas de Frank Lloyd Wright ilustram o que Ford chama de “detalhe como motivo”. O detalhe é uma miniatura da casa. Outros arquitetos fazer o que Ford chama de “detalhe autônomo”. As maçanetas das portas de algumas obras de Alvar Aalto, por exemplo, não estão relacionadas com a forma geral de construção, encaixando-se no que Ford chama de detalhe subversivo.

Mas Ford acredita que a essência da arquitetura estaria no representação de conexões, o que ele chama “detail as joint”. Ele diz que esta é a maneira como os arquitetos podem expressar grandes intenções. No edifício da Bolsa de Amsterdam, de Beurs van Berlage (1903), por exemplo, a essência está nas ligações entre as paredes de tijolos e a estrutura de aço. Foi importante salientar esta conexão em um momento de transição entre a antiga técnica construtiva de paredes portantes e as novas estruturas de ferro independentes. Ford (2011) demonstra uma preocupação com a perfeição dimensional permitida pela fabricação digital, e teme que isso poderia significar o fim do detalhe. Ele diz que a conexão está fora de moda no mundo contemporâneo, e que estaríamos entrando em uma era de tolerância dimensional zero. Essa discussão sobre o impacto das novas tecnologias de fabricação no detalhamento arquitetônico também é apresentada por Celani (2014) em *The seven myths in architectural detailing that are changing in the digital age*.

Uma outra referência bibliográfica da disciplina, o livro *Fabricating Architecture*, de Kieran e Timberlake (2004), questiona o atraso nos processos de produção do edifício quando comparados aos das indústrias automobilística e aeroespacial. Os autores associam a qualidade e eficiência dessas indústrias ao uso do sistema de “sub-assemblies”, e sugerem um detalhamento do edifício que permita agregar grandes componentes montados em indústrias, desde partes da fachada até banheiros e cozinhas inteiros.

A partir desses elementos técnicos e teóricos e de visita a uma indústria que fabrica banheiros prontos as equipes foram instigadas a pensar no detalhamento de um elemento do edifício levando em consideração seu papel na leitura da obra arquitetônica, sua articulação com outros sistemas (por exemplo, o estrutural), as questões construtivas e o processo de fabricação com equipamentos da era pós-industrial. Foi requisitado aos alunos que desenvolvessem maquetes em escala ampliada dos detalhes desenvolvidos, bem como modelos geométricos digitais explodidos, mostrando a construção desses detalhes e sua articulação com outros elementos (Figura 19).

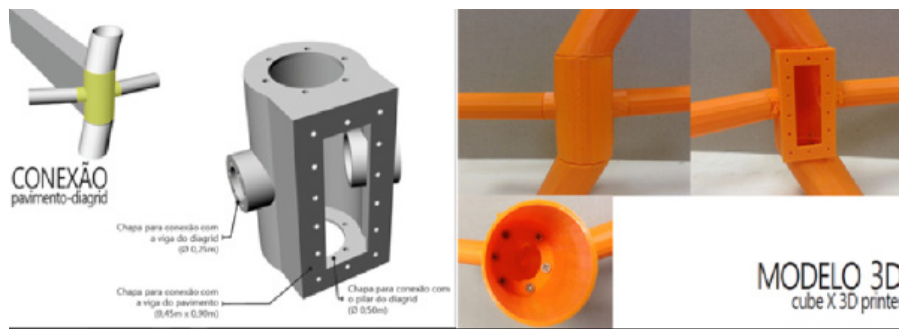


Figura 19: Exemplo de detalhe desenvolvido (modelo geométrico digital e físico), desenvolvido pelos alunos Pedro Langella Testolino e Tais Sineiro Herig. **Fonte:** Desenvolvido pelos alunos da disciplina

Alguns alunos identificaram que o desenvolvimento de certos detalhes construtivos poderia ter se dado até mesmo antes da definição de outras questões do edifício, como o partido estrutural. No entanto, como dito acima, na disciplina foi necessário estabelecer uma ordem na qual os diferentes aspectos iam sendo introduzidos e discutidos, por uma questão didática, embora se saiba que no cotidiano do escritório de arquitetura todas essas questões precisam ser desenvolvidas simultaneamente.

