

**A GEOMETRIA NO PROCESSO CLASSIFICATÓRIO DE FORMAS
ARQUITETÔNICAS: ESTUDO COMPOSITIVO COM OBRAS EM MADEIRA
ROLIÇA**

***GEOMETRY ON THE CLASSIFICATION PROCESS OF ARCHITECTURAL FORMS:
COMPOSTIVE STUDY BASED ON PROJECTS WITH ROUND WOOD***

Alessandra Teribele¹

Lucas Sbeghen²

Resumo

Apesar de seus benefícios ambientais e eficiência quando aplicada em edificações, o uso da madeira roliça na AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) ainda é escasso no Brasil. Um dos fatores que contribuem com essa baixa utilização é a escassez sobre o conhecimento de como explorar alternativas compositivas com este material. Delimitando-se a estratégias que geram composições tridimensionais (nível volumétrico/volumetria), este trabalho propõe uma classificação de obras que contemplam a madeira roliça como o seu principal material constituinte da edificação. Relacionando-se com a biologia e o conceito de filogenética, as obras foram agrupadas observando o seu genótipo ao invés de seu fenótipo. Utilizando o método gramática de formas, analisou-se, a partir do corpus de análise, os processos compositivos envolvidos permitindo maior compreensão acerca das soluções existentes. A metodologia proposta, além de agrupar as obras analisadas, gera novas soluções formais não contempladas no corpus de análise. Assim, contribui com a ampliação do conhecimento sobre variação compositiva e demonstra o potencial plástico do material para uso em edificações.

Palavras-chave: gramática de formas; superfícies regradas; superfícies livres; filogenética.

Abstract

Despite its environmental benefits and efficiency when applied to buildings, the use of roundwood at AEC (architecture, engineering, and construction) is still scarce in Brazil. One of the factors that contribute to this low utilization is the lack of knowledge on how to explore compositional alternatives with this material. Limiting itself to strategies that generate three-dimensional compositions (volume level), this work proposes a classification of works which contemplates the use of round wood as the main materiality of its construction. Relating to biology and the concept of phylogenetics, the works were grouped observing their genotype instead of their phenotype. Through the shape grammar method, the compositional processes were analyzed throughout the analysis corpus, allowing a better understanding on the existing solutions. The proposed methodology, besides grouping the analyzed works, generates new formal solutions which were not covered on the analysis corpus. Besides that, it also contributes to the expansion of knowledge about compositional variation and demonstrates the plastic potential of the material for its usage in buildings.

Keywords: shape grammar; ruled surfaces; freeform surfaces; phylogenetics.

1 Professora Doutora, UNISINOS – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil, e-mail: aleteribele@unisinos.br; ORCID: 0000-0002-9562-1664

2 Aluno de Iniciação Científica, UNISINOS - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil, e-mail: lucas_sbeghen@outlook.com; ORCID: 0000-0003-1981-2845

1. Introdução

A tônica deste trabalho envolve obras arquitetônicas com madeira roliça, pois apesar de ser um material de construção renovável e com baixo impacto ambiental, (VALLE, 2000) seu uso ainda é escasso. A falta de tradição em seu uso bem como a escassez de profissionais habilitados são fatores que contribuem para que a madeira ocupe um papel secundário nos canteiros de obra do Brasil (MELLO, 2007).

Na expectativa de compreender os processos compositivos que envolvem elementos roliços de madeira aplicados em edificações, o objetivo é realizar uma classificação identificando e demonstrando os princípios compositivos. A contribuição do trabalho passa pela ordenação do conhecimento, disponibilizada por uma sistematização de obras arquitetônicas com este material, através de abordagem matemática e geométrica.

Estabelecendo uma analogia da arquitetura com as ciências naturais, dois paradigmas são aplicados aos sistemas classificatórios:

- Descrição e classificação baseada na anatomia dos organismos e suas partes. Os sistemas de classificação dos organismos com base em grau de semelhança são utilizados desde os tempos remotos de Aristóteles. Mesmo depois de Darwin, os evolucionistas continuavam trabalhando com o mesmo sistema de classificação que agrupava grupos por semelhança física, aparente. Amorim (2002). Relaciona-se com as teorias defendidas por Lamarck e Cuvier e agrupa os organismos por grau de semelhança. Refere-se à descrição do visível, ou seja, aspectos funcionais e aparentes do organismo. Na arquitetura observa-se essa relação quando as classificações dos edifícios são feitas a partir de afinidade tipológica dos mesmos, teoria de caráter funcionalista (MAYER, 2003).
- Descrição e classificação dos organismos que ocorre pelos elementos não visíveis referem-se à classificação filogenética. O agrupamento não ocorre por mera semelhança, e sim procura acompanhar o processo evolutivo sofrido pelo organismo. Refere-se a princípios generativos que se relacionam as teorias de Darwin (seleção natural) e herança genética (leis de Mendel) onde a evolução das espécies é baseada na seleção natural e adaptabilidade. Descreve os mecanismos de transmissão de genes, invisíveis num primeiro momento. Na arquitetura permite “caracterizar semelhanças e diferenças entre edifícios até agora não identificadas” (MAYER, 2003).

Um sistema classificatório estruturado pela lógica geométrica de geração de formas com elementos roliços de madeira pode ser visualizado como uma descrição dos elementos “invisíveis”, ou seja, dos princípios que movem o objeto arquitetônico para gerarem composições.

O método que proporciona essa descrição dos princípios generativos é a “Gramática de Formas”, um sistema de geração de formas através da associação de um vocabulário a um conjunto de regras. O valor dessa abordagem compositiva da madeira roliça consiste na sua capacidade de descrever, de maneira clara e objetiva, combinações existentes e possíveis a partir de elementos arquitetônicos dados. Neste caso, um segmento de reta, abstração do elemento roliço de madeira. A gramática de formas torna-se o recurso que permite descrever as combinações possíveis com uso da madeira na arquitetura baseando-se nas operações generativas.

A hipótese considera que a compreensão dos conceitos geométricos que envolvem a

geração de formas tridimensionais com elementos roliços de madeira permite a sistematização de uma matriz generativa que contenha as possibilidades compositivas e disponibilize alternativas formais.

Assim como a sistemática filogenética procura, por meio da compreensão da diversidade, elaborar um sistema geral de referência possibilitando a inclusão de novas espécies no sistema, este trabalho pretende elaborar um sistema de classificação que incorpore as obras analisadas e amplie as possibilidades combinatórias. Delimita-se às composições arquitetônicas tridimensionais com elementos roliços de madeira aplicados em edificações, evidenciando os aspectos generativos das obras arquitetônicas estudadas.

