

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Henrique Lang

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO BIM NO PROCESSO DE PROJETO E DE
CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES EM MADEIRA**

Porto Alegre
Dezembro 2019

HENRIQUE LANG

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO BIM NO PROCESSO DE PROJETO E DE
CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES EM MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Cristiane Sardin Padilla de Oliveira

Porto Alegre
Dezembro 2019

HENRIQUE LANG

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO BIM NO PROCESSO DE PROJETO E DE
CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES EM MADEIRA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Cristiane Sardin Padilla de Oliveira
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Miguel Aloysio Sattler
Ph.D. em Building Science pela University of Sheffield (Inglaterra)

Arq^a Manoela Conte (UFRGS)
Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à República Federativa do Brasil e à sociedade brasileira por financiarem meu ensino em uma Universidade pública, gratuita e de qualidade. Em um país com oportunidades tão desiguais, ter acesso ao ensino superior é um privilégio. Espero poder retornar através do conhecimento adquirido o investimento em mim depositado ao longo da minha graduação.

Aos meus pais que sempre acreditaram no meu potencial e não mediram esforços para apoiar meus estudos. Cada palavra aqui depositada não teria sido possível sem o amparo de vocês. Seus exemplos e ensinamentos me moldaram como pessoa, serei eternamente grato por tudo que me proporcionaram.

Ao meu irmão, grande arquiteto descalço, sua amizade e companheirismo me aproximaram de uma realidade que mudou minha visão de mundo. Sua formação em arquitetura ao tempo em que me desenvolvia como engenheiro, ampliou minha percepção da profissão e sem isso não teria trilhado o caminho que trilhei.

Aos colegas e amigos que o curso de engenharia me proporcionou: agradeço as amizades verdadeiras forjadas pelas horas de estudo compartilhado, pelas comemorações e as histórias vividas durante esses anos. O apoio mútuo, as brincadeiras e a parceria de vocês deixaram mais leve o peso dos trabalhos das provas e dos finais de semestre.

Agradeço ao Mova-c e aos Engenheiros Sem Fronteiras, grupos interdisciplinares que me proporcionaram muitos momentos e oportunidades que me marcaram como pessoa. Me fizeram perceber a importância da pluralidade e o quanto podemos fazer diferença na sociedade através do nosso papel como cidadãos.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, aos servidores e ao corpo docente do curso de Engenharia Civil: agradeço por todos os ensinamentos e oportunidades que me proporcionaram. Em especial, a minha orientadora, professora Dra. Cristiane Sardin, que acreditou na importância da minha pesquisa e esteve disposta a me auxiliar, sempre com muita atenção e compreensão.

Agradeço pelas oportunidades de estágio que tive em minha caminhada, sem elas eu seria apenas meio engenheiro, todas foram essenciais em minha formação. Em especial, gostaria de agradecer aos colegas da Ecoprest Engenharia, pela amizade e pelo incentivo dado nos últimos semestres da minha graduação.

Por fim, agradeço a Leticia, seu apoio foi crucial para que este trabalho tenha sido desenvolvido. Agradeço por acreditar em mim quando eu mesmo não o fazia. Obrigado pelo companheirismo, pela amizade e carinho, sou muito grato por nossas vidas terem se cruzado. Tua força de vontade e dedicação me deram muita inspiração nessa caminhada. Esse momento de tanto crescimento se mistura com a nossa história, como um catalisador que impulsiona o término de um ciclo para que outro possa começar.

RESUMO

A preocupação com as mudanças climáticas e com a escassez dos recursos naturais vem trazendo à tona pesquisas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias renováveis. Neste contexto, a madeira é um material construtivo sustentável, que pode ser uma alternativa aos materiais convencionais no desenvolvimento sustentável dos centros urbanos. A madeira, como material construtivo, apresenta características ambientais relevantes, a começar por ser um material sustentável, de fonte renovável e de baixo consumo energético para a sua produção. Produtos industriais derivados de madeira são capazes de minimizar defeitos naturais do material e possibilitam a criação de peças estruturais de alta resistência. A utilização de produtos engenheirados de madeira, como a madeira laminada colada cruzada (CLT), a madeira laminada colada (MLC), estão possibilitando a construção de edifícios de múltiplos pavimentos em madeira. Internacionalmente, o crescente número de edificações em madeira mostra a viabilidade deste método construtivo. A tendência é de que este método de construção continue ganhando maior atenção do setor construtivo, pelos seus benefícios e por representar uma alternativa sustentável para expansão urbana. Apesar das qualidades destacadas, o uso da madeira traz consigo desafios e exigências, desde as fases iniciais de projeto. A utilização de novas tecnologias e métodos projetuais é imprescindível para o sucesso da madeira em edificações de maior porte. O BIM (*Building Information Modeling*), por ser uma metodologia de projetos multidisciplinares e integrados, que se utiliza de modelos virtuais para analisar o ciclo de vida das edificações, apresenta ferramentas que podem auxiliar na viabilização de construções com madeira, visto que este tipo de construção, por ser um sistema inovador pré-fabricado, necessita maior planejamento e coordenação. Este artigo tem como objetivo analisar a utilização do BIM nas construções de edificações de múltiplos pavimentos em madeira e demonstrar como este processo de gestão da informação pode auxiliar na concepção, coordenação, planejamento, produção e construção de prédios em madeira. Este trabalho apresenta uma análise documental do processo de projeto e construção do edifício *Brock Commons*, de 18 andares, construído pela Universidade de *British Columbia*, na cidade de Vancouver, no Canadá. Nele é analisado como o BIM pode influenciar neste tipo de edificação. Apresentando o processo de projeto e construção, são comentados os benefícios que o BIM pode gerar na cadeia produtiva de edificações de múltiplos pavimentos, que utilizam produtos engenheirados de madeira. Como resultados alcançados, tem-se uma maior compreensão da influência do uso dos modelos de informação da construção, na viabilização de tais edificações. Ainda, este trabalho contribui na discussão da real aplicação de sistemas construtivos sustentáveis e inovadores, que podem mitigar os impactos ambientais do setor construtivo na densificação das cidades.

Palavras-chave: Madeira engenheirada. Madeira laminada colada. Madeira laminada cruzada. Building Information Modeling. Edificações de múltiplos pavimentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico Esforço x Tempo.....	15
Figura 2 – Diagrama comparativo entre projetos tradicionais e integrados.....	16
Figura 3 – Modelo virtual representando estrutura híbrida do <i>Brock Commons</i> : a) Estrutura híbrida completa b) Conexões metálicas c) Estrutura de madeira d) Estrutura de concreto armado	17
Figura 4 – Representação da sequência construtiva dos acabamentos do <i>Brock Commons</i> : a) estrutura montada b) contrapiso e proteção superior instaladas c) acabamentos executados com camadas de gesso instaladas	18
Figura 5 – Diagrama do fluxo de projeto	20
Figura 6 – Levantamento de quantitativos, a partir do modelo VDC, com planilha de informações retiradas do modelo.....	20
Figura 7 – Análise estrutural: a) Modelo numérico b) deformação em x c) deformação em y d) Torção.....	21
Figura 8 – Comparativo do modelo VDC e execução.....	22
Figura 9 – Modelo VDC com diferentes sistemas integrados	23
Figura 10 – Comparativo do modelo, documentação e executado.....	24
Figura 11 – Planejamento 4D: entrega e içamento da estrutura de madeira	24

LISTA DE SIGLAS

AIA	<i>American Institute of Architects</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CLT	<i>Cross Laminated Timber</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CIRS	<i>Centre for Interactive Research on Sustainability</i>
CURT	<i>Construction Users Roundtable</i>
DLT	<i>Dowel-laminated Timber</i>
FPI	<i>Forest Innovation Program</i>
ICC	<i>International Construction Code</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
LVL	<i>Laminated Veneer Lumber</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
NLT	<i>Nail-laminated Timber</i>
MLC	<i>Madeira Laminada Colada</i>
PSL	<i>Parallel Strand Lumber</i>
RFEM	<i>Rigid Finite Element Method</i>
UFRGS	<i>Universidade Federal do Rio Grande do Sul</i>
UBC	<i>University of British Columbia</i>
VDC	<i>Virtual Design and Construction</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Madeira	12
2.2 BIM	14
3 ANÁLISE DA EDIFICAÇÃO.....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO BIM NO PROCESSO DE PROJETO E DE CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES EM MADEIRA

RESUMO

A preocupação com as mudanças climáticas e com a escassez dos recursos naturais vem incentivando o desenvolvimento de tecnologias renováveis. Internacionalmente, o crescente número de edificações em madeira mostra que utilização de produtos engenheirados de madeira, como a madeira laminada colada cruzada (CLT) e a madeira laminada colada (MLC), pode ser uma alternativa aos materiais convencionais no crescimento sustentável dos centros urbanos. O BIM (*Building Information Modeling*) apresenta ferramentas que podem auxiliar na viabilização de construções com madeira, visto que esta, por ser um sistema inovador pré-fabricado, necessita maior planejamento e coordenação. Este artigo tem como objetivo analisar a utilização do BIM nas construções de edificações de múltiplos pavimentos em madeira e demonstrar, através de uma análise documental, como este processo de gestão da informação pode auxiliar na concepção, coordenação, planejamento, produção e construção de prédios em madeira. Como resultados alcançados, tem-se uma maior compreensão da influência do uso dos modelos de informação da construção, na viabilização de tais edificações. Ainda, este trabalho contribui na discussão da real aplicação de sistemas construtivos sustentáveis e inovadores, que podem mitigar os impactos ambientais do setor construtivo na densificação das cidades.

