

ESTUDO COMPOSITIVO COM BLOCOS RETANGULARES E TRAPEZOIDAIS NO SISTEMA MODULAR VOLUMÉTRICO

ARTIGO

Compositive study with rectangular and trapezoidal blocks in the Modular Volumetric System

Alessandra Teribele¹, Giovanna Paiani Salvador¹

RESUMO: A arquitetura modular volumétrica é um sistema pré-fabricado que, para construir edificações, une no terreno os módulos, unidades volumétricas com dimensões limitadas devido às restrições de transporte. Sendo produzidos na indústria, os módulos são padronizados e dificultam alcançar a variabilidade composicional necessária para atender a características ambientais específicas. Os sistemas modulares volumétricos consideram, geralmente, a combinação de um tipo formal de módulo, unindo-os lado a lado. Estudar combinações com módulos de tipos diferentes entre si pode contribuir para ampliar a variabilidade composicional. Considerando o transporte e a junção em pontos pré-determinados, é necessário adequar esses módulos dentro de coordenação dimensional, definindo os locais onde essas unidades serão fixadas entre si, de modo a garantir a estabilidade estrutural do conjunto e a padronização exigida pelo processo industrial eficiente. O objetivo é propor alternativas combinatórias entre módulos de tipos diferentes (prisma retangular e prisma trapezoidal) a partir de locais de conexão previamente determinados por coordenação dimensional e contribuir com a indústria da construção ao demonstrar variabilidade composicional ao mesmo tempo que considera a padronização das unidades volumétricas previamente planejadas.

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

PALAVRAS-CHAVE: Grupos de Simetria Plana; Coordenação Dimensional; Industrialização; Personalização; Coordenação Modular.

ABSTRACT: Modular volumetric architecture is a prefabricated system that, in order to build buildings, unites modules (volumetric units) on the land with limited dimensions due to transport constraints. Since the modules are produced in the industry, they are standardized and make it challenging to achieve the compositional variability needed to meet specific environmental characteristics. Modular volumetric systems generally consider a combination of a formal type of module by joining them side by side. Studying combinations between modules of different types can contribute to increasing compositional variability. Considering the transport and the junction in predetermined points, it is necessary to adapt these modules within dimensional coordination, defining the places where these units will be fixed to each other, to guarantee the structural stability of the set and the standardization required by the efficient industrial process. The objective is to propose combinatorial alternatives between modules of different types (rectangular and trapezoidal prism) from connection sites previously determined by dimensional coordination. It contributes to the construction industry by demonstrating compositional variability while considering the standardization of the volumetric units previously planned.

KEYWORDS: Plane Symmetry Groups; Dimensional Coordination; Industrialization; Customization; Modular Coordination.

How to cite this article:

TERIBELE, A.; SALVADOR, G. P. Estudo compositivo com blocos retangulares e trapezoidais no sistema modular volumétrico. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v.16, n.1, p.80-95, jan.2021. <http://dx.doi.org/10.116/gtp.v16i1.159612>

Fonte de financiamento:

Declaro não haver

Conflito de interesse:

Declaro não haver

Submetido em: 15/07/2019

Aceito em: 20/07/2020

[Disponível online em Dezembro de 2020]



INTRODUÇÃO

A sociedade tem usado a pré-fabricação para construir em massa e com mais rapidez, mudando o local de construção do sítio para a fábrica (SMITH, 2011). Entre os sistemas de construção pré-fabricado, encontra-se o sistema modular volumétrico, (GARRISON; TWEEDIE, 2008) unidades tridimensionais autônomas (módulos) produzidos na indústria e transportados até o terreno para compor o edifício pretendido (SCHOENBORN, 2012). Esse tipo de construção foi impulsionado na última década devido ao impacto positivo no cronograma, na qualidade e na segurança (SALAMA et al., 2017).

Esses módulos que formam um espaço fechado utilizável (SCHOENBORN, 2012) são içados na fábrica e transportados até o terreno por meio terrestre, marítimo ou aéreo (SMITH, 2011). Seja qual o meio de transporte utilizado, os módulos terão suas dimensões restritas a essas possibilidades de transporte (NA, 2007), sendo necessário, na maioria dos casos, unir mais de um módulo para compor a edificação pretendida.

Por tratar-se de construções pré-fabricadas, esse sistema precisa se adequar à produção industrializada, ocasionando a repetição e padronização. Na padronização, produtos e processos são utilizados para conseguir maior uniformidade e repetibilidade, disponibilizando qualidade com custo menor (MULLENS, 2011). Essa repetição dificulta fazer um projeto arquitetônico com formas e espaços únicos, como anseiam arquitetos e clientes. Devido à sua preocupação com o projeto e o design, arquitetos e engenheiros preferem processos de fabricação personalizados (ANDIA; SPIEGELHALTER, 2015), visto que a produção em massa trabalha com a uniformidade de produtos para proporcionar baixo custo (THUESEN; JENSEN; GOTTLIEB, 2013).

No sistema modular volumétrico, a edificação, seja em nível de projeto ou construção, surge combinando os blocos tridimensionais com dimensões pré-definidas. Assemelha-se mais a uma montagem de caixas (GARRISON; TWEEDIE, 2008) e difere-se das construções tradicionais feitas diretamente no sítio.

As empresas geralmente utilizam o prisma retangular como forma dos módulos, que, quando combinados lado a lado, tende a gerar formas retangulares similares. Pouco utilizados pelas empresas, os prismas trapezoidais unidos lado a lado geram edificações com curvatura. Ao promover outras relações espaciais entre os blocos, como o deslocamento entre eles, novas composições são alcançadas (TERIBELE; TURKIENICZ, 2019).

Independentemente da sua forma, os módulos são conectados entre si por meio do conjunto conectivo nos pontos de junção (TERIBELE; TURKIENICZ, 2019), pois os blocos precisam ser fixados entre si para garantir a estabilidade do conjunto (LAWSON; OGDEN; GOODIER, 2014). Para facilitar a produção industrial, esses locais de junção precisam estar previamente determinados na estrutura do módulo. Geralmente localizados nas extremidades (vértices) dos blocos, pode haver necessidade de mais pontos de junção quando há composições com deslocamento ou rotação entre blocos, ocasionando junções de vértices com meio de viga além das junções canto com canto de módulo (TERIBELE, 2016).

Para combinar os módulos e gerar variabilidade compositiva, além de propor diferentes relações espaciais entre blocos e antecipar os locais de junção, seria interessante combinar diferentes tipos de módulos. Além de prever o deslocamento entre eles, a pesquisa sugere que se planeje a combinação de blocos de diversos tipos geométricos, unindo prismas trapezoidais e retangulares, explorando a multiplicidade formal. Como, em geral, a construção modular se adapta bem a programas que contemplam ambientes repetidos, como hotéis e escolas, onde múltiplas unidades modulares são usadas (LAWSON et al., 2005), essa variação compositiva proposta contribuiria para atender diferentes programas e ampliar o uso desse sistema, pois haveria diferentes resultados espaciais e formais disponíveis.