2. A Descrição de Obras Com Madeira Roliça

Feita desde os tempos primórdios da cultura, a classificação é utilizada para agrupar objetos semelhantes e separar os não afins (KAULA, 1984). Empregada como modo de organização nas mais diversas ciências contribui para a ordenação do conhecimento. Diferentes maneiras de agrupar obras com madeira roliça são encontradas na arquitetura. O enfoque ocorre pelos seguintes aspectos:

- Estrutural e sistema construtivo – a análise ocorre pela morfologia e tipologia do edifício e as obras são reunidas pelas semelhanças das soluções estruturais e construtivas adotadas. Partel (1999) e Brito (BRITO, 2010) são trabalhos que exemplificam essa classificação.
- Tipológico – agrupa as obras em função da semelhança a um tipo formal previamente definido. Analise a tipologia final, o edifício resultante, como feito por Batista (BATISTA, 2007).
- Funcional – agrupa as edificações verificando as funções para qual se destina o edifício. Ranta-Manaus (1999) mostra obras que utilizam a madeira roliça como material principal de sua construção sendo agrupadas pela função a que se destinam.
- Contexto histórico – analisa as obras examinando a influência do contexto externo e a classificação ocorre pelo resultado da análise obtida. Esse enfoque pode ser encontrado dentro de pesquisas históricas que tratam da madeira na construção como em Dudeque (2001).

Essas classificações citadas acima são baseadas na semelhança dos elementos e não demonstram como ocorre a composição arquitetônica. Não descrevem o processo que gerou a edificação e acabam por verificar o resultado final e aparente da construção.

Para realizar um sistema classificatório baseado nos processos compositivos, apoia-se na relação da arquitetura com ciências naturais. Steadman (1979) indicam que o desenvolvimento da biologia no século XIX provocou um exame mais profundo de paralelismos entre os organismos naturais e artísticos, especialmente em termos de estruturas, processo e, também, aparência externa.

“A partir das teorias de Darwin e Mendel, os sistemas de classificação das Ciências Naturais superam os critérios funcionais” (MAYER, p. 21, 2003). Substituíram a classificação que agrupava por semelhança do organismo, aspecto visível, por uma classificação filogenética, que se caracteriza por analisar e agrupar os organismos observando sua trajetória evolutiva, (KISCHLAT e SCHULTZ, 2000). Kischlat e Schultz (2000) buscam demonstrar como o

entendimento da evolução dos organismos, através de características morfológicas (a parte visível do mesmo), é limitado, indicando o sistema filogenético como mais eficiente e com maior poder de previsão. Procuram identificar os elementos não visíveis ao fazer um agrupamento observando a descendência do organismo, e não somente por semelhança como ocorria anteriormente.

Agrupar as edificações em madeira roliça a partir dos processos que geraram a composição arquitetônica poderá elucidar os princípios combinatórios bem como poderá auxiliar na superação dos limites apresentados pelas classificações existentes até o momento visto que “a proposta tipológica é uma forma classificatória de facilitar tal análise, mas não contemplam todas as construções estudadas” (BATISTA, p. 147, 2007).

Ao propor uma sistemática das obras com madeira roliça baseada na filogenética, ou seja, elementos não visíveis, pretende-se compreender as possibilidades compositivas com este material através da identificação de seus princípios generativos.

2.1. Filogenética na Arquitetura: Processos Generativos e Geometria

A filogenética é um dispositivo de classificação da biologia que observa a história dos organismos. Na arquitetura pode ser utilizado para identificar a coerência entre os processos de composição e os princípios que movem os objetos para criar um arranjo combinatório.

Mantendo o paralelismo entre os organismos naturais e artísticos, a sistemática filogenética empregada para descrever a arquitetura com madeira roliça observa os elementos não visíveis, os princípios combinatórios que geraram a forma arquitetônica. A análise é feita através da compreensão dos processos generativos apoiado pelos princípios geométricos.

Processos generativos são métodos de projeto que visam não só a criação de produtos, mas principalmente os processos elaborados e envolvidos na criação de objetos (FISCHER e HERR, 2001). O objetivo é a elaboração de ferramentas projetuais Godoi (2008), que produzam uma variedade de soluções para serem avaliadas (CELANI, 2003). Contribuem com a criatividade, pois permitem explorar maior quantidade de alternativas projetuais de modo eficiente e rápido.

Entre esses processos generativos encontra-se a Gramática de Formas (*Shape Grammar*) que consiste em um sistema de geração de formas através da associação de um vocabulário a um conjunto de regras, analisando “a composição arquitetônica a partir de sua estrutura e lógica internas” (GODOI, 2008).

A Gramática de Formas foi um dos primeiros algoritmos utilizados para a compreensão e criação de projetos. Surgiu inicialmente para, a partir da identificação do vocabulário e regras, propiciar a criação de novos objetos oriundos da linguagem pré-estabelecida, Gramática Sintética, sendo introduzido por Stiny e Gips em 1972 como *Shape Grammars*. A Gramática Analítica busca os princípios generativos (vocabulários e regras) de tal forma a identificar uma gramática em comum dos objetos de análise (WEBER, 2005).

Neste trabalho a Gramática de Formas é aplicada para identificar os princípios generativos (regras e vocabulário) capazes de descrever os processos compositivos com a Madeira Roliça quando utilizada em edificações. É utilizada como método para a sistematização dos processos compositivos envolvidos nas obras com madeira roliça, através da análise de regras de geração da forma.

Os princípios compositivos, descrito pela Gramática de Formas através das regras que

estabelecem o modo como o elemento (vocabulário) é combinado para gerarem composições formais tridimensionais, são investigados a partir de conceitos geométricos que envolvem a reta, objeto geométrico-matemático que representa, de modo abstrato, a madeira roliça. Considera-se neste caso todos os elementos que geram um espaço onde é possível verificar comprimento, largura e altura. Difere-se do conceito matemático de superfície, onde é uma variedade topológica bidimensional. “Na ótica da arquitetura, portanto, a noção de faces ou lados se faz relevante porque seu produto, o edifício, pertence a um universo tridimensional revelando a superfície em suas faces internas e externas, cada qual caracterizada e percebida de maneiras distintas” (ALLGAYER, 2009). Construções geométricas a partir de elementos curvos foram desconsiderados, considerando a peça de madeira roliça um elemento retilíneo.

As relações espaciais que essas retas estabelecem entre si formam a base para as regras de geração da forma. “A partir de um vocabulário é possível obter uma variedade de relações espaciais, e uma relação espacial pode servir de base para uma variedade de regras” (MAYER, p.65, 2003). Desse modo, juntamente com os níveis dimensionais de composição, verifica-se diferentes regras de acordo o elemento formado. Estas se apoiam nas transformações geométricas ou euclidianas e nos conceitos de superfícies regradas.