Palavras-chave: Madeira engenheirada. Madeira laminada colada. Madeira laminada cruzada. Building Information Modeling. Edificações de múltiplos pavimentos.

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF BIM ON THE DESIGN PROCESS AND CONSTRUCTION OF WOODEN BUILDINGS

ABSTRACT

Concern about climate change and the scarcity of natural resources has been encouraging the development of renewable technologies. Internationally, the increasing number of timber buildings shows that the use of engineered wood products, such as cross laminated timber (CLT); and glued laminated timber (MLC) can be alternatives to conventional materials in the sustainable growth of urban centers. BIM (Building Information Modeling) presents tools that can assist in the viabilization of timber buildings, since this type of construction is an innovative prefabricated system that needs more planning and coordination. This paper aims to analyze the use of BIM in the construction of multi-storey wooden buildings. A case study illustrates how this information management process can assist in the design, coordination, planning, production and construction of timber buildings. As results, there is a greater understanding of the contribution on the use of building information models in the feasibility of such buildings. Moreover, this work contributes to the discussion of how sustainable and innovative building systems can mitigate the environmental impacts of the construction sector on the densification of cities.

Key words: Engineered wood. Glued laminated timber. Cross laminated timber. Building Information Modeling. Multi-storey buildings.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as mudanças climáticas e com a escassez dos recursos naturais vem trazendo à tona pesquisas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias renováveis. Essas mudanças são causadas por muitos fatores; dentre eles, a massiva emissão de CO₂ geradas pela indústria. No âmbito da construção, podemos destacar o uso do concreto e do aço, como materiais muito consumidos pelo setor e que liberam grandes quantidades de CO₂ na atmosfera. Além de necessitarem grandes quantidades de energia para sua extração e processamento, as cadeias produtivas do aço e do concreto contribuem com o desmatamento, erosão e poluição do ar e da água. Suas fontes de matéria-prima são recursos não renováveis e a utilização dos mesmos, como base primordial da construção civil, pode comprometer o desenvolvimento de futuras gerações.

Para John *et al.* (2002), maximizar o uso de energia e material renovável consiste em uma ferramenta para reduzir os impactos ambientais, ainda, neste contexto, energias renováveis e limpas poderão auxiliar na mitigação dos problemas de aquecimento global da atmosfera e de chuvas ácidas. O autor ainda comenta que a única fonte de materiais de construção renováveis são aqueles provenientes dos vegetais: madeira, fibras, etc. E para a maior utilização dos mesmos na construção, seria necessário grandes transformações industriais.

Neste contexto, produtos engenheirados de madeira, como a madeira laminada cruzada, conhecida como CLT (*Cross Laminated Timber*), e a madeira laminada colada (MLC), vêm possibilitando novas aplicações de materiais de origem renovável na construção. Estas técnicas são caracterizadas por usarem peças de madeira com pequenas dimensões, para criar elementos estruturais capazes de sustentar grandes vãos. Dessa forma, esses materiais vêm tornando possível a construção de edifícios com madeira, de múltiplos pavimentos (BOWYER *et al.*, 2016). Além da redução dos impactos ambientais, os produtos engenheirados de madeira proporcionam um menor uso da madeira maciça e melhor aproveitamento da matéria-prima, utilizando quase 100% da madeira na sua manufatura (CALIL NETO, 2011).

Diversos países vêm explorando esse tipo de construção e pelo mundo há inúmeros exemplos de edificações explorando a utilização da madeira, para alcançar alturas cada vez mais maiores (BRENEMAN *et al.*, 2019). Segundo Mayo (2015) em muitos lugares, a construção com madeira alcançou o concreto e o aço em termos de industrialização, pré-fabricação e velocidade de montagem.

Em paralelo, novas abordagens projetuais, auxiliadas pela evolução de tecnologias digitais e softwares, vêm se tornando comuns na construção civil. Processos de desenvolvimento de projetos integrados, como a metodologia BIM, representam novas possibilidades para se projetar e construir. Aliando diferentes atores da construção em um ambiente comum e colaborativo, os modelos de informação da construção se tornam peça chave na troca de informações entre diferentes equipes (EASTMAN *et al.*, 2014). O BIM incorpora funções que permitem analisar o ciclo de vida das edificações, modifica os papéis e os relacionamentos das equipes envolvidas e, quando bem implementado, proporciona que processos de projeto e construção sejam feitos de maneira integrada, o que implica em construções de melhor qualidade, com custos e prazos de execução reduzidos (EASTMAN *et al.*, 2014). Essa nova maneira de projetar pode possibilitar a criação de modelos virtuais complexos e extremamente precisos, de forma ágil, que podem representar fidedignamente os sistemas a serem construídos. Desenhos precisos e completos, com detalhamentos minuciosos, são necessários na fabricação de materiais fora do canteiro. Inconsistências, omissões, erros e incertezas podem causar conflitos entre sistemas no canteiro de obras, o que aumentam os custos de maneira significativa. Para a pré-construção em ambiente de fábrica, onde os custos são mais baixos e o controle de qualidade é melhor, é necessário conhecimento prévio das condições exatas da construção (EASTMAN *et al.*, 2014). As construções modernas de madeira, que utilizam

materiais engenheirados, como a CLT e a MLC, apresentam grande sinergia com o BIM, por serem materiais pré-fabricados, os quais necessitam maior planejamento e detalhamento para que o seu emprego possa ser viabilizado. O entendimento claro de como esta técnica construtiva se beneficia do uso de projetos desenvolvidos com a metodologia BIM pode ser um fator que auxiliará na expansão do uso destes materiais, na construção de edificações (STAUB-FRENCH *et al.*, 2018).

Este artigo tem, como objetivo principal, apresentar a expansão do uso de produtos estruturais industrializados de madeira na construção civil, analisando como a metodologia de projetos BIM se encaixa na expansão do uso destes materiais. A metodologia utilizada foi uma análise documental, a partir de relatórios e artigos sobre o processo de projeto e construção do edifício *Brock Commons*, de 18 andares, construído pela Universidade de *British Columbia*, na cidade de Vancouver, no Canadá. A edificação foi projetada e construída utilizando pontos importantes da metodologia BIM e todo o processo foi amplamente documentado e estudado. Este artigo compila observações técnicas e metodológicas com base em tais estudos para analisar a aplicação da metodologia BIM na construção de edificações, de múltiplos pavimentos, em madeira.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Madeira

Usada a milhares de anos, a madeira é um material que teve seu uso desde o começo das civilizações, devido a sua abundância em muitas regiões do planeta, a sua fácil extração e manuseio (CARRASCO, 1984). Sua utilização na construção vai, desde a construção de torres, pontes, passarelas, coberturas, até edificações de pequeno e médio porte. Com o emprego do aço e do concreto nas últimas décadas, tornou-se possível um maior adensamento do tecido urbano, e devido a suas características físicas e construtivas, esses materiais ganharam um grande protagonismo neste processo. Com a larga utilização do aço e do concreto, possibilitou-se a construção em alturas nunca antes vistas na história da humanidade. Neste processo de urbanização densificada, a madeira perdeu espaço para o concreto e o aço, devido às suas limitações construtivas.

O aumento das preocupações relacionadas ao aquecimento global e às mudanças climáticas vem incentivando os esforços internacionais para o desenvolvimento de tecnologias de menor impacto ambiental e que auxiliem no crescimento sustentável das cidades. Neste cenário, a utilização de novos produtos derivados de madeira vem ganhando maior atenção devido ao seu potencial para a redução das emissões de gás efeito estufa (SHIGUE, 2018).

A madeira, como material construtivo, apresenta características ambientais relevantes, a começar por ser um material sustentável, de fonte renovável e de baixo consumo energético para a produção. Estudos ainda apontam que a madeira armazena o CO₂ captado da atmosfera durante seu crescimento, e que o consumo de combustíveis fósseis, na construção de edificações com madeira, é menor que com aço e concreto (MILAJ *et al.*, 2017). Segundo Calil e Dias (1997), a madeira apresenta alta resistência mecânica e um baixo consumo energético para produção, apresentando grandes vantagens ambientais, em comparação ao aço e concreto. Além disso, os autores comentam que a madeira tem baixo peso específico e boa relação entre sua resistência e densidade, chegando a ser 3 vezes maior que a do aço e 10 vezes maior que a do concreto. Isso configura a madeira como um material estrutural leve e de baixo impacto ambiental.

Apesar de ser um material combustível, a madeira possui boa resistência a incêndios, apresentando melhor comportamento que o aço e o concreto, sob temperaturas elevadas. Isso se deve ao fato de a madeira ser um mau condutor de calor: enquanto a parte externa queima, a

parte interna se mantém protegida, mantendo sua capacidade de suporte. Este comportamento do material também faz com que a madeira seja um bom isolante térmico (CALIL; DIAS, 1997).