O sistema modular volumétrico precisa pensar em maneiras de ampliar sua capacidade de gerar alternativas compositivas e espaciais ao mesmo tempo que se mantém adequado à produção industrializada, ou seja, usando padronização e repetição. Por isso, ter vários tipos de módulos, com tamanhos diferentes e diversos locais de fixação prejudicaria o processo industrial, pois a variedade de componentes afeta a produção negativamente (MOHAMAD et al., 2013). Desse modo, a busca por multiplicidade, por meio do estudo de combinações entre 02 tipos de blocos modulares ocorreria dentro da repetição de unidades padrões produzidas na fábrica, visto que a capacidade de criar produtos novos e inovadores auxilia o sistema a ser competitivo (HVAM et al., 2013).

O objetivo deste texto é demonstrar alternativas combinatórias entre blocos de tipos diferentes (prismas retangular e trapezoidal) considerando as medidas de transporte terrestre no Brasil e a coordenação dimensional que definem os locais dos pontos de junções na estrutura do módulo. Desse modo, a indústria do setor poderá vislumbrar novas possibilidades formais e espaciais considerando questões de repetição e padronização.

Sistema modular volumétrico

Smith (2011) usa os termos *prefabrication*, *offsite fabrication* e *offsite production* de modo intercambiável, significando elementos destinados à construção de edifícios produzidos fora do local de implantação com maior grau de acabamento e montados no terreno.

No âmbito da pré-fabricação, o sistema modular volumétrico possui o maior grau de industrialização (SMITH, 2011) e, portanto, traz os maiores benefícios e os maiores desafios da construção pré-fabricada. Os benefícios provêm de grande precisão e previsibilidade, pois os blocos são construídos em ambiente controlado, o que possibilita também condições de trabalhos mais seguras (SMITH, 2011). Como as unidades volumétricas são transportadas da fábrica para o terreno com 85% de finalização (SMITH, 2011), o que inclui tubulações, revestimentos e estrutura, o terreno onde a edificação será implantada é preparado simultaneamente, permitindo diminuição de tempo de execução. As dimensões permitidas para o transporte são definidoras da fragmentação do edifício em módulos (unidades volumétricas) (GASSEL; RODERS, 2006) construídos na indústria e unidos no local de implantação. Assim, operam-se, simultaneamente, o terreno e a fábrica, os dois locais de construção (GARRISON; TWEEDIE, 2008). A Figura 01 ilustra o processo de construção utilizado para o sistema em questão.

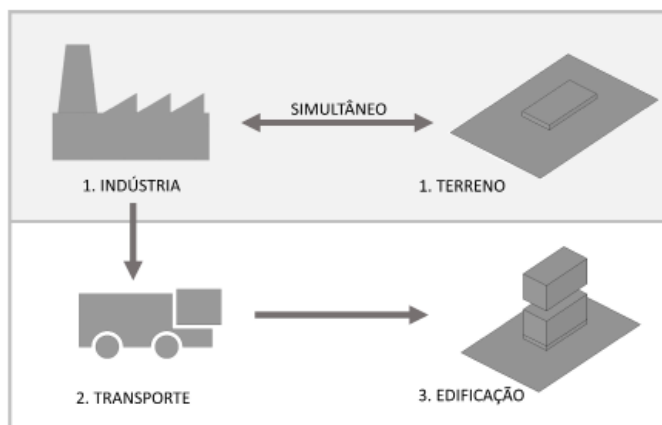


Figura 1: Processo de construção do Sistema Modular Volumétrico

Fonte: Autores.

Esse método construtivo permite a expansão vertical ou horizontal da edificação (YORKON, 2013) por meio da montagem dos blocos prismáticos. Como construtores de todo o mundo desenvolveram seus próprios sistemas (GASSEL; RODERS, 2006), cada um apresenta suas próprias características de conexão e forma do módulo, propiciando aspectos formais específicos no espectro das possibilidades combinatórias permitidas por cada um deles (TERIBELE, 2016).

A maioria caracteriza-se por blocos retangulares combinados lado a lado, e/ou empilhados, sem deslocamentos entre os blocos, gerando formas prismáticas maiores. A falta de variação pode acarretar composições arquitetonicamente semelhantes, fator que vem inibindo o uso generalizado desse tipo de construção (AZHAR; LUKKAD; AHMAD, 2012).

Poucos possuem outros formatos, como os prismas trapezoidais demonstrados na patente *Modular Construction* (TREMBLAY, 2010), que permitem edifícios em curvaturas quando postos lado a lado. Somam-se, com a forma do bloco, os seus próprios atributos conectivos baseados nos elementos estruturais que definem a unidade volumétrica. A Figura 02 ilustra alguns sistemas existentes, demonstrando as características de cada um deles, bem como algumas possibilidades combinatórias, pois os atributos conectivos e os locais definidos nos pontos de junção permitem composições com deslocamento, ou não, entre as unidades volumétricas. Ao mesmo tempo, a forma do módulo prismático pode influenciar a forma final da construção.

De qualquer modo, falta aprofundar estudos que combinem tipos diferentes de módulos, adequando-os à padronização industrial. A metodologia a seguir visa ampliar esses estudos.

SISTEMAS	CONEXÃO LADO A LADO	CONEXÃO EMPILHAMENTO	POSSIBILIDADES COMPOSITIVAS
A			
B			
C			
D			
E			

Figura 2: Exemplos de Sistemas Modulares Volumétricos baseado em a) (KOVEL, 2011); b) (LAWSON, 2007); c) (HEATHER et al., 2007); d) (TREMBLAY, 2010); e) (ANDERSON; ANDERSON, 2007).

Fonte: (TERIBELE; TURKIENICZ, 2019).

METODOLOGIA

Seguindo uma pesquisa-ação que além da pesquisa demanda também ações nas áreas práticas (TRIPP, 2005), o procedimento foi dividido em 04 etapas, descritas a seguir e ilustradas na Figura 03. A primeira trata-se da definição do tamanho dos módulos e dos locais para os pontos de junções. As demais visam à variabilidade compositiva com dois tipos de módulos diferentes, iniciando com combinações entre blocos de mesmo tipo. Essas etapas são:

1. Definição do tamanho dos módulos considerando a legislação brasileira de transporte terrestre e definição da coordenação dimensional, medida base estabelecida para definir os locais de fixação entre blocos.

2. A etapa “Compositiva A” define combinações com 02 módulos de mesmo tipo baseado em grupos de simetria plana, mais especificamente nas regras usadas para gerar o “friso”. Aplicado para prisma retangular e para prisma trapezoidal separadamente.

3. A etapa “Compositiva B” define possibilidades compositivas unindo módulos de diferentes tipos de prisma (retangular e trapezoidal), introduzindo novas formas nas relações espaciais estabelecidas na etapa compositiva A.

4. A etapa “Compositiva C” explora alternativas compositivas por meio da aplicação de regras: friso e cíclico, nas composições geradas na etapa anterior.

Os módulos e os pontos de junção foram desenhados em software CAD. Os estudos compositivos de todas as etapas foram feitos no software *AutoCAD* (Autodesk) e no *SketchUp* (Google).