Transformações euclidianas ocorrem tanto no espaço bidimensional como no espaço tridimensional e podem ser aplicadas ao ponto como em figuras complexas. “Uma das características mais importantes, sob o ponto de vista geométrico, é que nesses movimentos o corpo não muda nem de tamanho, nem de forma” (LEDERGERBER-RUOFF, P.58, 1982), “mas alteram a posição do objeto” (MITCHELL, p. 127, 2008). Dentro deste conceito encontram-se: translação, rotação e reflexão. Outra transformação possível é a homotetia. Neste caso o objeto é alterado em tamanho, mas conserva sua característica formal, ou seja, mantém a semelhança. “Transformações euclidianas constituem operações de similaridade. Uma transformação ou sequência de transformações, sem transformação de escala, é denominada isometria e produz formas congruentes” (MAYER, p. 70, 2003).

Outra transformação que pode ser indicada e é utilizada neste trabalho é a “*glide reflection*”, ou translação refletida (LEDERGERBER-RUOFF, 1982). Trata-se de uma combinação de duas transformações congruentes, a reflexão e a translação, atuando paralelamente a linha, ou eixo, de reflexão. No nível tridimensional, a “*glide reflection*” é a composição da reflexão em relação ao plano R e a translação paralela a este plano (POTTMANN, et al, p. 145 e 176, 2007).

As regras de transformação estão presentes nos três níveis compositivos, sendo importantes ferramentas para geração de objetos arquitetônicos. (POTTMANN, et al, p. 139, 2007). “Frequentemente, uma composição é um jogo em que as relações espaciais entre formas são modificadas por meio da translação e da rotação” (MITCHELL, p. 127, 2008).

No nível tridimensional as transformações podem ser chamadas de transformações espaciais pois ocorrem nas três dimensões. Inclui-se, então, a transformação helicoidal que consiste na composição de uma rotação em relação a um eixo A e uma translação paralela a esse eixo (POTTMANN, et al, p. 181, 2007).

Superfícies geométricas, de acordo com Pietro (1960), pode ser definida como o lugar de todas as posições que ocupa sucessivamente no espaço uma linha móvel – geratriz - que troca de posição e/ou também de forma, segundo uma lei determinada e contínua - diretriz. De acordo a natureza da geratriz, as superfícies podem ser regradas e curvas. Na primeira a geratriz é uma reta móvel e na segunda curva. Ou seja, as superfícies regradas são geradas pelo movimento de uma linha reta, a geratriz, que se movimenta seguindo condições

particulares e em contato com as diretrizes (PADRÓN, 2006). Nesse trabalho considera-se a madeira roliça como vocabulário relacionando-a com a linha reta.

Entre as superfícies regradadas encontram-se: plano; desenvolvíveis e não desenvolvíveis. As superfícies regradadas desenvolvíveis podem estender-se sobre um plano e as superfícies regradadas não desenvolvíveis são superfícies formadas por retas, mas que não podem ser planificadas. As mais conhecidas são: cilindroide, conoide, hiperboloide parabólico e hiperboloide de revolução de uma só folha (BARISON, 2007).

Superfícies de forma livre começam a ganhar espaço no estudo de geometrias quando softwares como auxílio da visualização tridimensional da proposta entram em cena (CAMPOS e CELANI, 2017). Há uma enorme gama de materiais que podem ser utilizados em superfícies livres, podendo estes ser blocos de tijolos (RAJABZADEH e SASSONE, 2017), de concreto (SCHIPPER et al., 2017), polímeros, aço, vidro (especialmente utilizado em fechamentos, e não como estrutura para a superfície livre), além de vários tipos de metais e, raramente, madeira (EIGENSATZ et al., 2010). Essas superfícies podem ser executadas com material maleável, como o concreto, e/ou serem “preenchidas” com malhas geométricas, a chamada tesselação. Nesse último caso, são executadas com elementos retilíneos que compreendem as arestas dos padrões utilizados para “preencher” a superfície previamente definida, gerando-se um produto de curvatura formal final muito próxima da projetada (LIMA, 2021). Fazendo uso do tesselação da superfície de forma livre, tem-se uma grande variedade e complexidade em torno do preenchimento e posterior execução de tais superfícies.

A arquitetura conhecida como “arquitetura de superfícies livres”, é também conhecida e associada aos seguintes termos: arquitetura/design líquido; arquitetura de superfícies livres; e, de “Blob”, sendo o último termo referente ao projeto de Peter Cook, a Kunsthhaus Graz (EEKHOUT, M. e WICHERS, S, 2015). Estes são termos frequentemente usados em artigos, livros, revistas e periódicos com o intuito de representar, definir e caracterizar a concretização de geometrias consideradas de geração complexa. Derivadas de formulações matemáticas integradas aos programas computacionais, tornam possível a criação, execução e concretização destas formas que são resultado conjunto da criatividade e anseios dos arquitetos juntamente com as possibilidades oriundas do avanço computacional (EEKHOUT, M. e WICHERS, S, 2015).

Outra definição de formas livres é a de que as mesmas podem ser entendidas e classificadas por meio da geração formal por modelagem Non-uniform rational b-spline (NURBS), ou, por meio de superfícies regradadas, também conhecidas como superfícies livres, que por sua vez, normalmente, apresentam a característica de serem superfícies com dupla curvatura, associando-se dessa forma com a Curvatura de Gauss (POTTMANN et al., 2007 *apud* CAMPOS e CELANI, 2017).

Vale ressaltar que o surgimento das formas livres na arquitetura não é contemporâneo, ou seja, não surgiu por conta da criação de programas que possibilitem sua manipulação. Existem exemplos de arquitetura que fazem o uso de formas livres em alguns projetos do arquiteto catalão Antoni Gaudí, que através do uso de cerâmicas “cortadas”, preenche e cria uma superfície tessellada nas superfícies horizontais e verticais de seus projetos. O arquiteto Félix Candela foi um arquiteto que trabalhou com superfícies de geometria complexa sem a assistência de ferramentas ou programas computadorizados para a criação, elaboração e efetiva construção de algumas de suas estruturas (CAMPOS e CELANI, 2017). Porém, ressalta-se que o surgimento e implementação destes programas resultaram na disseminação em torno do uso, criação, modelagem e execução destas formas complexas.