Embora apresente boas características, a madeira está sujeita à degradação biológica, por agentes xilófagos, como cupins, brocas e fungos. Por ser um material natural, a madeira pode apresentar defeitos, devido ao seu crescimento que interferem nas suas propriedades mecânicas, como nós e fendas (PFEIL *et al.*, 2003). Contudo, o autor aponta que tais particularidades podem ser superadas com a utilização de produtos estruturais de madeira industrializados, onde, no processo de produção, os defeitos normalmente encontrados na madeira serrada são eliminados ou reduzidos, por meio da seleção das peças, secagem e tratamento adequado.

A utilização de produtos engenheirados de madeira garante melhor aproveitamento da matéria prima e elimina defeitos naturais da madeira, possibilitando a criação de grandes estruturas de alta capacidade estrutural. Segundo GUSS (1995), produtos engenheirados de madeira (*engineered wood products*) são materiais criados a partir da junção de partes pequenas de madeira, por um agente agregador. Manninen (2014) aponta a definição do *Forestry Innovation Investment*, que classifica os produtos engenheirados de madeira como elementos ou módulos, constituídos por partes de madeira colada, como, ripas, painéis folheados, fios e fibras, que podem ser utilizados para construir casas, edificações de múltiplos pavimentos, pontes, entre outras estruturas.

Há diversos produtos engenheirados de madeira que podem ser utilizados na construção de estruturas de edificações de múltiplos pavimentos, tais como: madeira laminada cruzada (CLT); madeira laminada colada (MLC); madeira laminada pregada (NLT - *Nail-laminated Timber*); madeira laminada cavilhada (DLT - *Dowel-laminated Timber*); e compostos estruturais, como madeira micro lamelada colada (LVL - *Laminated Veneer Lumber*). Com a utilização destes novos produtos engenheirados de madeira, nas últimas décadas, edificações em madeira de múltiplos pavimentos vêm se tornando possíveis no cenário urbano mundial (BOWYER *et al.*, 2016).

Dentre estes produtos derivados de madeira, a CLT e a MLC são os que mais estão se popularizando. Estes elementos estruturais de madeira são constituídos por lâminas de mesma secção, solidarizadas por meio de adesivo estruturais, aplicados sob pressão. A diferença da MLC para a CLT está na maneira com que são dispostas as lâminas: a primeira, é formada por lâminas coladas em mesma direção; já, a CLT, é formada por camadas em que as lâminas são colocadas justapostas e as camadas são coladas de forma perpendicular, geralmente, com 3 a 7 camadas, variando em número ímpar (KARACEBEYLI; DOUGLAS, 2013). Dessa forma, a CLT permite a fabricação de paredes e lajes autoportantes de diferentes dimensões, enquanto a MLC possibilita a criação de vigas e pilares.

Internacionalmente, métodos construtivos que utilizam produtos engenheirados de madeira vem ganhando espaço e diversos países, como: Áustria, Alemanha, Austrália, Itália, Suécia, Noruega, Reino Unido, Canadá, Estados Unidos e Nova Zelândia, vêm desenvolvendo construções de edifícios altos em madeira (MAYO, 2015). Recentemente, em 2018, o ICC (*International Construction Code*) modificou 14 pontos no código de construção internacional, referentes à construção com madeira, que permitirão a construção de edificações de até 18 andares. Tais mudanças entrarão em vigor a partir de 2021, e irão auxiliar na popularização de construções de grande porte em madeira engenheirada (BRENEMAN *et al.*, 2019).

O uso da madeira, para construções de múltiplos pavimentos, já é realidade; na América do Norte, na Europa, na Oceania e na Ásia já foram construídos diversos edifícios. Breneman *et al.* (2019) destacam algumas edificações para exemplificar o avanço deste tipo de construção, como: em Melbourne, na Austrália, o Fórte, construído com 8 andares, em 2012; o edifício *Brock Commons Tallwood House*, em Vancouver, no Canadá, com 18 pavimentos e concluído em 2017; Mjøstårnet, inaugurado em 2019, com 18 andares, na Noruega; e, ainda, o Hoho

Wien, construído em Viena, na Áustria, com 24 pavimentos em madeira, finalizado em 2019. Estes exemplos de edificações já concluídas nos mostram um avanço na verticalização das construções em madeira pelo mundo e os potenciais construtivos deste material.

Essa nova forma de construir com madeira apresenta muitas diferenças em relação a forma histórica de construção com o material. A construção com madeira fez uma transição de uma forma puramente manual de trabalho para uma cadeia construtiva racionalizada feita em fábricas, com industrialização eficiente utilizando componentes pré-fabricados, precisos e de rápida montagem (KOLB, 2008). O autor ainda afirma que a carpintaria tradicional vem sendo substituída por processos de projetos assistidos por computador e por máquinas robóticas com alto controle de precisão.

Com a industrialização, o método construtivo tende a se tornar mais sensível às mudanças e com maior nível de complexidade, devido à existência de dois locais de produção: a fábrica e o canteiro de obras, sendo necessário um maior planejamento (KOSKELA, 1992). Inconsistência entre projetos ou entre o que está sendo produzido em fábrica e o que é necessário no canteiro de obra podem aumentar custos e tempo de execução (EASTMAN *et al.*, 2014). Deste modo, este método construtivo necessita projetos com compatibilização dos sistemas e a sincronia com o fornecimento das peças, a fim de garantir a eficiência e qualidade da construção (KOLB, 2008). A evolução da tecnologia digital, aliada a metodologias de projetos, como o BIM (*Building Information Modeling*), proporcionam ferramentas que podem contribuir com construções pré-fabricadas com madeira engenheirada.

Prédios em madeira já são uma realidade global e os benefícios de construir com a MLC e CLT são muitos e evidentes. Apesar das qualidades destacadas, o uso da madeira traz consigo desafios e exigências, desde as fases iniciais de projeto. O entendimento de tecnologias projetuais, como o BIM, é um fator, que pode auxiliar o setor em sua cadeia produtiva e construtiva. O uso dessa tecnologia pode contribuir para que as construções em madeira sejam feitas de modo eficiente, inteligente, seguro e que possam concorrer diretamente com o uso de materiais convencionais.

2.2 BIM

O *Building Information Modeling* (BIM) é conceituado, como: um conjunto de ferramentas, tecnologias interativas, processos e políticas, que possibilitam, de forma multidisciplinar, o desenvolvimento de projetos colaborativos, gerenciamento da construção e manutenção de edificações (SUCCAR, 2009). Com a tecnologia, é possível a criação de modelos virtuais de edificações, com informações precisas e dados que irão auxiliar no processo de construção, fabricação e fornecimento de materiais. Os modelos de informação da construção geram condições necessárias para o estudo do ciclo de vida das edificações, e possibilitam novas abordagens no planejamento de construções. Além disso, desempenham um papel importante na mudança de relação entre as pessoas envolvidas, proporcionando maior integração entre equipes de diferentes áreas e nas distintas etapas de projeto e execução. Quando corretamente implementado, o processo resulta em menores custos e menor tempo de construção, com melhorias na qualidade do produto final (EASTMAN *et al.*, 2014).

As plataformas CAD (*Computer Aided Design*) surgiram como uma substituição do lápis e do papel, nas quais os desenhos técnicos passaram a ser graficados em ambiente digital, na forma de 2D e, posteriormente, em 3D. Os desenhos em CAD representam as formas e objetos por meio de vetores de coordenadas, com precisão matemática, que formam linhas, que são organizadas por diferentes camadas (*layers*) (EASTMAN *et al.*, 2014). O sistema BIM surge com uma outra abordagem: os modelos são criados em 3D, a partir de objetos paramétricos com propriedades espaciais, associadas à sua representação. Detalhes em diferentes vistas, como plantas e cortes em 2D, são retirados diretamente do modelo e qualquer alteração em um objeto, feita em uma das vistas, é transmitida automaticamente para outras. Isso elimina o

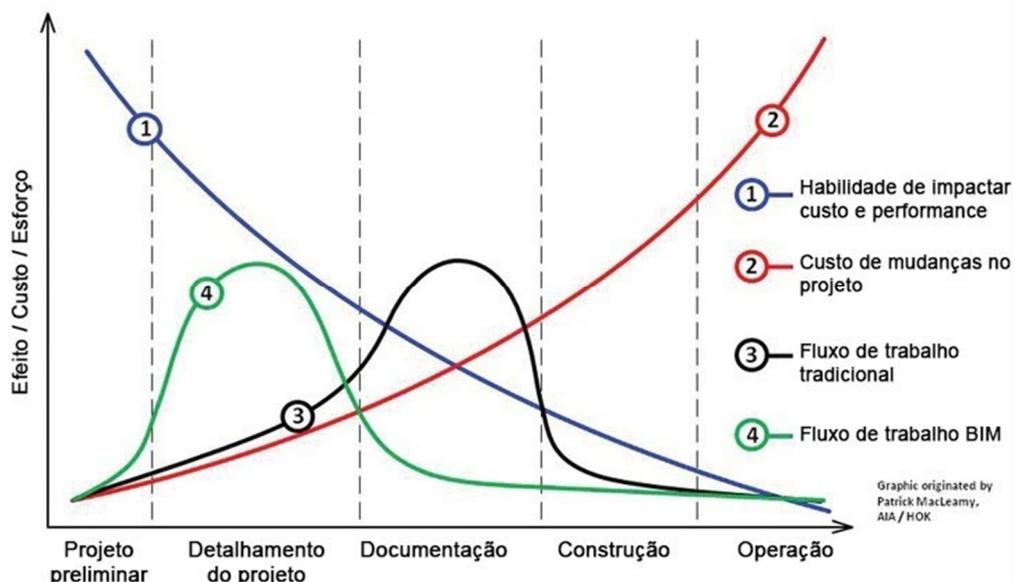
processo de retrabalho, que vemos em projetos feitos em CAD, e torna o processo de detalhamento e correção de projetos mais fácil e ágil.