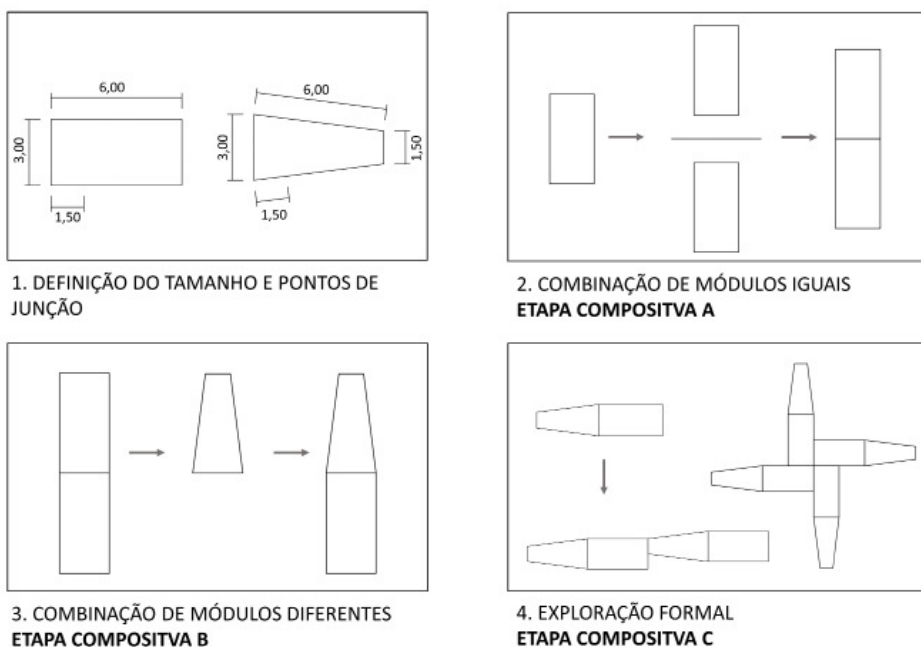


Figura 3: Etapas realizadas na metodologia, medidas em metros

Fonte: Autores.

Tamanho dos módulos e definição dos pontos de junção

Relacionando com a cadeia produtiva do setor automobilístico (KIERAN; TIMBERLAKE (2003), os módulos (unidades volumétricas) podem ser entendidos como o produto final decomposto em série de submódulos: estrutura, vedação, cobertura, etc., que, por sua vez, são divididos em seus próprios componentes. No caso do submódulo-estrutura, os componentes são pilar, viga e conexão (TERIBELE, 2016), e pode ser entendido como um “chassi”, um sistema estrutural base no qual elementos intercambiáveis são anexados (SCHOENBORN, 2012). Dessa forma, esses chassis podem ser produzidos em massa, permitindo a combinação entre eles, usando-se o conceito de modularidade (PIROOZFAR, 2013), bem como a complementação com a variação na vedação do edifício sobre essa estrutura constante. Adaptam-se à Arquitetura Modular do Produto, na qual módulos e componentes são unidos em um sistema coerente (MELLO; MARX, 2007) com uma função e uma interface bem definida (HVAM et al., 2013).

Para que os blocos possam ser combinados entre si, eles precisam ter medidas padronizadas que se inter-relacionam, a chamada coordenação dimensional (CIRQUEIRA, 2015), permitindo a conexão entre eles a partir dos pontos de junção. Auxiliam na customização em massa e na capacidade de projetar e produzir produtos diversos entre si de modo rápido e competitivo economicamente (MULLENS, 2011; PIROOZFAR; PILLER, 2013).

Este trabalho limita-se a estudar combinações entre os submódulos-estrutura, utilizando duas formas: prisma retangular e prisma trapezoidal, cada um com dimensões definidas, visando à combinação entre eles nos pontos de junções. É necessário definir em quais locais essas junções devem ocorrer para antecipar a execução na indústria e permitir a padronização. Dentro de um sistema configuracional, que é feito com o auxílio de regras que estabelecem restrições (HVAM et al., 2013), os pontos de junção foram definidos observando uma coordenação dimensional entre eles. Essa coordenação dimensional utiliza a coordenação modular, visto que considera uma medida múltiplo de 100mm, o módulo da coordenação modular (CIRQUEIRA, 2015). Essa medida dimensional, ou seja, o módulo-medida usado para gerar a base do módulo modular volumétrico, foi relacionada com a legislação brasileira para transporte terrestre, pois os módulos das unidades que formarão o edifício final são transportados praticamente finalizados para o terreno.

As dimensões autorizadas para veículos transitarem por vias terrestres no Brasil, com ou sem carga, correspondem a uma largura máxima de 2,60m e a uma altura máxima de 4,40m, sendo que o comprimento total é variável de acordo com o tipo de veículo, podendo chegar a 14,00 metros para veículos não articulados (CONTRAN, 2006). É possível transportar uma carga indivisível com largura total de até 3,20 metros e comprimento total de até 30 metros por meio de uma autorização especial de trânsito (AET), com prazo de validade de até 01 (um) ano (DNIT, 2016).

O tamanho dos módulos foi definido considerando a medida máxima para transporte no Brasil com autorização especial de trânsito, que é de 3,20 metros. Dessa largura, diminuíram-se espessuras de paredes e a materialização das conexões, que foram consideradas pelo seu eixo nos pontos de junção. Aqui consideraram-se paredes de 10cm de espessura, sendo o módulo desenhado no seu eixo central. Assim, a medida externa final dos módulos seria de 3,10 metros de largura, sobrando 5 cm de cada lado, para eventuais saliências de detalhes arquitetônicos e/ou construtivos.

Desse modo, a largura menor do retângulo, a base do prisma retangular, foi definida em 3,00 metros. Isso gerou medidas dimensionais de 1,50 metros entre os pontos de junção. Multiplicando essa medida, definiu-se o comprimento do módulo retangular, que totalizou 6,00 metros. Para o trapézio, base do prisma trapezoidal, a frente menor ficou com um módulo de 1,50 metros, enquanto a frente maior ficou com 3,00 metros (2 unidades de medida dimensional), e as laterais, com 6,00 metros. Ambos os prismas totalizaram 4 unidades de medida dimensional na sua face lateral. No caso

do prisma trapezoidal, essas medidas ocasionaram ângulos internos de 83° e 97°, considerando medidas inteiras. A Figura 04 ilustra as características dimensionais dos prismas trabalhados.