3. Material

Para aplicar a metodologia proposta, selecionaram-se 07 obras que possuem a madeira roliça como elemento principal de sua construção e que disponibilizassem dados do projeto arquitetônico. As obras analisadas foram visitadas pelos autores e/ou teve-se acesso aos projetos e estão representadas no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1: Projetos selecionados para análise

	<p>RESTAURANTE DO VELOPARK, Nova Santa Rita – RS. Fonte: Foto do Autor.</p>
	<p>COBERTURA DE EDIFÍCIO EXPERIMENTAL (USP/SÃO CARLOS), São Carlos – SP. Fonte: Foto cedida ao Autor.</p>
	<p>COBERTURA SOLAR (PARQUE CENTRO DA TERRA), Doncaster, Inglaterra. Fonte: Foto e direitos autorais de Feilden Clegg Bradley Studios. Os autores têm autorização para uso da imagem neste artigo. Disponível em: https://fcbstudios.com/work/view/The-Earth-Centre-and-Solar-Canopy.</p>
	<p>ESTACIONAMENTO RECANTO PARK HOTEL, Foz do Iguaçu - PR. Fonte: Foto do Autor.</p>
	<p>PASSARELA PARA TORRE, Osório – RS. Fonte: Foto do Autor.</p>



AUDITÓRIO ESPAÇO DAS AMÉRICAS, Foz do Iguaçu - PR.

Fonte: Foto do Autor.



CRECHE MUNICIPAL SÃO PAULO, São Paulo – SP.

Foto cedida ao Autor.

Fonte: Tabela elaborada pelos autores.

4. Metodologia

Tomando por base o segmento de reta que compõe cada uma das obras mencionadas acima, a abstração e dimensão da peça de madeira roliça e as obras do corpus de análise, obteve-se a decomposição das mesmas onde procurou-se verificar o processo generativo que formou cada uma delas.

As obras que estão contempladas no Corpus foram enquadradas dentro da sistematização estabelecida pelos autores neste artigo. O agrupamento foi realizado em razão dos processos de composição existentes em cada edificação a ser analisada, tendo por base os conceitos matemáticos que são base da geração formal. Posteriormente, por meio dos princípios generativos identificados, verificou-se a possibilidade generativa de alternativas formais com a intenção de se demonstrar a potencialidade da sistematização proposta, pois, uma classificação que demonstre os processos generativos deve permitir a compreensão do objeto arquitetônico possibilitando um avanço nos modos de composição formal.

4.1. Processos Generativos Identificados

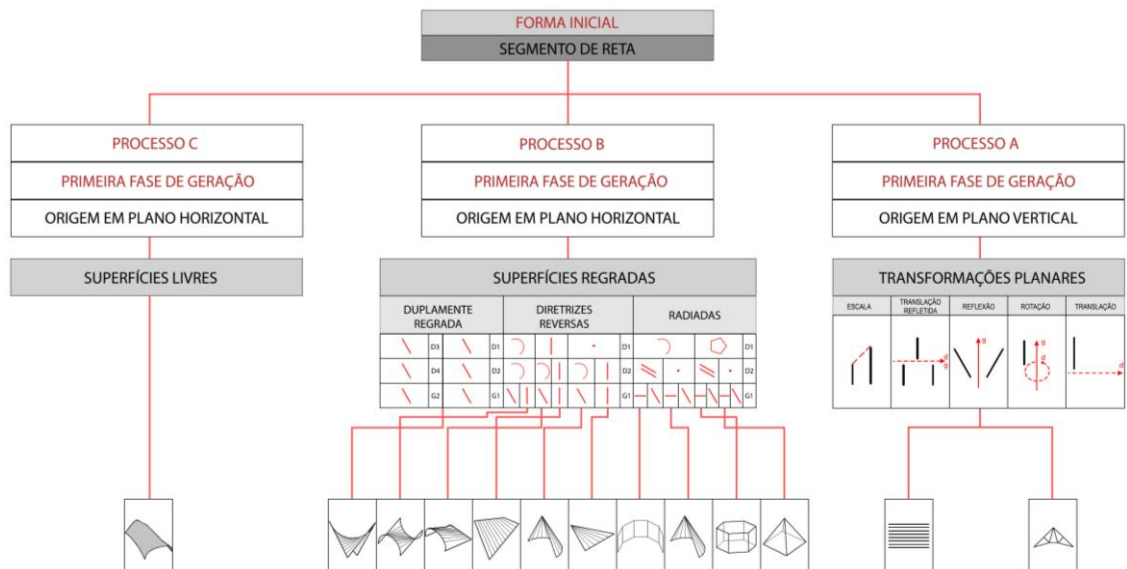
Considerando como resultado final da composição formal dos volumes tridimensionais, observou-se três modos de combinar os elementos roliços de madeira para geração formal. Aqui denominados de Processo A, B e C. No processo A, as peças de madeira roliça são combinadas formando um plano perpendicular ao plano xy do sistema cartesiano de coordenadas, sendo, portanto, a 1ª fase de geração formal. Estes, por sua vez, combinam-se para gerar o volume, compondo a 2ª fase de geração formal. As transformações geométricas que foram aplicadas ao plano definem a forma/volumetria final da obra/projeto. A Figura 1 ilustra esse processo. As letras apresentadas nessa figura se referem as diretrizes (D) e geratrizes (G) utilizadas no processo de geração das formas geométricas.

No segundo modo, chamado de processo B, as peças são combinadas de modo a

formar uma superfície sobre o plano horizontal, sendo, portanto, a 1ª fase de geração formal. Essas superfícies podem ser combinadas novamente em busca de outras possibilidades formais, a 2ª fase de geração. A variação formal pode ocorrer por meio da alteração na 1ª geração e/ou no modo de combinação, por meio das transformações geométricas, na 2ª geração. A primeira etapa de geração baseia-se nas regras de geração de superfícies regradas. Os resultados possíveis foram agrupados em 03 grupos/famílias divididas de acordo com as características da geração formal: a) Radiadas com diretrizes no Plano Vertical (P.V.) e/ou horizontal (P.H.); b) Diretrizes Reversas e; c) Duplamente Regradas.

A Figura 1 ilustra esse processo de acordo com as possibilidades obtidas a partir do primeiro momento de geração formal, a 1ª fase geração. A Figura 3, por sua vez, ilustra esse processo com as transformações espaciais, transformações geométricas no espaço tridimensional, acrescentadas na 2ª fase de geração formal.