A parametrização em modelos BIM agrega agilidade e coerência de projetos. Objetos paramétricos são constituídos por diferentes parâmetros e regras, que permitem a programação de informações, como: geometria, características físicas, localização; e, ao serem inseridos, são automaticamente representados em 2D e 3D, de acordo com a vista utilizada (EASTMAN *et al.*, 2014). Ayres e Scheer (2007) comentam que os objetos paramétricos podem ser modelados a partir de informações diretas de produtos desenvolvidos por fabricantes, como janelas, peças pré-fabricadas, acessórios, etc. Com isso, os projetos podem ser feitos de acordo com os produtos reais fornecidos pelo mercado, não somente representações genéricas, podendo representar fielmente o que será construído.

A troca de informações é de grande importância em um processo BIM. Succar (2009) define a capacidade de trocar informação entre dois ou mais sistemas, ou componentes distintos, como interoperabilidade. Há muitos softwares que podem servir a distintas utilidades, dependendo do fim para o qual foi criado. Para uma análise integrada, é importante que as informações contidas em um modelo, feito em um determinado programa, possam migrar, da melhor maneira possível, para outro, possibilitando que diferentes profissionais façam distintas análises de uma mesma edificação. Para facilitar a troca de informações entre os programas, foi desenvolvido o formato IFC (*Industry Foundation Classes*), para a transmissão de informações substanciais, sendo uma forma de superar problemas de interoperabilidade, apesar de sua utilização não garantir totalmente a correspondência entre softwares distintos.

Como principal característica, o BIM é um sistema de modelagem 3D, que permite a gestão do ciclo de vida útil da edificação. Estas características garantem ao BIM uma nova abordagem projetual de multidisciplinaridade. Para Eastman *et al.* (2014), os processos de projetos são aprimorados com o uso do BIM, e há uma mudança de relação significativa entre os envolvidos em um empreendimento e os termos contratuais entre os mesmos. O autor comenta que o uso do BIM facilita a maior colaboração entre arquitetos, empreiteiros e projetistas de diferentes disciplinas, em fases iniciais de projeto, auxiliando na resolução de problemas, antes que os mesmos possam chegar ao canteiro de obra, impactando substancialmente nos custos e no tempo de um empreendimento, em comparação aos projetos tradicionais.

Figura 1 – Gráfico Esforço x Tempo



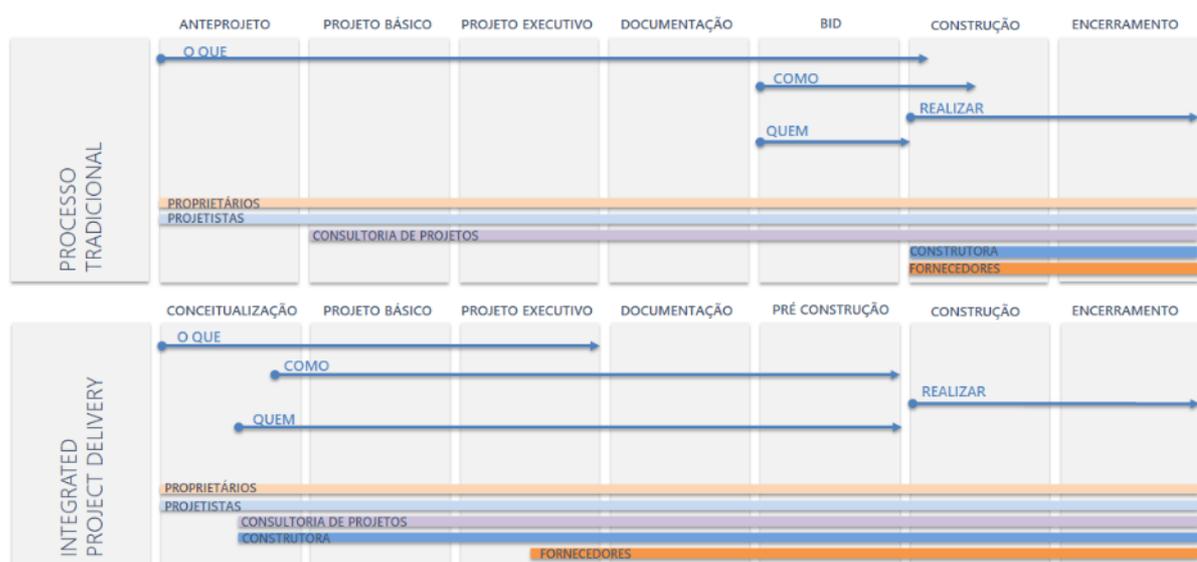
Fonte: Adaptado de *Construction Users Roundtable*, 2004.

A figura 1 apresenta o gráfico de esforço e efeito pelo tempo, proposto por MacLeamy (CURT, 2004), e evidencia o fluxo de trabalho em projetos BIM. O gráfico nos mostra que projetos integrados com maior foco nas fases iniciais são mais efetivos e tem menor custo de mudança, sugerindo repensar as fases de projeto (AIA, 2007).

Estas decisões que impactam diretamente as construções são geradas pela abordagem multidisciplinar integrada de projetos. De acordo com o Guia de Entrega de Projetos Integrados (*Integrated Project Delivery: A Guide*), essa abordagem de entrega de projetos tem como princípio a integração de pessoas, sistemas, estruturas de negócios e práticas (AIA, 2007). Os projetos integrados são desenvolvidos em processos colaborativos, onde se utiliza do talento e da opinião de todos os envolvidos, para otimizar resultados de projeto, agregando valor, reduzindo desperdícios e maximizando a eficiência das fases de projeto, fabricação e construção (AIA, 2007). O uso do BIM auxilia na implantação de projetos integrados ao proporcionar uma plataforma de troca de informação entre os envolvidos. Segundo o Guia, os princípios fundamentais para a entrega de projetos integrados envolvem respeito mútuo, confiança entre as partes, riscos e recompensas compartilhadas, inovação e tomadas de decisão colaborativas, envolvimento com antecedência dos participantes, definição de objetivos em fases iniciais, planejamento intensificado, boa comunicação, utilização de tecnologia e organização virtual (AIA, 2007).

A figura 2 evidencia as etapas de concepção das distintas abordagens de projeto. Diferentemente dos métodos tradicionais, observa-se que, em projetos integrados, as equipes envolvidas no processo são definidas nos estágios iniciais de desenvolvimento, e o processo de planejamento é considerado desde a conceitualização do empreendimento. Assim, ao começar a execução, as etapas e os papéis estão definidos com clareza, facilitando a execução e prevenindo imprevistos, que podem impactar significativamente o andamento da obra. O papel do BIM é possibilitar um ambiente virtual de troca de informações, por meio dos modelos, para que os projetos possam ser elaborados de maneira colaborativa, servindo como uma ferramenta de comunicação entre os envolvidos. Para o progresso desse tipo de metodologia, é necessária a horizontalidade na troca de informações. Para isso, é essencial um ambiente de confiança entre as partes e definições claras dos papéis dos envolvidos.

Figura 2 - Diagrama comparativo entre projetos tradicionais e integrados



Fonte: FONTES, 2018.

Sendo assim o BIM possibilita que diferentes análises possam ser feitas de forma integrada, por distintos profissionais. Desenhos detalhados de peças podem ser elaborados de forma automatizada, para serem usados em distintas etapas da obra. Com modelos BIM, é possível projetar distintas disciplinas em um ambiente virtual comum, facilitando a coordenação das mesmas, evitando conflitos e antecipando a resolução de problemas, na etapa de projeto.

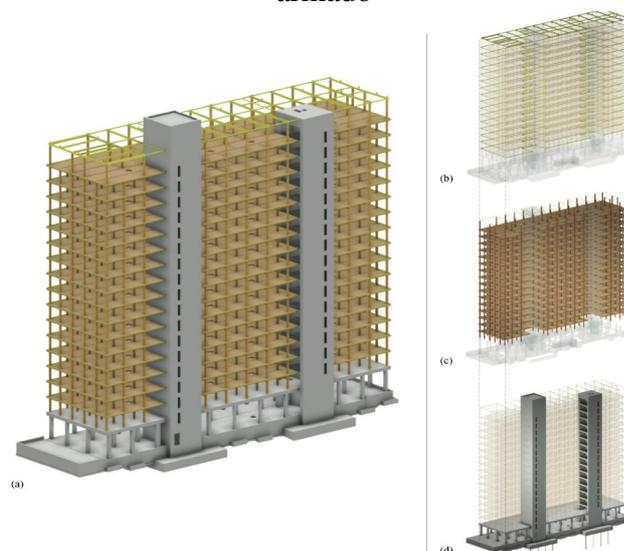
3 ANÁLISE DA EDIFICAÇÃO

O estudo de caso deste trabalho está associado à análise do processo de projeto e construção do edifício *Brock Commons Tallwood House*, localizado na cidade de Vancouver, no Canadá. Esta pesquisa usa como referência teórica e base de análise os relatórios do programa *WoodWorks*, desenvolvidos pelo Conselho de Madeira do Canadá (CWC, 2018) e os relatórios da *Naturally:wood*, promovidos pelo Programa de Inovação Florestal (FPI - *Forest Innovation Program*), organizados por Pilon *et al.* (2016, 2017), no do Centro de Interação e Pesquisa de Sustentabilidade (CIRS - *Centre for Interactive Research on Sustainability*), da Universidade de *British Columbia* (UBC).