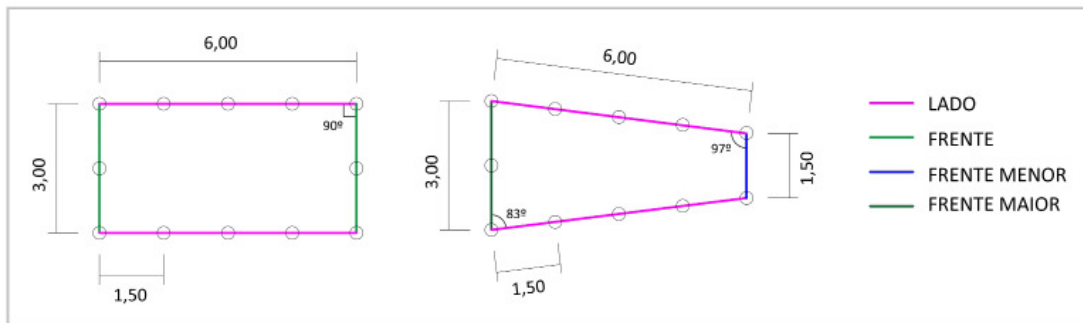


Figura 4: Desenho com as medidas totais, medida dimensional, ângulos dos prismas e nomes das partes utilizados no artigo, medidas em metros

Fonte: Autores.

Composição com mesmo tipo de módulo – etapa compositiva A

Inicialmente, foram propostas combinações com 02 unidades de blocos de mesmo tipo para servirem de base para as composições com blocos de tipos diferentes entre si. Essas combinações iniciais de dois módulos foram baseadas no conceito de grupos de simetria plana apresentado por March e Steadman (1971). Considerando a matemática moderna, a simetria é definida por grupos de transformações euclidianas (SCHREINER, 2009). Rotação, translação e reflexão são transformações congruentes, ou seja, mantêm o tamanho e a forma do objeto (POTTMANN et al., 2007). Também chamadas de transformações geométricas, são exploradas por March e Steadman (1971) nos grupos de simetria plana.

Utilizando as transformações geométrica sobre o plano xy, os grupos de simetria plana são classificadas de acordo com a sua estrutura de translação. Entre os 03 tipos: central — não usa nenhuma translação; friso — usa uma translação somente; e papel de parede — usa translação em mais de uma direção (MARCH; STEADMAN, 1971; SCHREINER, 2009), esta etapa do trabalho utilizou o friso para gerar composições com 02 blocos de mesmo tipo. Apesar de usar as regras de transformações geométricas aplicadas para o friso, a repetição da translação lateral não foi considerada. Ou seja, aplicou-se a regra para gerar a composição com 2 módulos, mas sem repeti-las lado a lado, como seria a proposta do friso.

Os 7 grupos de friso proposto por March e Steadman (1971) são: a) translação ao longo do eixo; b) reflexão no eixo; c) reflexão perpendicular ao eixo; d) reflexão e translação com deslizamento; e) meia-volta; f) reflexão (pares) no eixo; g) reflexão (pares) com deslize. Além dessas regras, para ambos os prismas, foram propostas mais 3 regras: h) regra de reflexão e translação com deslize perpendicular ao eixo; i) regra de giro 90° com deslize e; j) meia-volta com deslize. A Figura 05 demonstra exemplos de regras de friso que consideraram ambos os prismas posicionados com seu eixo longitudinal de modo vertical para iniciar a aplicação da regra. O outro sentido do prisma não foi considerado para a aplicação das regras, ou seja, com eixo menor posicionado verticalmente. Para regras com reflexão no trapézio, usou-se o eixo coincidindo com o lado da figura. Além disso, para o prisma trapezoidal, como há lado maior e lado menor, as regras que envolviam eixo para translação e/ou reflexão foram aplicadas considerando essa variação, ou seja, foram aplicadas duas vezes, uma para cada frente (maior e menor) sempre que possível.

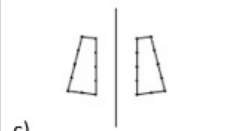

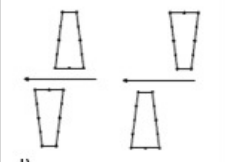
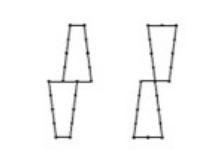
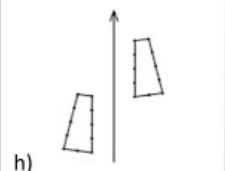
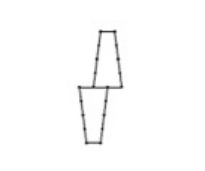
Processo	Resultado
c) 	
d) 	
h) 	

Figura 5: Exemplo de regras de friso aplicadas no prisma trapezoidal na etapa compositiva A. Essa etapa considera módulos de mesmo tipo formal

Fonte: Autores.

Composições que permitem o deslocamento na lateral do módulo, pela aplicação da translação, não foram repetidas para todos os pontos de junção. Para este trabalho, contabilizou-se 01 forma para o deslocamento lateral, considerando o meio do lado como ponto de junção.

Composição com tipo diferente de módulo — etapa compositiva B

As relações espaciais estabelecidas entre os elementos são a base das regras de composição (KNIGHT, 1994), definindo as maneiras pelas quais as formas devem ser combinadas. Essas regras podem ser alteradas por meio de: adição de regras; exclusão de regras e mudança de regras. Esta última pode ser alcançada mudando os marcadores espaciais (locais de aplicação das regras) ou as relações espaciais. Por sua vez, as relações espaciais podem ser modificadas mediante a introdução de novas formas, redimensionamento ou reposicionamento de formas (KNIGHT, 1994).

Neste trabalho, foi utilizada a introdução de novas formas nas relações espaciais pré-estabelecidas (KNIGHT, 1994) para conseguir composições utilizando os dois tipos de módulos. Assim, em cada composição resultante da etapa compositiva A, um prisma de outro tipo foi substituído na composição original, resultando em composições com 02 tipos de prismas diferentes entre si. Ou seja, o primeiro retângulo da composição foi substituído por um trapézio e vice-versa, substituindo uma forma existente na relação espacial já estabelecida, como demonstra a Figura 06. Aqui os módulos prismáticos de base retangular e trapezoidal são visualizados em vista superior e, por isso, tratados como retângulo e trapézio.

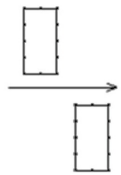
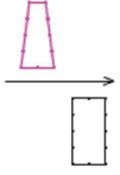

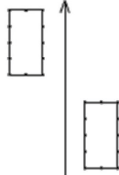
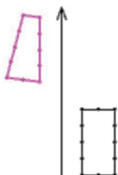

Processo anterior	Introdução novas formas	Resultado Final
		
		

Figura 6: Exemplo de introdução de novas formas nas relações espaciais pré-estabelecidas. Essa etapa insere outro tipo de módulo nas combinações estabelecidas anteriormente de mesmo tipo de prisma

Fonte: Autores.

Foram consideradas válidas as composições que permitem encontro entre faces dos blocos, pois, nesses casos, é possível a integração dos espaços para atender a diversos programas, mesmo que esse encontro seja parcial. Desse modo, as composições cujos blocos se encontram somente por um vértice e as composições que geram um espaço diminuto entre blocos foram descartadas.

Exploração formal – etapa compositiva C

Para testar as possibilidades compositivas, as formas geradas com módulos diferentes entre si e validadas na etapa B foram aplicadas usando as regras de grupos de simetria plana central e friso.