Figura 1: Esquema dos processos (A, B e C) de composição tridimensional identificado



Fonte: Elaborado pelos autores

No terceiro processo, processo C, gera-se uma superfície, sendo compreendida como a 1ª fase de geração formal. A 2ª fase de geração compreende o preenchimento dessa superfície por padrões formados por peças de madeira roliça. Na primeira etapa desse processo, as formas livres podem ser “concebidas” a partir de diversas fontes, influências e aspirações estéticas por conta da maneira com que o arquiteto vê e encara o problema (AZAGRA e BERNABEU, 2012). Essa superfície gerada é preenchida a partir de padrões, geralmente com formatos de polígonos. Essa técnica de “preenchimento/subdivisão” de superfície é chamada de tesselação e é a técnica mais usual para conseguir fazer painéis que compõem as superfícies de formas livres propostas no objeto arquitetônico (LIMA, 2021). A forma da superfície na 1ª geração, e/ou o tipo do padrão que subdivide a superfície na 2ª geração, possibilita as variações compositivas.

No caso de superfícies livres executadas com material retilíneo (reto), como a madeira roliça, é necessário que essas superfícies de forma livre sejam “preenchidas” por partes menores, denominados de padrões, que podem ser, também, polígonos regulares ou

irregulares. Esse preenchimento é chamado de *mesh*, ou malha (Pottmann et al., 2007) ou tesselação (Lima, 2021). Uma malha é uma coleção de pontos (vértices) dispostos em elementos básicos chamados de faces, que são delimitadas por padrões. Quando se trabalha a tesselação com polígonos, geralmente um tipo deles domina a malha. E quando são polígonos regulares: triângulo, quadrilátero ou mesmo hexágono, a soma total dos ângulos é de 360° (Pottmann et al., 2007). Também podem ser baseados e inspirados em elementos e formas emergentes da natureza, conforme proposto por Allgayer (2009). Neste caso, ao relacionar a inspiração e produção de superfícies com base em formas encontradas na natureza com a lógica estrutural de esforços, tem-se como objetivo a produção de modelos com proximidade formal estando estes de acordo com a eficácia estrutural proposta. O resultado final será compreendido como a inspiração de elementos da natureza adequada à eficiência estrutural (ALGAYER, 2009).

No caso de superfícies com elementos de madeira roliça, as arestas dos padrões serão substituídas por essas peças e devem estar unidas por conexão nos seus vértices. Esse processo é similar ao realizado para superfícies executadas com peças metálicas. Campos e Celani (2017) classificam a subdivisão de superfícies de acordo com o número de lados das figuras dos padrões resultantes sendo: triangulação, quadriláteros e polígonos de cinco ou mais lados (CAMPOS E CELANI, 2017).

Mesmo com peças retilíneas formando as arestas dos padrões, nem sempre essas superfícies menores geradas serão partes planas. Com exceção das malhas triangulares, as demais não são necessariamente planas (POTTMANN et al., 2007). Conforme a execução pretendida é necessário realizar essa verificação. Além disso, ressalta-se que o material usado para a vedação/cobrimento dessa tesselação pode contribuir em seu aspecto estético, pois pode ser translucido mostrando sua estrutura, ou não.

4.2. Classificação das Obras Selecionadas

A partir dos 03 processos identificados, uma matriz classificatória foi gerada baseada nos conceitos matemáticos-geométricos envolvidos, exemplificado na Figura 3.

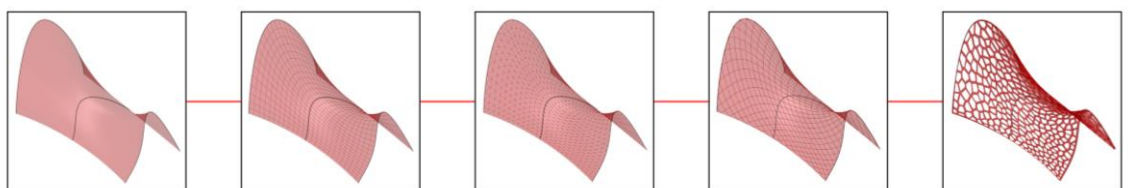
O processo A (origem em plano vertical), envolve a definição de um plano vertical e aplicação de transformações geométricas sobre este. Peças horizontais serão necessárias para finalizar a forma tridimensional e travar os planos bidimensionais após as operações compositivas aplicadas. Nota-se que a presença de peças horizontais nestes elementos de natureza vertical tem por função a completude da forma e sua viabilidade construtiva. Nas edificações analisadas que se encaixam nesse processo, as obras iniciam-se com uma forma plana de madeira roliça construída sobre um plano vertical e, depois, essa forma plana sofre transformações geométricas para gerar a forma arquitetônica tridimensional. Nas duas primeiras obras indicadas na Figura 3, cobertura de acesso a torre (obra 01) e cobertura do restaurante do Velopark (obra 02), esses planos sofrem translação, enquanto na obra 03 da Figura 3, auditório do Espaço das Américas, a forma plana gerada na 1ª fase sofre rotação completando 360° graus.

O processo B (origem em plano horizontal com superfícies regradadas) envolve regras para a geração de superfícies além do plano bidimensional, e, a posterior aplicação das transformações geométricas no modelo desenvolvido na primeira fase de geração. Os ângulos internos das superfícies influenciam o resultado final da composição. Aqui optou-se por mostrar as obras após os dois processos de geração, mas é possível encontrar soluções para toda a edificação ainda na primeira fase de geração, ficando a cargo do projetista qual o

caminho e quais os resultados desejados encontrar. Nos dois primeiros exemplos, obra 04 e 05 mostradas na Figura 3, a primeira geração suscita um parabolóide. Na cobertura do estacionamento (obra 05), esse parabolóide sofre reflexão e, depois, translação. Na cobertura do edifício experimental (obra 04) o parabolóide gerado na fase 1 sofre rotação e gera a cobertura composta por quatro parabolóides rotacionados 90° entre si. Os outros dois exemplos partem das superfícies radiadas sofrendo translação nos dois sentidos. Entretanto, a cobertura do edifício na Inglaterra (obra 06) indica novas possibilidades compositivas ao parametrizar uma cobertura similar à da creche (obra 07), porém elaborada de modo a explorar, de modo paramétrico, as possibilidades estéticas e geométricas.

O processo C (origem em plano horizontal com superfícies de formas livres) envolve a geração de uma superfície geométrica abstrata, 1° fase de geração, sendo posteriormente submetida a tesselação formada por padrões, cujas arestas são executadas com madeira roliça e resulta na 2° fase de geração. Não foram encontrados exemplos edificadas nesse contexto, mas vislumbra-se essa possibilidade visto que é um campo em expansão. As características de irregularidade do material dificultam as conexões entre as peças, fato que pode contribuir para a ausência deste tipo de obra. A Figura 2 ilustra o processo C onde uma superfície é gerada na 1° fase e apresenta possíveis “preenchimentos” dessa superfície na 2° fase de geração.