RESULTADOS

Os resultados obtidos nesta disciplina demonstram um nível de integração entre os diferentes aspectos do projeto raramente alcançado nas demais matérias de atelier. A apresentação das maquetes ao longo de todo o processo de projeto permitiu que fossem discutidas questões relativas à implantação urbana e aos objetivos das estratégias projetuais adotadas, especialmente aquelas relativas ao partido estrutural (Figura 20). A adoção dos programas acima mencionados permitiu que os alunos produzissem inúmeros estudos como se vê na Figura 21. Mais que isso, as alternativas geradas foram baseadas em evidências e não apenas em meras suposições.



Figura 20: Maquete produzida com impressora 3D. **Fonte:** Desenvolvido pelos alunos da disciplina

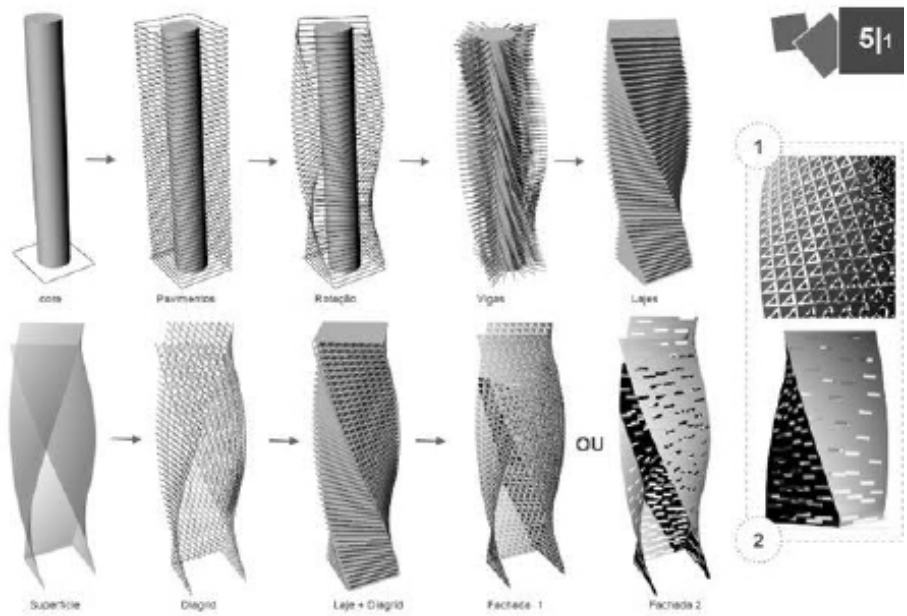


Figura 21: Estudos das alunas Laura Rodrigues Parisi e Rafaela Mayumi de Almeida Silva para a escolha do sistema estrutural e fachadas, visando melhor aproveitamento da iluminação natural e ventilação
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

Os projetos desenvolvidos espelham os conceitos introduzidos sobre edifícios energeticamente eficientes, com redução do consumo de energia por meio da iluminação e ventilação naturais, o que é demonstrado nos estudos presentes na Figura 22.