O edifício foi construído pela Universidade de *British Columbia*, para servir de moradia estudantil, tendo a capacidade de abrigar 404 residentes e possuindo 15.120 m² de área construída. O *Brock Commons* foi um dos projetos demonstrativos resultantes da iniciativa de demonstração de prédios altos em madeira (*The Tall Wood Building Demonstration Initiative*), em 2013. A iniciativa tinha como objetivo incentivar projetos inovadores que utilizassem produtos engenheirados de madeira, como sistema construtivo, a fim de encontrar novas soluções para os desafios técnicos da expansão de utilização da madeira na construção civil, conectando avanços científicos com informações técnicas, em casos reais de aplicação dos materiais estruturais à base de madeira (PILON *et al.*, 2016a).

O prédio de 54 metros de altura possui um sistema estrutural híbrido, que utiliza produtos de madeira engenheirada, conjuntamente com concreto armado e perfis de aço (figura 3). Sendo a primeira edificação no mundo a alcançar 18 andares utilizando a madeira como principal material estrutural, a construção desta edificação se mostrou como uma oportunidade para inovação em engenharia, com produtos de madeira, e em técnicas construtivas sustentáveis (PILON *et al.*, 2016b).

Figura 3 - Modelo virtual representando estrutura híbrida do *Brock Commons*: a) Estrutura híbrida completa b) Conexões metálicas c) Estrutura de madeira d) Estrutura de concreto armado

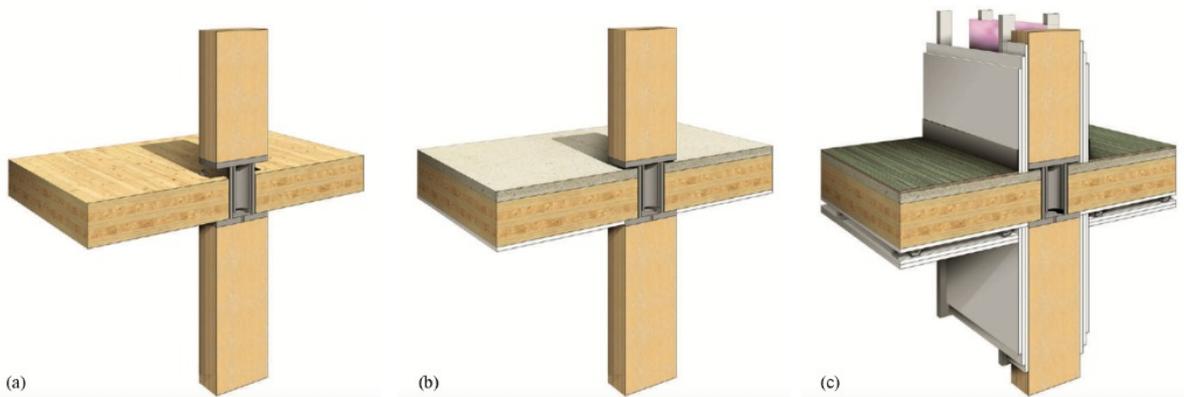


Fonte: Adaptado de PILON *et al.*, 2016b.

A estrutura de madeira foi projetada de modo a facilitar a fabricação e a montagem, com intuito de agilizar a construção no canteiro. Para isso, foi desenvolvido um sistema pilar-laje, onde se utilizaram lajes de CLT, com 2,85 metros de largura, e 4 diferentes comprimentos, chegando ao máximo de 12 metros de vão, totalizando 29 peças, por andar, em 16 pavimentos (do 2º ao 16º). Não foi necessária a utilização de vigas, devido à capacidade dos painéis de CLT de distribuir as cargas nas duas direções. Os pilares empregados foram fabricados, principalmente, em MLC, e, na região de maior solicitação, foram usados *Parallel Strand Lumber* (PSL), devido a sua maior resistência estrutural. Os sistemas estruturais, juntamente com as conexões, foram testados em escala real, para analisar a viabilidade construtiva e a agilidade de execução. Foram testados três tipos de conexões entre pilar e laje, duas em madeira e uma em aço, e dessa forma, a opção foi pela conexão em aço, devido à sua praticidade e facilidade de montagem (CWC, 2018).

Em concreto armado, foram construídos o primeiro andar, as fundações e os dois núcleos, onde se localizam as escadas e os elevadores. Os núcleos servem para aumentar a rigidez da edificação, suportar cargas de vento e de eventos sísmicos. Perfis de aço foram utilizados para as conexões entre pilar-pilar, pilar-laje, na ligação da estrutura de madeira ao núcleo de concreto, e para a estrutura do telhado, a fim de proteger a madeira da umidade (CWC, 2018). Após a instalação da estrutura de madeira, foi executado um contrapiso de concreto sobre a laje. Essa camada de revestimento foi colocada devido a sua maior rigidez, a fim de aumentar o isolamento acústico entre os andares, acrescentar peso a estrutura e servir como uma camada protetora, tanto para a fase de execução, quanto de utilização da edificação (CWC, 2018).

Figura 4 - Representação da sequência construtiva dos acabamentos do *Brock Commons*: a) estrutura montada; b) contrapiso e proteção superior instaladas; c) acabamentos executados com camadas de gesso instaladas



Fonte: Adaptado de PILON *et al.*, 2016.

A construção desta edificação só foi possível graças a jurisdição especial da UBC, que funciona como um pequeno município, possuindo seus próprios códigos, políticas, regulamentos e padrões, que se sobrepõem aos locais, regionais e nacionais (CWC, 2018). Os códigos de construção foram alterados, para permitir edificações com materiais combustíveis de até 18 pavimentos, assim, o projeto poderia ser colocado em prática. Apesar de testes de incineração dos materiais mostrarem um bom comportamento, em relação aos eventos de incêndio, medidas de precaução foram tomadas, a fim de facilitar o processo de aprovação pelos órgãos responsáveis. Todas as partes de madeira foram revestidas com camadas triplas, de placas de gesso resistentes ao fogo, tanto nas paredes, quanto no forro, como se pode verificar na figura

4 (PILON *et al.*, 2017b). Todo o edifício é equipado com *sprinklers* e equipamentos extras de prevenção e sinalização de incêndio. O intuito das precauções era assegurar que os futuros inquilinos estivessem seguros no edifício, tanto quanto em uma edificação convencional (POIRIER *et al.*, 2016).

A edificação foi projetada visando alcançar a certificação LEED *Gold (Leadership in Energy and Environmental Design)*, importante referência de avaliação, que promove a responsabilidade ambiental em edificações. No total da construção foram usados 2.233 m³ de madeiras, em peças de CLT e MLC. Calcula-se que foram estocadas 1.753 toneladas de CO₂ e evitada a emissão de 679 toneladas de CO₂ para a atmosfera (CWC, 2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados pontos importantes do projeto e a influência do modelo VDC-BIM (*Virtual Design and Construction*) no processo de construção da edificação. Ainda, será analisado como a metodologia BIM pode contribuir na elaboração de edificações em madeira engenheirada e como este processo de projeto se enquadra em tópicos estratégicos, que podem auxiliar a cadeia produtiva desse método construtivo. Os pontos aqui discutidos ilustram a experiência no uso do BIM, na construção do *Brock Commons*, os quais foram apontados no relatório técnico da Bimtopics (STAUB-FRENCH *et al.*, 2018), da UBC e em outros estudos. O método VDC pode ser classificado como “o uso de um modelo virtual integrado de performance multidisciplinar, para apoiar projetos construtivos, dando ênfase a aspectos do projeto que podem ser modelados e gerenciados, incluindo o produto, processo e organização, com o objetivo de dar suporte à construção” (KUNZ; FISCHER, 2009). O VDC proporciona suporte para a análise virtual do ciclo de vida de um projeto construtivo, proporcionando auxílio direto na execução, ou seja, pode-se dizer que ele é um complemento para a implantação prática do BIM.