Figura 2: Exemplo do processo compositivo C



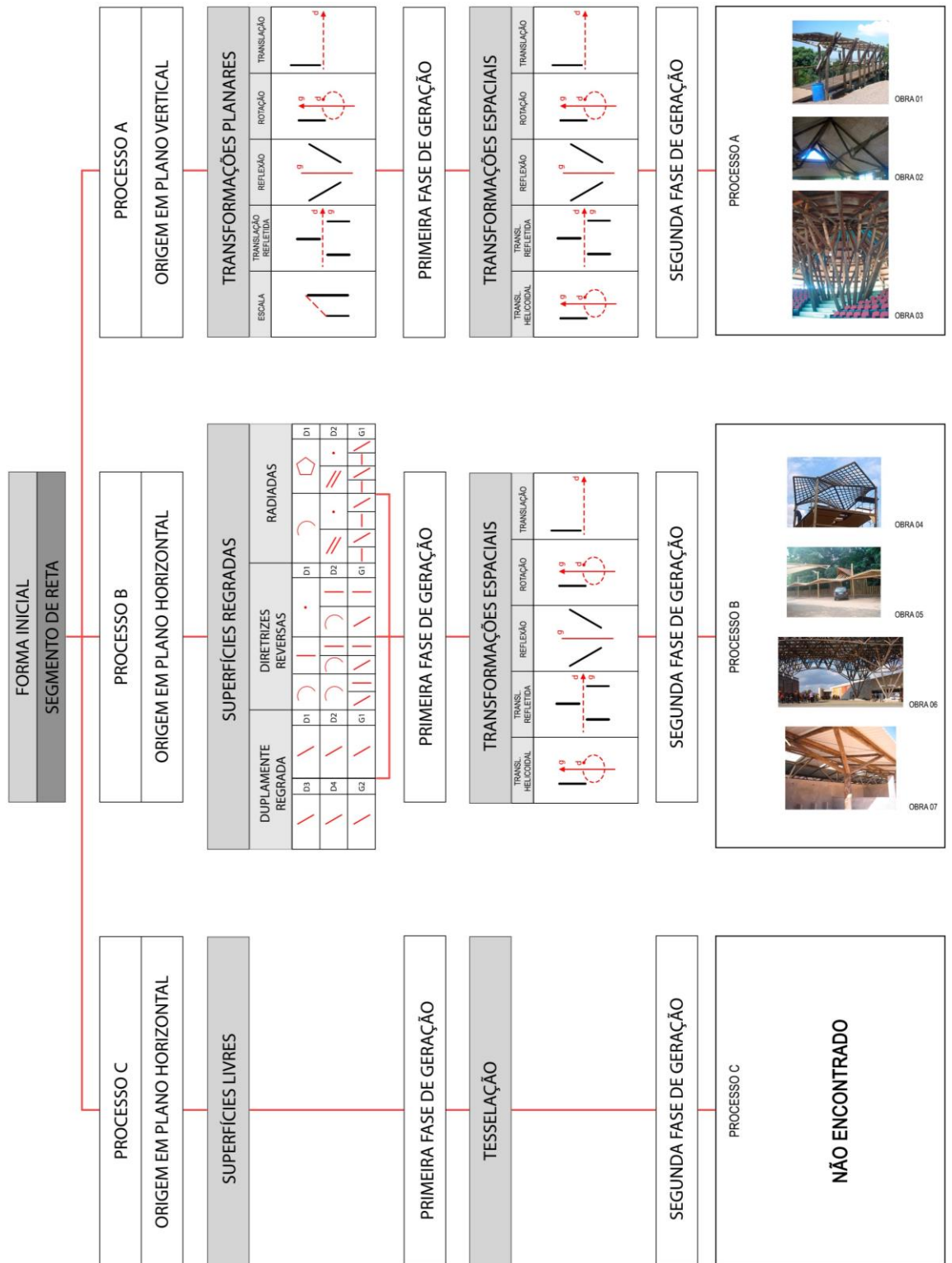
Fonte: Elaborado pelos autores

A efetivação de uma arquitetura caracterizada como arquitetura de forma livre tem por condicionante de sua execução o material a ser utilizado na obra, tanto o material da estrutura (arestas dos padrões) como o material de vedação (o que cobre/preenche tal estrutura). Ao aplicar-se à construção e constituição de superfícies que venham a contemplar o processo C, sugere-se que peças de madeira roliça com maior diâmetro sejam utilizadas como base/perímetro da superfície, ao passo que para as peças que irão compor os padrões, sugere-se peças com diâmetro inferior às utilizadas anteriormente.

Observa-se que, em alguns casos, a malha que define a estrutura da forma livre é diferente da forma de seu preenchimento. Tomando como exemplo o museu Guggenheim de Bilbao, projetado pelo arquiteto Frank Gehry, nota-se que o esqueleto estrutural do edifício é composto por uma grelha triangular, enquanto as placas de titânio que o compõe seguem um padrão quadrangular, contrariando dessa forma o padrão estrutural do edifício (AZAGRA E BERNABEU, 2012).

A Figura 3 demonstra a classificação das obras agrupadas de acordo com o processo de geração formal.

Figura 3: Esquema gráfico da classificação proposta



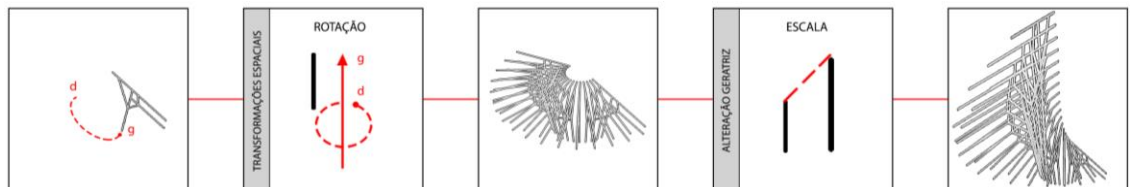
Fonte: Elaborado pelos autores

4.3. Alternativas Compositivas

Para cada processo de geração anteriormente definido, foi proposta uma possibilidade de composição a partir de alterações de princípios compositivos identificados. Isso mostra o potencial da matriz de classificação de incorporar novas obras e, principalmente, de promover soluções formais ainda não utilizadas. As soluções formais propostas são trabalhadas por meio da compreensão dos princípios generativos e sua alteração.

No **processo compositivo A** optou-se por trabalhar com a regra de rotação. Nesse exemplo, Figura 4, a obra com rotação teve sua solução experimentada com rotação de 180° ou uma parte dos seus planos sofreram parametrização quanto ao tamanho, ou seja, escala.