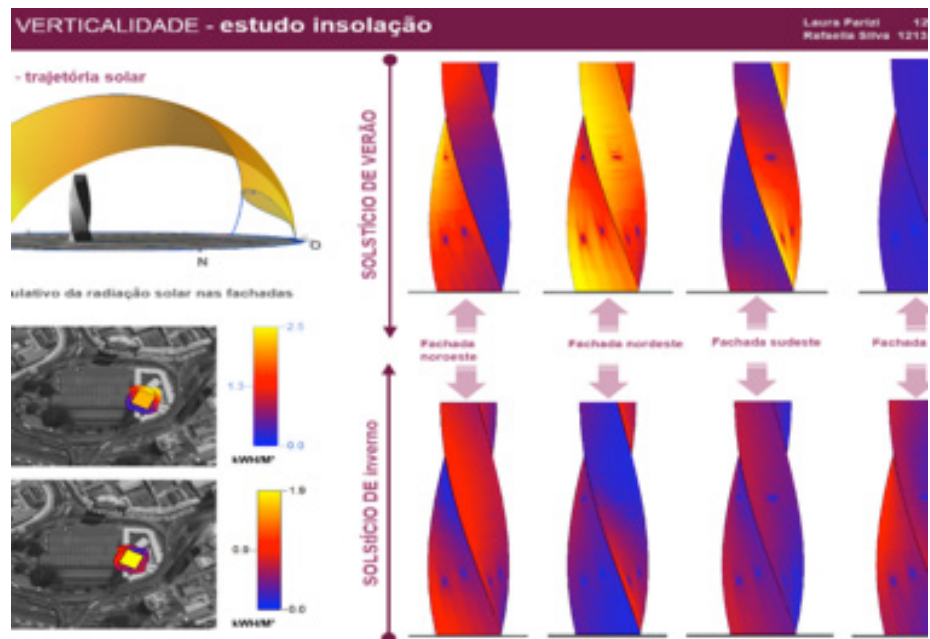


Figura 21: Estudos das alunas Laura Rodrigues Parisi e Rafaela Mayumi de Almeida Silva relativo ao ganho térmico e ao impacto urbano relativo à implantação de um edifício desse porte
Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

O projeto final de uma das equipes é apresentado na Figura 23. A avaliação da disciplina junto aos alunos foi feita por meio de uma discussão em sala de aula, em que se solicitou que eles apontassem os aspectos positivos e negativos. Praticamente todos os comentários foram positivos, com exceção apenas de algumas questões pontuais, como a ordem de apresentação de alguns temas ou o tempo destinado aos atendimentos individuais. Essas sugestões serão incorporadas nas próximas instâncias da disciplina.



Figura 22 - Projeto final das alunas Laura Rodrigues Parisi e Rafaella Mayumi de Almeida Silv

Fonte: Desenvolvido pelos alunos da disciplina

DISCUSSÃO

A disciplina aqui descrita buscou desenvolver nos alunos a capacidade de dialogar com especialistas de diferentes áreas, articulando as decisões sobre diferentes aspectos do edifício, de maneira análoga ao que é feito atualmente em grandes escritórios de arquitetura que dispõem de equipes multi-disciplinares, como ARUP e Foster and Partners. Esses escritórios criaram, nos últimos anos, grupos especiais para lidar com a inserção das novas tecnologias no processo de projeto. Um dos casos mais conhecidos é o Specialist Modelling Group, que combina especialistas em análise e simulação ambiental, modelagem paramétrica e fabricação digital de formas complexas para garantir que os projetos do escritório de Foster sejam sempre desenvolvidos de maneira integrada, como descrito em sua página principal:

The group's projects range from research into building lunar habitations to the development of a new type of ceiling system. Within the practice, their use of cutting-edge digital tools has been a catalyst for the adoption of new technologies, including a rapid-prototyping facility.

Os resultados obtidos na disciplina aqui descrita devem-se, em grande parte, ao fato de ela ter tido, como instrutores, quatro profissionais com perfis complementares: projeto de arquitetura e urbanismo, tecnologia da arquitetura, sistemas estruturais e modelagem paramétrica e algorítmica. Esses profissionais trabalharam juntos ao longo de todo o semestre, assistindo às aulas uns dos outros, comentando os trabalhos dos alunos conjuntamente, enfim, aprendendo também uns com os outros, diferentemente do

que ocorre em muitos casos em que os professores simplesmente dividem a carga horária, sem tomar conhecimento do que os outros estão ensinando. Aos conhecimentos dos quatro instrutores da disciplina, foram somados os conhecimentos dos palestrantes convidados em desempenho ambiental (Professora Dra. Joana Carla Gonçalves, da FAU-USP) e fabricação digital (Peter Mehrrens, da Bemo Systems), além de uma disciplina oferecida em paralelo sobre o planejamento de obras (Prof. Dr. Flávio Picchi). Como resultado, foi possível colocar em prática uma metodologia alternativa de ensino e de projeto.