No central, foi usada a opção “cíclico”, na qual a regra de rotação é aplicada a partir de um ponto. O “diédrico”, que inclui a reflexão e rotaciona os dois elementos (MARCH; STEADMAN, 1971), não foi utilizado, pois as formas iniciais para a aplicação da rotação já são formas compostas, ou seja, mais de 01 bloco na forma inicial de geração. O centro de rotação foi definido a partir de um vértice externo da composição, sendo considerada a aplicação da regra mais de uma vez para cada combinação, como ilustra a Figura 07. Como a composição é formada por dois prismas distintos, diferentes vértices foram utilizados como eixo para verificar o resultado formado.

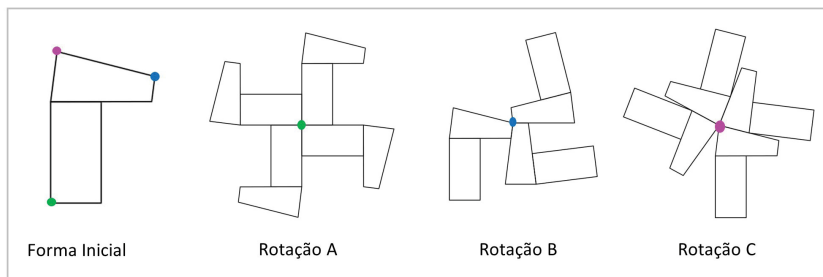


Figura 7: Eixos de rotação utilizados para a aplicação do “Cíclico” na etapa compositiva C

Fonte: Autores.

No caso do trapézio, polígono base do prisma trapezoidal, como a angulação interna é diferente em relação à frente maior e à frente menor da figura, houve variação do ângulo de rotação, dependendo de qual era o lado que estava “para fora” da composição, podendo ser 83° para lado menor e 97° para lado maior, enquanto o retângulo, polígono base do prisma retangular, é de 90°. Em uma composição, a mesma regra foi aplicada em dois vértices distintos, um no lado maior e outro no lado menor.

No caso do friso, as composições geradas nessa etapa sofreram translação no eixo x, repetindo-as 3 vezes. Isso foi feito considerando a composição na posição 0° e na posição 90° de cada composição, como demonstrado na figura 08. Ou seja, cada forma foi posicionada de duas maneiras e depois foi aplicada a regra de translação no eixo x. Além disso, devido à característica geométrica dos prismas, em alguns casos, a regra de translação foi adaptada para gerar formas válidas e explorar novas possibilidades compositivas. Quando a translação não permitia o encontro das faces devido à angulação do trapézio, a translação foi feita junto com a rotação, como demonstra o item B da figura 08. E, quando o deslocamento no eixo x não permitia o encontro nos pontos de junção pré-definidos, a composição inicial foi deslocada tanto no eixo x como no eixo y, para possibilitar o encontro dos pontos pré-determinados, como ilustra o item D da Figura 08.

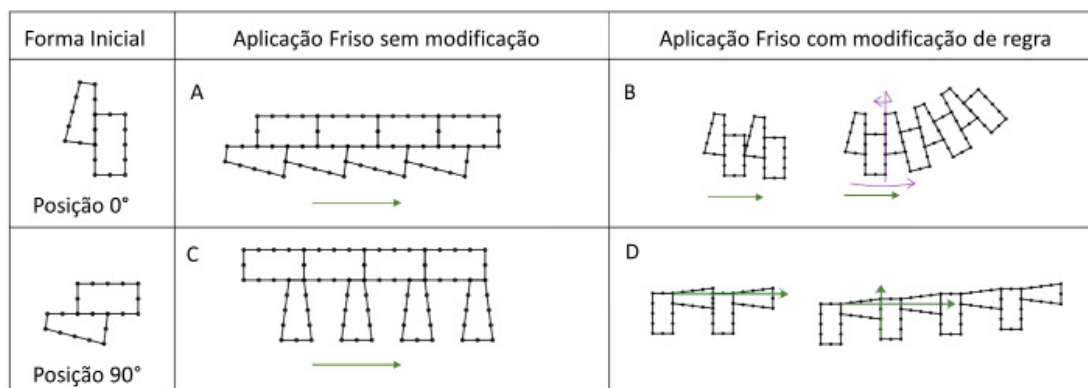


Figura 8: Exemplos de aplicação das regras para exploração formal

Fonte: Autores.

Depois, essas formas geradas com prismas de tipo retangular e trapezoidal foram distribuídas em uma tabela, separando-as pelo tipo de encontro gerado: 1) conexões nos cantos dos prismas; 2) conexões no meio do vão; 3) conexões em $\frac{1}{4}$ de vão, visando estudar quais junções são usadas em cada tipo de regra aplicada.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente, as dimensões dos dois tipos de módulos foram definidas utilizando a coordenação dimensional e as medidas para transporte terrestre no Brasil. Esses módulos passaram por etapas compositivas para que combinações com prismas retangular e trapezoidal pudessem ser exploradas.

Na etapa compositiva A, geração com mesmo tipo de módulo, algumas composições com prisma retangular geraram resultados iguais a outros. A regra translação ao longo do eixo deu o mesmo resultado que a regra reflexão perpendicular ao eixo, assim como a regra de meia-volta com deslize, que resultou igual à aplicação de regra reflexão e translação com

deslize. A regra meia-volta não gerou uma forma válida, pois os dois retângulos bases se encontraram apenas no vértice. No prisma trapezoidal, a translação ao longo do eixo para trapézio não gera uma forma válida, pois é preciso rotacionar a segunda forma para elas se encontrarem. Além disso, devido à característica da regra aplicada, algumas formas geradas nessa etapa resultaram em composição com mais de 02 módulos. Como resultado dessa etapa, obtiveram-se 09 formas com prisma retangular e 13 formas com prisma trapezoidal. De qualquer modo, para a etapa seguinte, utilizaram-se todas as formas como base para a introdução de novas formas nas relações espaciais estabelecidas em ambos estudos, seja com prisma retangular e/ou trapezoidal. Esses prismas são relatados a seguir pelo polígono de sua base: retângulo e/ou trapézio.

Nas formas geradas na etapa compositiva B, geração com tipo diferente de módulo, as duas composições que tiveram dois retângulos substituídos por dois trapézios não foram validadas, pois resultou um espaço vazio entre esses prismas, de difícil aproveitamento funcional. Da mesma forma, quando o retângulo substituiu o trapézio, resultando em um encontro de face menor do trapézio com frente de retângulo, não houve forma válida, pois não teve encontro dos pontos de junção. O lado menor do trapézio (01 unidade de medida dimensional) junto com a frente do retângulo (02 unidades de medida dimensional) só é válido em composições cujo lado menor está alinhado pelo vértice, e não pelo centro. Outras formas ficaram simétricas a outras composições geradas por outras regras, ou seja, a reflexão do conjunto iguala-se a composições já realizadas, sendo eliminadas por similaridade. Dessa forma, esta etapa resultou em 17 formas com os dois tipos de prismas, com 2 blocos por composição, com exceção de 01 combinação com 03 blocos proveniente da regra reflexão com deslize.