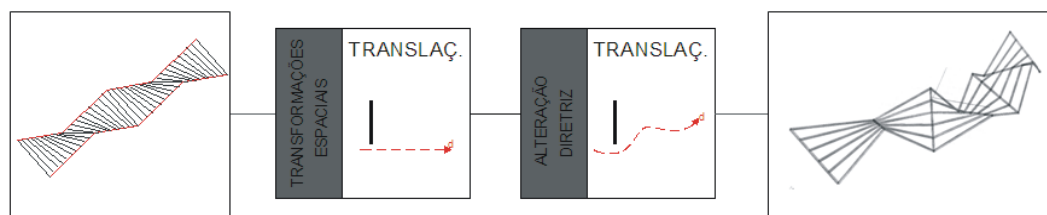
Figura 4: Exemplo de exploração formal do processo compositivo A



Fonte: Elaborado pelos autores

No **processo compositivo B**, iniciou-se com um parabolóide hiperbólico que na sequência sofreu reflexão e translação. A proposta de alteração formal ocorreu por meio da alteração da diretriz, que passou a ser paramétrica, podendo colocá-la em curvas variadas. A Figura 5 mostra um exemplo.

Figura 5: Exemplo de exploração formal do processo compositivo B



Fonte: Elaborado pelos autores

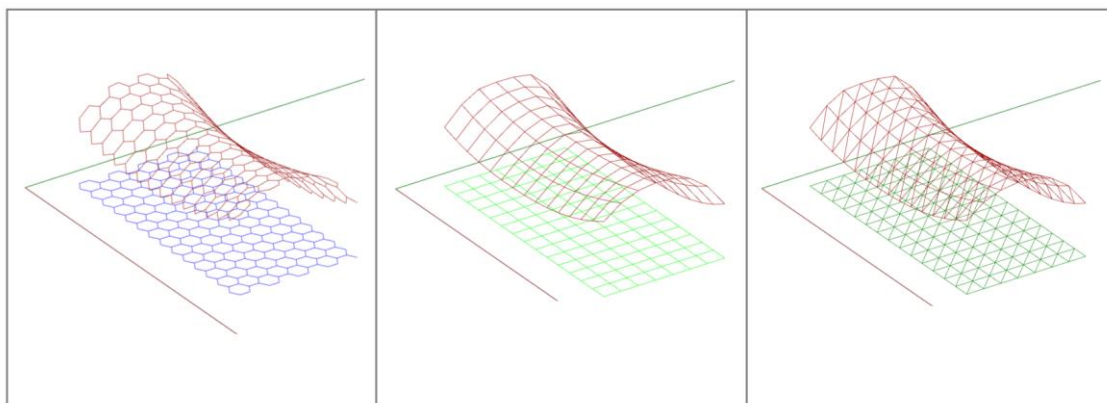
No **processo compositivo C** a própria forma de geração das superfícies de formas livres permitem que seja feita a parametrização depois da tesselação, desde que atenda os critérios construtivos pré-estabelecidos. Assim como ocorre para os demais materiais, a decisão pelo tipo de subdivisão se dará por questões estéticas, de custos, de materiais, funcionais, de intenção do arquiteto e outras (CAMPOS e CELANI, 2017).

Uma opção para alterar esse processo é mudar o padrão dos elementos da tesselação. Isso pode ser feito aplicando padrões naturais para preencher as superfícies e através da verificação do esforço estrutural em duas categorias de carga (tração e compressão), como demonstrado por Allgayer (2009). Outra opção é projetar malhas planas sobre o plano x,y, cada uma com um padrão diferente, para a superfície livre gerada. Neste caso, como são projetadas no eixo Z, as peças ficarão com comprimentos diferentes entre si. A Figura 6 abaixo

ilustra essa última opção.

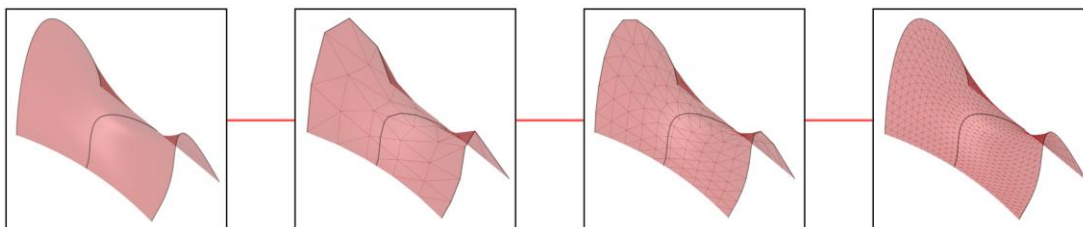
Observa-se que é possível uma melhor aproximação da superfície de forma livre gerada quando se utiliza maior quantidade de elementos para preenchimento da superfície. Nesse caso, trata-se de elementos planos de tamanhos similares entre si. A Figura 7 ilustra essa aproximação.

Figura 6: Exemplo da variação do processo compositivo C



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 7: Exemplos com variação da quantidade de peças na tesselação



Fonte: Elaborado pelos autores

5. Discussão

A proposta de classificação mostrou-se efetiva, visto que abrangeu as obras selecionadas e, também, porque disponibilizou percursos, na matriz classificatória, para gerar outras soluções compositivas. Isto ocorre porque a sistematização dos princípios generativos esclarece e demonstra as várias possibilidades combinatórias, além de propiciar à alteração dos princípios geradores ampliando o leque de alternativas formais. Alguns exemplos dessas possibilidades compositivas foram demonstrados ao decorrer do item 4.3.

Em relação aos processos A, B e C propostos apenas os processos A e B continham exemplos de obras executadas. No exemplo C não se localizou nenhum exemplo edificado com peças de madeira roliça. Além dos aspectos técnicos que envolvem a execução dessas superfícies, é preciso considerar as características específicas desse material, principalmente a forma cônica e as irregularidades das peças roliças, fatos que dificultam as junções entre esses elementos (TERIBELE, 2011). Destaca-se que para as soluções arquitetônicas do processo C, várias junções são criadas, pois a peça de madeira roliça corresponderá a uma aresta do padrão a ser usada no preenchimento da superfície.

No que diz respeito a irregularidade da peça roliça, sabe-se que sua geometria é semelhante à de um cone, ou seja, o diâmetro da sua base é maior do que o diâmetro ao longo da extensão da tora de madeira. Uma possibilidade para uniformizar o diâmetro na peça é realizar o torneamento. Ressalta-se que o processo de torneamento das toras reduz os valores de resistências e rigidez na flexão (LARSON, MIRTH E WOLFE, 2004 *apud* ZANGIÁCOMO, 2007).