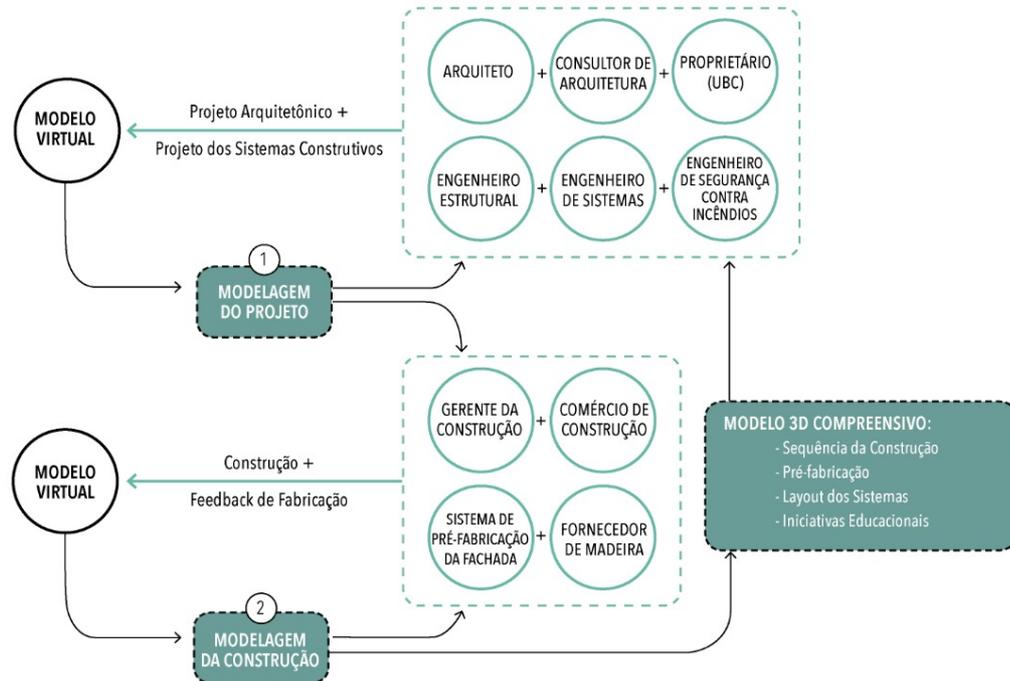
O projeto do *Brock Commons* pode ser caracterizado como um processo integrado e multidisciplinar, no qual os envolvidos no desenvolvimento do projeto e construção foram reunidos nas fases iniciais, para definir diretrizes e contribuir com suas *expertises*. A escolha por este tipo de abordagem partiu da UBC, que reconhecia os riscos técnicos e financeiros envolvidos na construção de um edifício híbrido de madeira, de 18 andares. O processo de projeto começou, oficialmente, em novembro de 2014, quando foi composta a equipe multidisciplinar, com arquitetos, engenheiros, gerentes de construção, fabricantes, consultores e fornecedores, visando formar uma equipe integrada de projetos. Para auxiliar na integração dos envolvidos e prover um modelo virtual da construção VDC-BIM, foi contratado o escritório da CadMakers (POIRIER *et al.*, 2016).

A coordenação e a colaboração entre as diferentes equipes envolvidas se deram na utilização do modelo VDC, gerenciado por um agente integrador, o qual serviu como uma peça chave para guiar todo o processo. Na primeira fase, as informações, geradas em 2D por arquitetos e projetistas, eram repassadas para a equipe responsável pela modelagem da construção, que desenvolvia as diferentes disciplinas em um ambiente comum e, em um segundo momento, repassava *feedbacks* para as equipes, a fim de coordenar e alinhar os projetos. Posteriormente, o modelo serviu para as equipes de gerenciamento, orçamentos e fabricantes desenvolver as fases de execução e a sequência da construção.

O modelo se mostrou como uma importante ferramenta de comunicação entre os atores envolvidos. O processo construtivo foi auxiliado pela utilização de um modelo VDC-BIM, utilizando o *software* CATIA, da companhia francesa Dassault Systèmes. Este *software* é normalmente utilizado na indústria aeroespacial, no entanto, a empresa vem adaptando o *software* para o setor da construção (FALLAHI, 2015). Na figura 5, é mostrado o diagrama de

fluxo de projeto adotado, em que o escritório responsável por criar o modelo integrador recebia projetos em 2D e organizava as informações em um ambiente único, onde todas as disciplinas foram contempladas, possibilitando a coordenação do projeto e planejamento de todas etapas, fornecendo informações e integrando a todos envolvidos.

Figura 5 – Diagrama do fluxo de projeto



Fonte: Adaptado de PILON *et al.*, 2017a.

O tempo disponível que a equipe possuía para ganhar a aprovação do projeto do empreendimento era de 8 meses. Devido ao curto período que teriam para a aprovação do projeto, em janeiro de 2015 foi organizado um *workshop* no qual a equipe de projeto pode desenvolver e definir os sistemas que seriam utilizados na edificação. O uso do modelo, desde as fases iniciais, proporcionou *feedbacks* de maneira rápida, beneficiando a tomada de decisões da equipe. Ao fim do *workshop* já estava definido o sistema estrutural, mecânico, elétrico e os princípios que guariam o desenvolvimento da fachada pré-fabricada (POIRIER *et al.*, 2016).

Figura 6 – Levantamento de quantitativos a partir do modelo VDC, com planilha de informações retiradas do modelo

	A	B
1	option 1a	VOLUME (M3)
2	C1-LVL 1_6	92.913m3
3	C1-LVL7_12	68.136m3
4	C1-LVL13_18	40.334m3
5	PRECAST TOPPING	967.448m3
6	CLT_PANEL-SECONDARY STRUCTURE	1362.476m3
7	ELEVATOR CORE(NO OPENING)	699.42m3
8	B1-OUTSIDE BEAMS	75.798m3
9	B2-INTERIOR BEAMS	67.117m3

Fonte: FALLAHI, 2015.

Na fase preliminar, a utilização do modelo permitiu que estimativas de custo fossem feitas de forma rápida, a partir das retiradas de quantitativos. A figura 6 apresenta o modelo criado nos

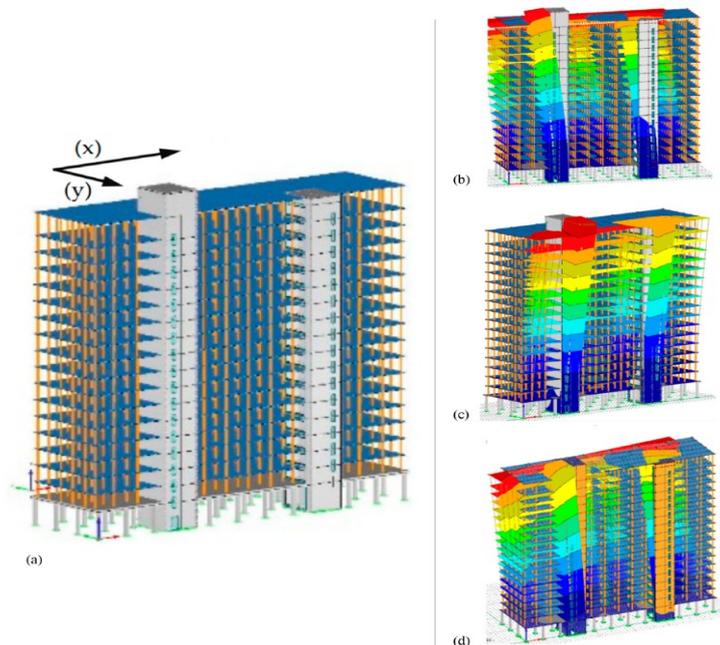
estudos iniciais e as informações retiradas do modelo, que posteriormente foram transferidas para planilhas de Excel e serviram de base para que o encarregado do gerenciamento da construção pudesse estimar custos de mão de obra e de material (FALLAHI, 2015).

Estimativas de custos realizadas, com o auxílio da automatização de extração de quantidades e a vinculação do planejamento ao modelo, é conhecido como 5D. Este tipo de modelagem possibilita que estimativas de custos complexas sejam feitas de forma extremamente rápida, permitindo o monitoramento dos custos, desde as fases iniciais de projeto (MITCHELL, 2012). Kymmell (2008) comenta que, com a evolução do modelo, a estimativa de custo passa a ser mais eficiente, à medida que o nível de detalhamento aumenta.

O BIM possibilita a quantificação automática dos elementos modelados, mostrando-se de grande valia, desde as etapas iniciais de estudos de viabilidade até o fim da construção. O uso do BIM permite que diferentes sistemas construtivos possam ser propostos e comparados com agilidade, não apenas em termos de projeto, mas também em relação aos custos. Os autores POIRIER *et al.* (2016) acrescentam, também, que a utilização do modelo de informação beneficiou na escolha e validação do método construtivo e de seus sistemas.

Com o propósito de comprovar a viabilidade dos elementos pré-fabricados de madeira e os painéis de fachada, foi construído um protótipo, em escala real, durante a fase de projeto, para verificar, na prática, a construtibilidade da edificação e para garantir a eficácia dos detalhes construtivos. Durante a montagem do protótipo, também foi testado como seria a troca de informações entre o modelo VDC e o fornecedor dos produtos de madeira, provando que as peças poderiam ser fabricadas com base no modelo virtual de forma confiável (FALLAHI *et al.*, 2016).

Figura 7 – Análise estrutural: a) modelo numérico; b) deformação em x; c) deformação em y; d) torção



Fonte: CONNOLLY *et al.*, 2018.