Na etapa compositiva C, a exploração formal se deu por meio da aplicação do cíclico e friso. O cíclico proporcionou composições com eixo de rotação tanto no retângulo como no trapézio, neste último, feito tanto a partir do vértice do lado menor como do lado maior. Várias formas não foram validadas com o uso dessa regra, pois geraram sobreposição entre si e/ou um pequeno espaço entre elas, dificultando o seu uso caso realizada a construção.

As formas geradas no cíclico são influenciadas pelo ângulo interno do local do eixo de rotação. No caso do retângulo, com eixo de rotação no vértice de 90°, as formas vão se encontrar em todas as faces, pois completam 360°. Devido à diferente angulação interna da figura, as composições geradas com o trapézio, seja com eixo pelo lado menor, seja pelo lado maior, não completaram o círculo todo, pois a soma dos ângulos internos dos módulos combinados não totaliza 360°. Nas formas geradas por rotação com eixo na face menor do trapézio, as formas totalizam 291°. As composições pelo lado maior do trapézio totalizam 332°, sobrando um espaço diminuto entre os últimos blocos. Nesse caso, talvez fosse mais interessante não usar 4 conjuntos formais na rotação, pois o espaço que sobra entre os blocos rotacionado fica reduzido. Com 03 conjuntos, o ângulo no eixo de rotação seria 249°, como ilustra a figura 09.

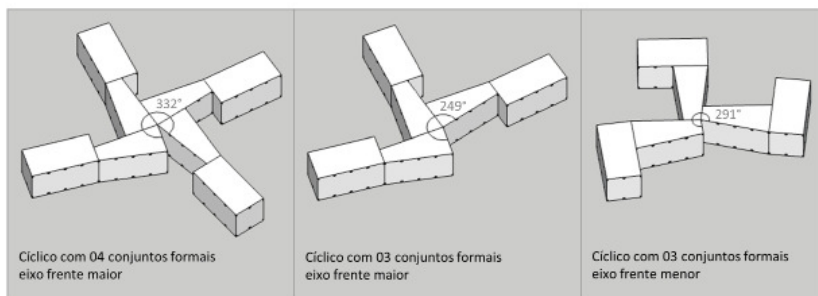


Figura 9: Exemplos de composições usando o cíclico

Fonte: Autores.

Nesta etapa compositiva C, quando da aplicação do friso, 03 situações ocorreram:

1. As composições cujas frentes do trapézio (maior e/ou menor) ficaram perpendiculares ao eixo x de translação geraram novos pontos de junção e, por isso, não são válidas. Os deslocamentos são determinados em função da medida estabelecida na coordenação dimensional e devem ocorrer para unir as junções estabelecidas. Nesses casos, foi necessário deslocar as composições também no eixo y, para permitir o encontro dos pontos.

2. As composições cujas frentes e/ou lado do retângulo ficaram perpendiculares ao eixo x de translação e se encontravam lado a lado não precisaram de alteração da aplicação da regra. Mas algumas dessas formas ocasionaram um espaço diminuto entre os prismas trapezoidais que fazem parte da composição inicial e, por isso, foram descartadas.

3. As composições cujos lados do trapézio ficaram perpendiculares ao eixo x de translação ficaram unidas por apenas um vértice ou geraram sobreposição das formas. Ou seja, quando o friso gerava o encontro com a lateral do trapézio, houve desencontro de faces, por causa da forma angular do bloco em prisma trapezoidal. Nesse caso, optou-se por mesclar a regra de translação com a regra de rotação e gerar formas válidas.

Algumas composições ocasionaram a geração de vazios que podem ser utilizados para pátios externos e proporcionar projetos voltados para integração interior/exterior. Como resultado compositivo também foi observado um plano angular, permitindo seu uso para a marcação de acessos e hierarquização de espaços, por exemplo. Outras possibilitaram gerar formas com curvatura suave, seja entre prisma trapezoidal ou mesclando os dois tipos de prismas lado a lado, pois o centro da rotação ficou afastado dos prismas. É possível identificar algumas organizações formais: linear, radial e centralizada, bem como outras que remetem a uma organização aglomerada. De qualquer modo, demonstram algumas possibilidades de variabilidade compositiva com 02 tipos de prismas, pois não foi objetivo deste trabalho esgotá-las. A figura 10 ilustra algumas composições geradas.

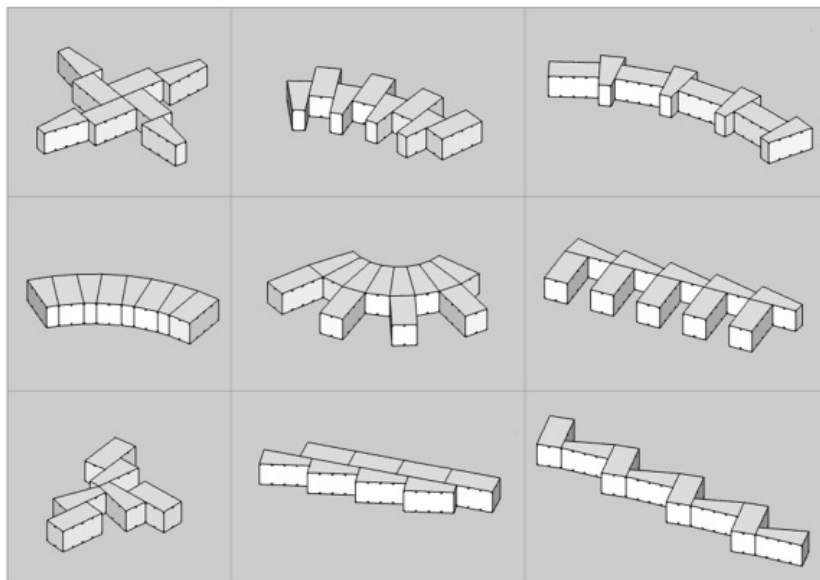


Figura 10: Perspectivas demonstrando algumas das composições geradas

Fonte: Autores.

Apesar do foco deste trabalho ser combinações de tipos diferentes entre si, combinações com blocos de mesmo tipo podem ser explorados em paralelo. Isso amplia o leque de alternativas utilizando os mesmos elementos produzidos pelo sistema. Para isso, o resultado da etapa A pode ser aplicado na etapa C, assim como outras regras podem ser incluídas.

Também foi possível relacionar as características compositivas e os pontos de junção utilizados. Na etapa compositiva B, 07 formas de um total de 17 proporcionaram junção em $\frac{1}{4}$ da lateral de vão, 01 unidade dimensional, em pelo menos um dos prismas. Isso ocorreu nas composições que têm deslocamento, de $\frac{1}{4}$ de vão para ambos os prismas, e nas composições cujo prisma trapezoidal se une ao prisma retangular por sua face menor na face lateral do retângulo. Esse último caso se repetiu em algumas situações da etapa C quando da aplicação do friso. Também na etapa C, as composições de rotação cujo eixo é um dos vértices da face menor do trapézio proporcionaram esse tipo de encontro. Nessas configurações, serão necessários pontos de junção de medida dimensional básica, como demonstra a figura 11. Caso a indústria do setor queira diminuir os pontos de junção previstos, pode analisar quais tipos de composição proporcionam essas situações e quais não, de modo a avaliar o que é interessante para o processo produtivo e a disponibilidade combinatória.