Obviamente trata-se de uma situação muito especial, em que 19 alunos apenas tiveram a atenção integral, dentro e fora da sala de aula, de quatro instrutores ao longo de um semestre, uma relação impensável no caso de escolas privadas ou mesmo de algumas escolas públicas. Contudo, essa disponibilidade de instrutores é, na verdade, resultado da integração entre o ensino e a pesquisa, e entre os cursos de graduação e de pós-graduação na Universidade, uma vez que um dos instrutores é um pesquisador em nível de pós-doutorado e outro é aluno de mestrado realizando seu estágio obrigatório em docência. A disciplina foi conduzida como um experimento científico de introdução de novas tecnologias no ensino do projeto de arquitetura, especificamente no projeto de edifícios altos, permitindo que todos os participantes se beneficiassem do processo, e atendendo aos interesses de todos.

A partir das considerações expostas, conclui-se que o ensino de arquitetura deve incluir, além de uma exímia formação técnica e de bases conceituais sólidas, as ferramentas para que o aluno consiga estabelecer relações entre as diversas áreas do conhecimento. Deve também fornecer instrumentos para que ele realize constantes reavaliações conceituais, projetuais e profissionais, de forma a negar padrões e ser capaz de propor inovações. Esperamos, com este relato, demonstrar que o ensino de graduação pode ser uma oportunidade para colocar em prática e aperfeiçoar novos métodos de projeto, além de se constituir em um verdadeiro laboratório de pesquisas científicas. Finalmente, se a pretensão é a construção de cidades melhores e a formação de arquitetos-cidadãos, que entendam a complexidade do mundo atual e que compreendam criatividade como um processo coletivo, é necessário que ocorra uma mudança no modo de ensinar. Se os propósitos forem esses, os docentes deverão saber lidar com a incerteza, ao invés de insistir em procedimentos pré-estabelecidos, propondo novas estratégias de ensino, que possam resultar em soluções inesperadas, tal qual a vida atual nos exige.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Professora Joana Carla Gonçalves e ao arquiteto Peter Mehrrens pelas palestras proferidas, e aos estudantes que participaram da experiência acima relatada por seu entusiasmo e dedicação: Alessandra de Moraes Sanches, Anne Mayara Almeida Capelo, Bruno Geraldi Martins, Camila Midori Yoshida, Carolina Sanae de Aurélio Penteado, Fernanda Bernava Martinez, Guilherme da Silva Carvalho, Laiz Canevassi dos Santos, Laura Rodrigues Parizi, Lucas Ariel Gomes, Luciana Vieira Ancelmi, Maria José Reche Domingo, Pedro Langella Testolino, Rafaella Mayumi de Almeida Silva, Raíssa Armelin Lopes, Ruy George Otoni Vieira Sobrinho, Saira Lorenna Diaz Rojas, Taís Sineiro Herig, Yasmin Pinheiro Borba. Victor Calixto agradece à CAPES por sua bolsa de mestrado. Juarez Moara Santos Franco agradece à FAPESP por sua bolsa de pós-doutorado (Processo14/14957-8).

¹Os projetos do grupo vão desde a pesquisa sobre a construção de habitações na Lua até o desenvolvimento de um novo tipo de sistema de forro. Na prática profissional, seu uso de ferramentas digitais avançadas tem sido o catalisador para a adoção de novas tecnologias, incluindo um laboratório de prototipagem rápida. Fonte: <http://www.fosterandpartners.com/design-services/research/specialist-modelling-group/> Dentre estes, 2 eram intercambistas. O pequeno número de alunos nesta disciplina obrigatória se deve ao fato de muitos