As análises estruturais da edificação e de elementos finitos para painéis de CLT foram feitas com o auxílio do *software* RFEM (*Rigid Finite Element Method*), da Dlubal, utilizando um módulo adicional que permitiu a análise dos elementos laminados. Os resultados do *software* foram posteriormente validados por meio de cálculos manuais aproximados (FAST e

JACKSON, 2018). Os autores ainda relatam que, com o uso do modelo VDC, foram detalhadas todas as peças estruturais e suas conexões. A figura 7 apresenta o uso do modelo virtual para a análise estrutural, exemplificando o seu uso para diferentes abordagens. Dessa forma, a análise estrutural se mostra um ponto importante do uso do BIM nas construções com madeira.

O BIM permite a exportação de modelos arquitetônicos para análises estruturais, evitando retrabalho e prevenindo que as informações possam ser alteradas na troca das mesmas. Ainda, em projetos com poucos precedentes, como são os casos de edificações em madeira, a metodologia BIM permite que consultores possam executar diferentes análises, utilizando o mesmo modelo arquitetônico.

O projeto foi desenvolvido para alcançar um alto nível de detalhamento. Na figura 8, é possível observar um comparativo entre o modelo virtual e a execução da edificação. Nela, é mostrado o detalhe de fixação de um pilar de MLC na laje de concreto, o ambiente de trabalho no pavimento, com as diferentes escoras da estrutura e os elementos de segurança, e o içamento e montagem dos pilares e painéis de madeira. Esta comparação nos mostra a importância do detalhamento do modelo para o sucesso da construção. A visualização clara dos detalhes pode auxiliar no controle do processo, à medida que os envolvidos têm um entendimento claro dos objetivos da etapa construtiva.

Figura 8 – Comparativo do modelo VDC e execução



Fonte: PILON *et al.*, 2017a.

Os modelos BIM auxiliam na visualização clara das propostas de projeto, por meio da representação de diferentes sistemas de forma integrada, facilitando o entendimento entre as equipes. Além disso, projetos de construção em madeira podem apresentar dificuldades de aprovação junto aos órgãos públicos, devido à falta de códigos e regulamentações. Os modelos de informações permitem que autoridades e consultores tenham uma visão clara de soluções técnicas para possíveis problemas apresentados, podendo até mesmo colaborar no desenvolvimento de futuros códigos construtivos (STAUB-FRENCH *et al.*, 2018).

A coordenação em projetos pré-fabricados tem grande importância, visto que as peças vêm prontas para serem montadas no local e os conflitos entre sistemas podem acarretar em problemas que aumentam significativamente os custos de construção, como retrabalho e atraso no cronograma estipulado. Na figura 9, podemos ver diferentes sistemas modelados de forma integrada, o que contribuiu para que fossem revisadas as condições construtivas, de maneira rápida antes da construção. Dessa forma, pode-se reduzir significativamente os conflitos *in*

loco, impactando diretamente na produtividade, na redução de custos e no tempo de construção. A aplicação do modelo da construção no edifício *Brock Commons* possibilitou que conflitos entre diferentes sistemas fossem corrigidos, antes da construção da edificação, principalmente entre os sistemas mecânicos, elétricos e hidráulicos e os pisos e paredes.

Figura 9 – Modelo VDC, com diferentes sistemas integrados



Fonte: PILON *et al.*, 2017a.

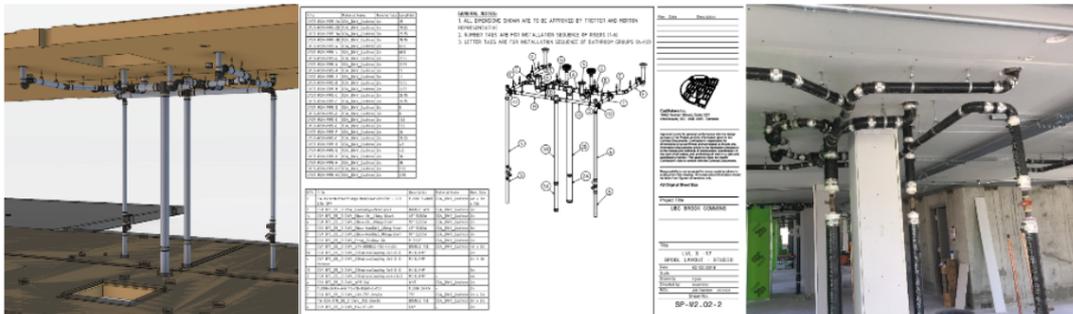
A coordenação entre os sistemas, por meio de *Clash Detection*, possibilitou identificar os pontos em que as tubulações, os sistemas elétricos e de refrigeração cruzariam os pavimentos, permitindo que todas as perfurações nos painéis de CLT fossem feitas em fábrica de acordo com o modelo, a partir da conversão deste para arquivos de fabricação (CAD/CAM) (*Computer Aided Manufacturing*), necessários para as máquinas de CNC (FAST; JACKSON, 2018). Além dos painéis, os pilares de madeira também foram cortados e perfurados usando as máquinas de CNC com dados dos modelos (FALLAHI, 2015). A evolução da tecnologia nas máquinas de corte computacional CNC permite que cortes e perfurações sejam feitas com alto nível de precisão, garantindo às peças fabricadas agilidade de produção e confiança no produto final. A utilização do BIM traz benefícios diretos na produção das peças estruturais de madeira. Os modelos de informação da construção não só garantem a coordenação entre os sistemas da edificação, identificando pontos de perfuração e conexão, mas também podem ser usados para exportar informações geométricas diretamente para as máquinas de CNC. Isso contribui para que o sistema construtivo possa ser planejado com alto nível de exigência, permitindo a confiança e comunicação entre o que é produzido em fábrica com o que está sendo executado *in loco*.

O alto nível de detalhamento permitiu que muitos itens pudessem ser pré-fabricados, como a estrutura de madeira, os painéis da fachada e sistemas hidráulicos. Além disso, quantitativos detalhados dos componentes de toda edificação permitiram maior controle na compra dos materiais. Do modelo ainda foram extraídos documentos executivos extremamente confiáveis, o que auxiliou na pré-fabricação de alguns componentes, como foi o caso dos sistemas hidráulicos.

A indústria da construção, apesar de estar adotando modelos BIM mais amplamente, ainda depende de projetos 2D para transmitir informação por meio de documentação entre as partes envolvidas. O uso de modelos BIM permite o desenvolvimento automático de muitas partes importantes das documentações de projeto, o que agiliza a produção de documentos e evita

retrabalho. A figura 10 apresenta um comparativo entre o modelo virtual, os documentos extraídos do modelo e a execução do sistema, exemplificando os benefícios do detalhamento coordenado.

Figura 10 – Comparativo do modelo, documentação e execução



Fonte: FALLAHI, 2015.

A associação dos componentes modelados com o tempo, é conhecida como modelagem 4D. Nela, elementos virtuais permanentes e temporários são dispostos em ordem cronológica de construção, assim, é possível analisar a interação de diferentes fatores, ao longo do andamento da obra, como a localização de equipamentos e estoques, a entrega de materiais, a movimentação de diferentes equipes de trabalho, instalações temporárias e a segurança do canteiro de obra. A visualização do planejamento gera melhor entendimento da programação de construção, auxilia na sincronia de entrega de materiais, o que diminui os estoques no canteiro e antecipa a detecção de conflitos em frentes de trabalho, aumentando a capacidade de resolução de conflitos (STAUB-FRENCH *et al.*, 2018). É uma importante ferramenta para monitoramento das atividades, para o aumento da produtividade e para a diminuição dos desperdícios.

O planejamento 4D, a partir do modelo virtual altamente detalhado, permitiu demonstrar a sequência de construção, minimizando incertezas dentro canteiro de obras que poderiam levar a algum atraso no cronograma. Ainda, a incorporação no modelo de informações da construção possibilitou atualizações das sequências construtivas que tornaram as previsões de execução mais próximas da realidade (FALLAHI, 2015).

A figura 11 apresenta trechos do vídeo da sequência 4D da edificação, mostrando a entrega do material. Devido ao planejamento prévio, foi possível modelar os carregamentos das peças de madeira, conforme a sequência de içamento. Isso fez com que não fosse preciso um estoque de material no canteiro devido às peças serem retiradas do caminhão e instaladas diretamente no local previsto. O modelo ainda possibilitou o estudo do centro de gravidade de cada peça, o que garantiu a estabilidade e segurança do içamento.

Figura 11 – Planejamento 4D: entrega e içamento da estrutura de madeira



Fonte: FALLAHI, 2015.

O projeto foi planejado a fim de ser executado nos meses mais secos do verão, com o intuito de evitar a exposição da madeira à umidade, o que poderia prejudicar a vida útil da estrutura. Isso significava um intervalo de 16 semanas para a montagem da estrutura de madeira. Com o uso do modelo virtual, foi possível a execução em nove semanas. A montagem da estrutura foi acompanhada com a instalação da fachada pré-fabricada, para evitar a exposição à umidade e permitir a abertura de outras frentes de trabalho.