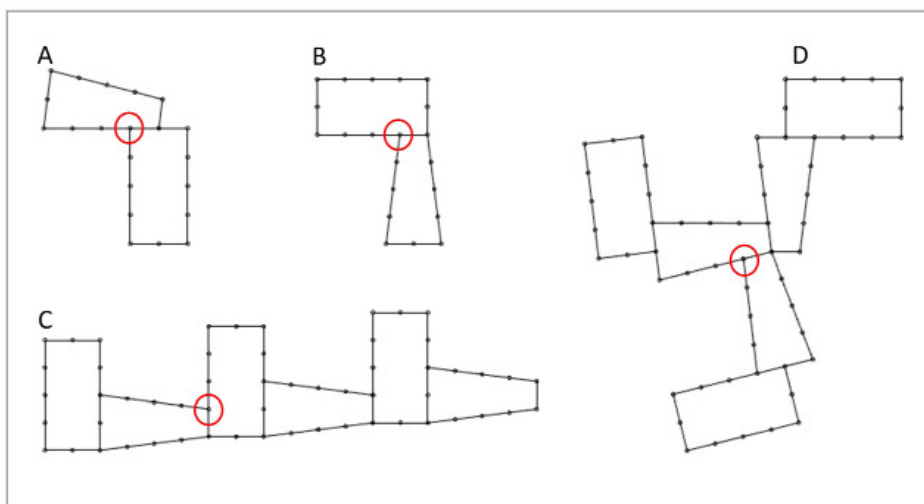


Figura 11: Exemplos de composições que utilizam junção de $\frac{1}{4}$ de vão, sendo: A — deslocamento de $\frac{1}{4}$ de vão; B e C — face menor do trapézio com lado do prisma e; D — rotação com eixo no lado menor do trapézio.

Fonte: Autores.

Apesar da padronização e repetição de dois tipos de módulos, a flexibilidade formal foi demonstrada, fato que poderá contribuir com a indústria do setor.

CONCLUSÕES

Considerando que o sistema pré-fabricado Modular Volumétrico precisa compatibilizar a racionalidade da produção industrializada com a disponibilização de variabilidade compositiva, o objetivo deste trabalho foi demonstrar alternativas combinatórias entre blocos de tipos diferentes (prismas retangular e trapezoidal) considerando as medidas de transporte terrestre no Brasil e a coordenação dimensional que definem os locais dos pontos de junções na estrutura do módulo.

As composições geradas mostraram diversidade de organização formal como soluções lineares e radiais, entre outras. A mescla de trapézio junto com retângulo permite edificações com curvatura, face angular,

pátios, saliências de blocos e outros aspectos formais promovidos pelas características geométricas dos prismas e das configurações geradas. Além disso, a coordenação dimensional determinada para ambos os prismas atendeu à maioria das combinações propostas. Algumas tiveram de sofrer adaptação da regra compositiva para gerar composição cujos pontos de junção se encontram, como as que unem a frente menor do trapézio com a frente do retângulo, mas que propiciaram resultado formal válido. De qualquer modo, o estudo demonstrou maneiras de ampliar alternativas compositivas e espaciais ao mesmo tempo que se mantem adequado à produção industrializada, ou seja, usando padronização e repetição de dois tipos de módulos.

O estudo de alternativas combinatórias, em paralelo com os pontos de junções, permite planejar as composições com a racionalidade necessária à produção industrializada, ampliando a personalização das edificações para além da camada superficial do edifício, e contribui para aumentar o uso deste sistema, pois, caso aplicado, poderá atender outros programas arquitetônicos para além daqueles que se relacionam com a repetição de espaços, como escolas e hotéis. Soma-se a possibilidade de romper com o preconceito existente sobre as construções pré-fabricadas, ainda associadas a monotonia e repetição. Além disso, o estudo de combinação entre blocos poderá contribuir para que arquitetos e demais profissionais do setor visualizem, além das possibilidades combinatórias entre os módulos de mesmo tipo, combinações entre módulos de tipos diferentes, aspecto pouco explorado na literatura.

A importância deste trabalho é mostrar ao setor a possibilidade de ampliar a variabilidade compositiva dentro da padronização exigida pela produção industrializada, que, aqui, ocorre por meio da definição de duas formas para o módulo, da relação dimensional entre eles e da definição dos locais de junções. Trabalhos futuros poderão definir as características conectivas para efetivar as ligações entre os blocos definidos no presente estudo, bem como qual forma de módulo melhor se adapta a cada programa proposto, incluindo a distribuição do mobiliário para ambos os tipos de prismas. O estudo de mobiliário pode ser ampliado para estudos de funcionalidade, similar ao que foi proposto por Longsdon et al (2019) ao mapear o mobiliário existente no mercado analisando-os para moradias sociais bem como estudar a funcionalidade e flexibilidade em Habitações de Interesse Social (LONGSDON, 2019).

É possível a indústria do setor aplicar o método proposto para definir quais combinações serão disponibilizadas pelo seu próprio sistema, antecipando e otimizando os pontos de junções necessários, preparando-se para essa possibilidade de variabilidade compositiva sem a necessidade de alterar a produção para cada projeto encomendado. Caso a empresa prefira trabalhar com outras medidas de módulo, o método pode ser aplicado tanto para definir o módulo base como a coordenação dimensional, para definir os locais dos pontos de junção. Isso possibilitará um estudo futuro de aplicação de gramática de formas, pois as restrições de cada sistema poderão ser definidas e, conseqüentemente, suas possibilidades combinatórias. Ressalta-se que o presente trabalho não visa esgotar essas alternativas, e sim demonstrar possibilidades que poderão ser exploradas dentro dos atributos de cada sistema. Outros trabalhos poderão explorar novas regras para gerar diferentes composições, bem como soluções formais na epiderme do módulo, estudando aberturas, revestimentos e a utilização de outros elementos, como sacadas e marquises, relacionando estratégias de customização em massa.