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Edward; RAND, Patrick. **Architectural Detailing: Function-Constructibility-Aesthetics**. John Wiley and Sons, 2009.
- ARANTES, Otilia Beatriz Fiori. **Uma fronteira no céu**. In: Chai-na. 2011.
- BAYAZIT, Nigan. Investigating design: A review of forty years of design research. **Design issues**, v. 20, n. 1, p. 16-29, 2004. Disponível em: <<http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/074793604772933739#.VM51IWjF-AU>>. Acesso em: 29 janeiro 2016.
- BEIRÃO, José Nuno; MENDES, Leticia Teixeira; CELANI, Gabriela. O uso do CIM (city information modeling) para geração de implantação em conjuntos de habitação de interesse social: uma experiência de ensino. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 10, n. 2, p. 101-112, 2015.
- BLANC, Alan; MCEVOY, Michael; PLANK, Roger. **Architecture and construction in steel**. Taylor & Francis, 1993.
- CELANI, Maria Gabriela C.; GIACAGLIA, Marcelo E.; KOWALTOWSKI, Doris CCK. CAD-o lado criativo duas experiências educacionais visando mudar a forma como estudantes de arquitetura usam o CAD. Pós. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, n. 14, p. 66-79, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v0i14p66-79>
- CELANI, Gabriela. The seven myths in architectural detailing that are changing in the digital age. **Revista A+ C**, v. 5, n. 5, 2014. Disponível em: <http://www.arquiteturaycultura.cl/index/images/A+C_5_WEB.pdf>.
- CHOI, Hi Sun et al. Outrigger design for high-rise buildings. **Council on Tall Buildings and Urban Habitat**, Chicago, 2012.
- CROSS, Nigel. Forty years of design research. **Design studies**, v. 28, n. 1, p. 1-4, 2007.
- DUARTE, José P.; CELANI, Gabriela; PUPO, Regiane. Inserting computational technologies in architectural curricula. the press. In: Gu, N.; Wang, X.. (Org.). **Computational Design Methods and Technologies: Applications in CAD, CAM and CAE Education**. Hershey: IGI-Global, 2011.
- ENGEL, Heino. **Sistemas de estruturas**. Editorial Gustavo Gili, 2000.
- FORD, Edward R. **The architectural detail**. In: Proceedings of the 29th eCAADe Conference. Ljubljana. p.412-420, 2011.
- GONÇALVES, Joana Carla Soares. **The environmental performance of tall buildings**. Routledge, 2010.
- GROBMAN, Yasha; NEUMAN, Eran. **Performatism: form and performance in digital architecture**. Routledge, 2011.
- KIERAN, Stephen; TIMBERLAKE, James. **Refabricating architecture**. McGraw-Hill, 2004.
- MENDES, Leticia; CELANI, Gabriela; BEIRÃO, José. Meta-PREVI Grammar. **International Journal of Architectural Computing**, v. 12, n. 4, p. 459-476, 2014.
- MOUSSAVI, Farshid; LÓPEZ, Daniel; LÓPEZ, Daniel. **The function of form**. Barcelona: Actar, 2009.
- MORIN, Edgar. **A cabeça bem-feita: repensar a reforma, reformar o pensamento**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.
- OXMAN, Rivka. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. **Design Studies**, v. 29, n. 2, p. 99-120, 2008.
- OXMAN, Rivka. **Digital design didactics: re-thinking design theory, methodology and pedagogy**. 2012. In: STEINO, Nicolai; ÖZKAR, Mine, Org. **Shaping design teaching: explorations into the teaching of form**. Aalborg: Aalborg University Press, 2012.

PETERS, B, PETERS, T. **Inside Smart-geometry. Chichester:** Wiley and Sons, 2013.

PUPO, Regiane Trevisan ; PINHEIRO, Érica ; MENDES, Gelly ; CELANI, M. G. C. ; KOWALTOWSKI, Doris K. . A Design Teaching Method using Shape Grammar. **Graf & Tec** (Florianópolis), 2008.

PUPO, Regiane, PINHEIRO, Érica; MENDES, Gelly; KOWALTOWSKY, Doris; CELANI, Gabriela. **A design teaching method using shape grammars.** In: Proc. 7th Int. Conf. Graphics Engineering for Arts and Design. Florianópolis. p. 1-10, 2008.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. A

concepção estrutural e a arquitetura. Zigurate Editora, 2000.

SCHUMACHER, Patrik. Parametricism as style-Parametricist manifesto. 11th Architecture Biennale, Venice, p. 17-20, 2008.

SEDREZ, Maycon; CELANI, Gabriela. Ensino de projeto arquitetônico com a inclusão de novas tecnologias: uma abordagem pedagógica contemporânea. Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP, v. 21, n. 35, p. 78-97, 2014.

Correspondência

Ana Maria Reis de Goes Monteiro, nagoesmonteiro@gmail.com

Gabriela Celani, celani@fec.unicamp.br

Juarez Moara Santos Franco, jfranco@fec.unicamp.br

Victor Calixto, arq.victorcalixto@gmail.com