A modelagem 4D da edificação foi feita pelo software DELMIA, da Dassault Systèmes, que possibilitou a simulação do tempo de execução das atividades, antes da construção efetiva. O planejamento prévio integrado é peça chave na construção das edificações em madeira. A sequência de montagem é fundamental para a entrega apropriada dos materiais no tempo certo e o detalhamento do sistema construtivo no modelo virtual permite que a execução seja feita de forma ágil. O modelo da construção auxilia na organização do canteiro de obra, otimiza os espaços de trabalho e diminui estoques. A programação das atividades virtualmente impacta significativamente no tempo de execução, permite o monitoramento e a rápida resolução de eventuais problemas. O uso do BIM, por meio da modelagem 4D, pode alinhar a fabricação e execução das edificações, auxiliando o setor a ser eficiente e interativo entre as diferentes frentes de atuação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A experiência com a construção do *Brock Commons* mostra a viabilidade da construção de múltiplos pavimentos com madeira no meio urbano e sinaliza um novo patamar do uso deste material na construção civil. A utilização de produtos engenheirados de madeira, como a CLT e a MLC, podem representar uma significativa transformação na maneira de construir.

Além de representarem uma maneira sustentável de construir, por sua origem natural renovável, com baixa demanda de energia para processamento, os sistemas pré-fabricados com madeira têm potencial promissor de transferência de boa parte do trabalho construtivo para o ambiente fabril, auxiliando o setor da construção a se tornar mais ágil e eficiente.

Mundialmente, este tipo de construção apresenta diversos exemplos ao longo dos últimos anos e as edificações já existentes sinalizam a expansão da utilização destes materiais na construção civil. As construções com madeira engenheirada podem ser uma alternativa sustentável aos materiais convencionais no desenvolvimento sustentável dos centros urbanos. Alinhando as preocupações ambientais com o desenvolvimento tecnológico das construções com madeira, este método construtivo tende a se tornar mais comum, ao longo dos próximos anos.

Projetos elaborados de maneira multidisciplinar e integrada podem contribuir com o setor construtivo da madeira na viabilização de projetos. A utilização efetiva do BIM pelos agentes envolvidos pode auxiliar este processo, facilitando no planejamento e no gerenciamento das construções. A interoperabilidade entre os programas permite que equipes multidisciplinares atuem em conjunto na elaboração de projetos, auxiliando, assim, na especialização das etapas e garantindo maior versatilidade e velocidade no trabalho. O BIM se mostra como uma ferramenta poderosa de comunicação, auxiliando na criação de projetos complexos e integrados, que proporcionam melhor organização dos sistemas e planejamento construtivo.

A construção do *Brock Commons* evidencia os benefícios da adoção do BIM nas construções de múltiplos pavimentos em madeira. A adoção do BIM, desde as etapas iniciais, garantiu uma série de benefícios, que foram de grande auxílio na construção da edificação. A coordenação e planejamento, com o auxílio do modelo de informação da construção, tornou a construção rápida e possibilitou que muitos problemas fossem evitados antes da execução.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA). **Integrated Project Delivery: A guide.** American Institute of Architects California Council, 2007, 62p. Disponível em: <http://info.aia.org/siteobjects/files/ipd_guide_2007.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.
- AYRES F., C.; SCHEER, S. Diferentes abordagens do uso do CAD no processo de projeto arquitetônico. In: VII Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projetos na Construção de Edifícios, n.7, 2007, Curitiba. **Anais do VII Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projetos na Construção de Edifícios.** Curitiba: 2007.
- BOWYER, J. *et al.* Modern tall wood buildings: Opportunities for innovation. **Dovetail Partners Inc.,** Minneapolis, 2016. Disponível em: <http://www.dovetailinc.org/report_pdfs/2016/dovetailtallwoodbuildings0116.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.
- BRENEMAN, S.; TIMMERS, M.; RICHARDSON, D. Tall Wood Buildings in the 2021 IBC: Up to 18 Stories of Mass Timber. **Woodworks,** Washington, 2019. Disponível em: <https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/wood_solution_paper-TALL-WOOD.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.
- CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A.A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 1, 1997, p.71-77.
- CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento-preservativo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- CANADIAN WOOD COUNCIL (CWC). **The advent of tall wood structures in Canada.** Canadian Wood Council, 2018. Disponível em: <https://cwc.ca/wp-content/uploads/2018/07/CS-BrockCommon.Study_.23.lr_.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.
- CONNOLLY, T.; LOSS, C.; IQBAL, A.; TANNERT, T.; Feasibility study of mass-timber cores for the UBC tall wood building. **Buildings,** Basel, v. 8, n. 8, 98-114p, 1 de ago. 2018.
- CONSTRUCTION USERS ROUNDTABLE (CURT). **Collaboration, Integrated Information, and the-Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation.** The Construction Users Roundtable, 2004. Disponível em: <<https://kcuc.org/wp-content/uploads/2013/11/Collaboration-Integrated-Information-and-the-Project-Lifecycle.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2019.
- CARRASCO, E. V. M. **Ligações estruturais de madeira por adesivos.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.
- EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **Manual de Bim:** Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Porto Alegre: Bookman, 2014, 483 p.
- FALLAHI, A. **Innovation in Hybrid Mass Timber High-rise Construction: A Case Study of UBC's Brock Commons Project.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Graduação e Estudos de Pós-Doutorado, Universidade de British Columbia, Vancouver, 2015.
- FALLAHI, A.; POIRIER, E. A.; STAUB-FRENCH, S.; GLATT, J.; SILLS, N. Designing for Pre-Fabrication and Assembly in the Construction of UBC's Tall Wood Building. In: Modular and Offsite Construction, 2016, Edmonton. **Anais do Modular and Offsite Construction.** Edmonton: 2016. p. 206-213.

FAST, P.; JACKSON, R. The TallWood House at Brock Commons. **The structural engineer**, Vancouver, 2018.

FONTES, C. S. Integrated Project Delivery. **Buildin**, Florianópolis, 27 de mar. 2018. Disponível em: <<https://www.buildin.com.br/integrated-project-delivery/>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

GUSS, L. M. Engineered wood products: The future is bright. **Forest Products Journal**, v.45, n.7/8, 1995.

JOHN, V. M. *et al.* Durabilidade e Sustentabilidade: desafios para a construção civil brasileira. In: WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES, 2., São José dos Campos, 2002. **Anais...** São José dos Campos, 2002.

KARACEBEYLI, E.; DOUGLAS, B **CLT Handbook - US Edition**. FPInnovations and Binational Softwood Lumber Council, Port-Claire, Quebec, 2013.

KOLB, J. **Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers**. Berlin, Birkhauser, 2008.

KUNZ, J.; FISCHER, M. **Virtual design and construction: themes, case studies and implementation suggestions**. Center for Integrated Facility Engineering (CIFE). Dept. of Civil and Environmental Engineering Stanford University. 2009. p. 50. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.154.9655&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

MANNINEN, H. Long-term Outlook for Engineered Wood Products in Europe. **European Forest Institute, 2014** Disponível em: <http://www.efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/tr_91.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.

MAYO, J. **Solid Wood. Case studies in mass timber architecture, Technology and design**. Routledge, 358 p, 2015.

MILAJ, K.; SINHA, A.; MILLER, T.H.; TOKARCZYK, J.A. Environmental utility of wood substitution in commercial buildings using life-cycle analysis. **Wood Fiber Science**. v49(3), 21p, jul. 2017. Disponível em: <<https://www.swst.org/wp/wp-content/uploads/2017/06/WFS2600.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

MITCHELL, D. 5D BIM: Creating Cost Certainty and Better Buildings. **RICS Cobra Conference**. Las Vegas (2012) Disponível em: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC27547.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2003.

PILON, A. *et al.* Brock Commons Tallwood House: Construction Modelling. **Naturally:wood**, Vancouver, 2017a. Disponível em: <http://wood-works.ca/wp-content/uploads/brock_commons_-_construction_modelling.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.

PILON, A. *et al.* Brock Commons Tallwood House: Construction Overview. **Naturally:wood**, Vancouver, 2017b. Disponível em: <https://seagatestructures.com/wp-content/uploads/2017/04/brock_commons_-_construction_overview.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.

PILON, A. *et al.* Brock Commons Tallwood House: Code Compliance. **Naturally:wood**, Vancouver, 2016a. Disponível em: <<https://www.naturallywood.com/resources/brock-commons-code-compliance>>. Acesso em: 8 nov. 2019.

PILON, A. *et al.* Brock Commons Tallwood House: Design and Preconstruction Overview. **Naturally:wood**, Vancouver, 2016b. Disponível em: <https://www.naturallywood.com/sites/default/files/documents/resources/brockcommons_designpreconstructionoverview_web.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.

POIRIER, E.; MOUDGIL, M.; FALLAHI, A.; STAUB-FRENCH, S.; TANNERT, T. Design and Construction of a 53-meter-tall Timber Building at the University of British Columbia. In: World Conference Timber Engineering, 2016, Viena. **Anais do World Conference Timber Engineering**. Viena: 2016.

SHIGUE, E. K. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, Ações e Produtos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SMITH, P. BIM & the 5D project cost manager. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 119, p. 475-484, 2014.

STAUB-FRENCH, S. *et al.* **Building Information Modeling (BIM) and Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) for Mass Timber Construction**. Bim Topics Research Lab, University of British Columbia, Vancouver, 2018. Disponível em: <https://www.naturallywood.com/sites/default/files/documents/resources/bim_and_dfma_for_mass_timber_construction.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2019.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in construction**, v. 18, n. 3, p. 357-375, 2009.