Além disso, após a indústria definir quais combinações serão disponibilizadas pelo seu sistema específico a partir das possibilidades construtivas estabelecidas, uma programação pode ser realizada para a manipulação de regras combinatórias por arquitetos e usuários, similar ao realizado por José Pinto Duarte na gramática discursiva estabelecida para as casas da Malagueira do arquiteto Álvaro Siza (DUARTE, 2007). Outro exemplo de programação é encontrado no estudo de Mororó et al (2016) para Habitações de Interesse Social. Um ambiente virtual de projeto com procedimentos automáticos por meio de parâmetros e regras foi

realizado demonstrando que as tecnologias digitais podem contribuir para a automação do processo e disponibilizando um ambiente de apoio aos arquitetos.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, Mark; ANDERSON, Peter. **Prefab Prototypes: Site-Specific Design for Offsite Construction**. New York: Princeton Architectural Press, 2007.
- ANDIA, Alfredo; SPIEGELHALTER, Thomas. Post-Parametric Automation in Construction. In: **Post-Parametric Automation in Design and Construction**. [s.l.] : Artech House, 2015. p. 141-144.
- AZHAR, Salman.; LUKKAD, Maulik.; AHMAD, Irtishad. Modular v. stick-built construction: Identification of critical decision-making factors. **48th Annual Conference of Associated Schools of Construction**, [s. l.], v. 1, n. May, p. 1-8, 2012.
- CIRQUEIRA, Clarissa Belle De Rezende Pimentel. **A coordenação modular como ferramenta de projeto de arquitetura e levantamento de componentes normatizados no mercado da construção civil do Distrito Federal**. 2015. 117 f. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2015.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Resolução nº 210 de 13 de novembro de 2006**. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitam por vias terrestres e dá outras providências. Ministério das Cidades. Brasília, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Resolução nº 01 de 14 de janeiro de 2016**. Dispõe sobre o transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso e/ou dimensões e para trânsito de veículos especiais. Brasília, 2016.
- DUARTE, José Pinto. **Personalizar a habitação em série: uma gramática discursiva para as casas da Malagueira do Siza**. Lisboa: Fundacion Calouste Gulbenkian, 2007.
- GARRISON, James; TWEEDIE, Aaron. **Kullman Offsite Construction. Modular Architecture Manual. Kullman Buildings Corporation**. Lebanon: Kullman Buildings Corp, 2008.
- GASSEL, Frans Van; RODERS, Martin. **A Modular Construction System**. How to design its Production Process. RODERS, M. Netherlands: International Conference On Adaptable Building Structures 2006.
- HEATHER, David et al. **Building Modules**, US 2007/0271857 A1, 2007.
- HVAM, Lars et al. Conceptualizing the use of system products and system deliveries in the building industry. In: **Mass customisation and personalisation in architecture and construction**. [s.l.] : Routledge, 2013. p. 67-77.
- KIERAN, Stephen; TIMBERLAKE, James. **Refabricating architecture: how manufacturing methodologies are poised to transform building construction**. New York: McGraw-Hill, 2003.
- KNIGHT, Terry Weissman. **Transformations in design: a formal approach to stylistic change and innovation in the visual arts**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- KOVEL, Jeffrey. **Modular Construction Systems and Methods**, US 2011/0185646 A1, 2011.
- LAWSON, R. M. Building design using modules. **New Steel Constructio**, Ascot, v. 15, n. 9, p. 1-16, 2007. Disponível em: <<http://www.newsteelconstruction.com/wp/building-design-using-modules-2/>>
- LAWSON, Mark; OGDEN, Ray; GOODIER, Chris. **Design in Modular Construction**. London; New York: CRC Press, 2014.
- LAWSON, R. M. et al. Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction. **Structural Engineer**, [s. l.], v. 83, n. 6, p. 28-35, 2005.
- LOGSDON, Louise. **Qualidade Habitacional: Instrumental de apoio ao projeto de moradias sociais**. 2019. 448 f. Tese. (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU-USP), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2019.
- LOGSDON, Louise et al. Funcionalidade e Mobiliário da Habitação: contribuições

para o projeto de moradias sociais. **Arquitetura Revista**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 212-237, 2019. <https://doi.org/10.4013/arq.2019.152.01>

MARCH, Lionel; STEADMAN, Philip. **The geometry of environment : an introduction to spatial organization in design**. 1st U.S. e ed. Cambridge: M.I.T. Press, 1971.

MELLO, Adriana; MARX, Roberto. Conhecimento de Arquitetura de Produto como Elemento Chave para a Manutenção da Capacidade Inovadora de uma Empresa – O caso da Indústria Automotiva. **Revista Gestão Industrial**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 74-88, 2007. DOI:10.3895/S1808-04482007000200006

MOHAMAD, Ahlam et al. Use of modularization in design as a strategy to reduce component variety in one-off projects. **21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2013, IGLC 2013**, [s. l.], p. 285-294, 2013.

MORORÓ, Mayra S. de M. et al. Proposta paramétrica para projetos sustentáveis de Habitação de Interesse Social em ambiente BIM. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 4, p. 27-44, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000400103>

MULLENS, Michael A. **Factory design for modular homebuilding: equipping the modular factory for success**. Winter Park: Constructability Press, 2011.

NA, Lu. **Investigation of the Designers' and General Contractors' Perceptions of Offsite Construction Techniques in the United States Construction Industry**. 2007. 163 f. Tese. (Doctor of Education Career and Technology Education), Clemson University, [s. l.], 2007.

PIROOZ FAR, Poorang. Advancements of mass customisation in service and manufacturing industries: lessons for the built environment. In: PIROOZ FAR, Poorang A. E.; PILLER, Frank T. (Eds.). **Mass customisation and personalisation in architecture and construction**. [s.l.: s.n.]. p. 31-40.

PIROOZ FAR, Poorang A. E.; PILLER, Frank T. **Mass customisation and personalisation in architecture and construction**. [s.l.] : Routledge, 2013.

POTTMANN, Helmut et al. **Architectural geometry**. Exton: Bentley Institute Press, 2007.

SALAMA, Tarek et al. Near optimum selection of module configuration for efficient modular construction. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 83, p.

316-329, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.008>

SCHOENBORN, Joseph M. **A Case Study Approach to Identifying the Constraints and Barriers to Design Innovation for Modular Construction**. 2012. 155 f. Dissertação. (Master of science in Architecture) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2012.

SCHREINER, Fernanda Reis. **Gramática de formas e o mobiliário modular multifuncional: um estudo de caso**. 2009. 122 f. Dissertação. (Mestrado em Design) - Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

SMITH, Ryan E. **Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

TERIBELE, Alessandra. **Arquitetura com sistema pré-fabricado modular volumétrico: modelo generativo e diretrizes de fixação**. 2016. 274 f. Tese. (Doutorado em Arquitetura) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura (PROPAR), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

TERIBELE, Alessandra; TURKIENICZ, Benamy. Generative model and fixing guidelines for modular volumetric architecture. **Revista de la construcción**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 517-530, 2019. DOI: 10.7764/RDLC.17.3.517

THUESEN, Christian; JENSEN, Jens Stissing; GOTTLIEB, Stefan Christoffer. Enabling mass customisation in construction – making the long tail work. In: **Mass customisation and personalisation in architecture and construction**. [s.l.] : Routledge, 2013. p. 208-218.

TREMBLAY, Jean-Robert. **Modular Construction**, WO 2010/142032 A1, 2010.

TRIPP, David. Pesquisa-ação: uma introdução metodológica* Pesquisa-ação-Participação-Investigação-ação-Metodologia de pesquisa. **Educação e Pesquisa**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 443-466, 2005.

YORKON. **Exploding the Myths of Modular Construction**. Find out the facts in this myth-busting report. 2013. Disponível em: https://www.portakabin.lu/uploads/buildinglayoutfiles/building_layout_pdf_file_470_19_TheMythsofmodularConstruction-YKN.pdf

Alessandra Teribele
aleteribele@unisinov.br

Giovanna Paiani Salvador
giovannapaianisalvador@gmail.com