No processo A e B observou-se que as conexões podem ser no mesmo eixo ou com eixo longitudinal sobrepostos. É importante saber que essa decisão, tomada na 1ª fase de geração formal, irá influenciar as demais conexões formadas quando a forma arquitetônica passar pelo 2º processo de geração formal. Um estudo que antecipe quais junções serão geradas conforme as transformações geométricas aplicadas na 2ª fase de geração ajuda a tomar decisões antecipadamente (TERIBELE, 2011).

Já no processo C será necessário manter o eixo longitudinal visto que são várias pequenas peças que formam os padrões para o preenchimento/subdivisão da superfície. A sobreposição das peças para conexão não seria possível nesse caso, pois as superfícies de formas livres caracterizam-se por curvaturas e sua execução com peças retilíneas de madeira depende de uma estruturação por malhas, definida pelo preenchimento de padrões. Ressalta-se que as peças com curvatura foram desconsideradas desse trabalho, mas pode ocorrer que esses padrões, formados por peças retilíneas de madeira roliça, gerem padrões cujas superfícies apresentem curvaturas.

Quanto à questão das junções entre as peças que formam o padrão de preenchimento da superfície de forma livre, é preciso considerar o encontro de múltiplas arestas, que variam em quantidade conforme o padrão escolhido. Utiliza-se como exemplo uma malha quadrangular, que possui como base quadrados ou retângulos, figuras estas que possuem 4 arestas. É na junção de uma figura geométrica com outra que irá ocorrer o encontro das arestas, em um mesmo vértice. Ou seja, as arestas e vértices são compartilhados por mais de uma figura que compõe a malha. Assim, em um encontro de quatro arestas, tem-se na realidade a junção de quatro figuras retangulares com uma de suas quatro arestas convergindo para um ponto comum, vértice.

Vislumbra-se duas possibilidades de execução dessas junções: 1) aproximando as peças, ato que acarretaria desbastes nas mesmas para o encaixe entre elas e; 2) utilização de um nó entre elas que pode ser executado com elemento metálico. Em virtude da falta de exemplares construídos, tais questões permanecem e são elaboradas de forma teórica, vindo a servir de convite de experimentação para pesquisas posteriores.

6. Considerações Finais

Este trabalho objetivou desenvolver uma matriz generativa para classificar formas arquitetônicas, em nível tridimensional, de obras com madeira roliça. A hipótese considerou que a compreensão dos conceitos geométricos que envolvem a geração dessas formas contemplaria as possibilidades compositivas e disponibilizaria alternativas formais.

A hipótese foi confirmada, pois a classificação proposta agrupa as obras analisadas e permite a elaboração de composições para além dos tipos combinatórios apresentadas pelo corpus de análise. Este enfoque classificatório demonstra, a partir da compreensão dos princípios que geram as edificações, possibilidades compositivas que se diferenciem das existentes e conhecidas, demonstrando o potencial da matriz geradora proposta.

Desse modo, a principal contribuição deste estudo é demonstrar possibilidades

compositivas a partir de uma compreensão de seus processos generativos, baseados na análise do genótipo das edificações. Além disso, explora possibilidades com superfícies de formas livres preenchida por padrões, de modo teórico, pois não foram encontrados exemplos construídos em madeira roliça dentro desse processo compositivo elencado. Esse é um campo em desenvolvimento na Arquitetura, Engenharia e Construção.

A partir de três processos compositivos identificados, foi possível compreender as formas arquitetônicas estudadas e ampliar novos caminhos para geração formal com esse material. Dessa forma contribui com a ampliação do conhecimento compositivo do referido material.

Referências

- ALLGAYER, Rodrigo. **Formas naturais e estruturação de superfícies mínimas em arquitetura**. 2009. 167 páginas. Dissertação (mestrado em design) – Programa de Pós-graduação em Design, UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- AMORIM, Dalton de Souza. **Fundamentos de Sistemática Filogenética**. Editora Holos. 2002
- AZAGRA, D. e BERNABEU, A. **La estructura de las formas libres: The structure of free-forms**. Informes de la construcción, V. 64, 526, 133-142. Espanha, 2012. doi: 10.3989/ic.11.015
- BARISON, Maria Bernardete. **Geométrica: Desenho Geometria e Arquitetura On Line**. Disponível em: <<http://www.mat.uel.br/geometrica>> Acesso em: novembro, 2010.
- BATISTA, Fábio Domingos. **A tecnologia construtiva em madeira na região de Curitiba: da Casa Tradicional à Contemporânea**. 2007. 181 páginas. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC, Florianópolis, 2007.
- BRITO, Leandro. **Recomendações para o projeto e construção de estruturas com peças roliças de madeira de reflorestamento**. 2010. 339 páginas. Dissertação de mestrado. USP-SC, São Carlos, 2010.
- CAMPOS, Filipe Medeira de. CELANI, Gabriela. **Subdivisão de formas livres em arquitetura com o objetivo de viabilização de sua fabricação: métodos e aplicações**. INTERAÇÕES, Campo Grande, MS, v. 18, n. 3, p. 3-22, jul./set. 2017.
- CELANI, Gabriela. **Cad Criativo**. Rio de Janeiro. Editora Campus, 2003.
- DUDEQUE, Irã José Taborda. **Espirais de madeira: uma história da arquitetura de Curitiba**. São Paulo: Studio Nobel: FAPESP, 2001.
- EKHOUT, Mick. WICHERS, Sieb. **Lord of the wings: the making of free form architecture**. Amsterdã, Holanda. IDS Press BV, 2015. 142 páginas. Volume 12.
- EIGENSATZ, Michael. KILIAN, Martin. SCHIFTNER, Alexander. MITRA, Niloy J.. POTTMANN, Helmut. PAULY, Mark. **Paneling architectural freeform surfaces**. ACM Transactions on Graphics. Article No.: 45, 2010. <https://doi.org/10.1145/1778765.1778782>

FISCHER, T.; HERR, C. M. **Teaching Generative Design**, In SODDU, C. (ed.). Proceedings of the 4th International Generative Art Conference, Generative Design Lab DIAP, Politecnico di Milano, 2001.

GODOI, Giovana de. **Sistemas Generativos de Projeto: Um Estudo de Campo em Monte Alegre do Sul**. 2008. 116 páginas. Dissertação (mestrado em engenharia civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unicamp, Campinas, 2008.

KAULA, Prithvi N. **Repensando os conceitos no estudo da classificação**. Publicado originalmente em inglês em 1984. Disponível em <http://www.conexaorio.com/bit/kaula/>. Acessado em 01 de abril de 2021.

KISCHLAT, Edio-Ernest e SCHULTZ, Cesar-Leandro. **Introdução a Classificação dos Organismo: Considerações sobre Sistemática Filogenética**, p.11-24. Em: Paleontologia do Rio Grande do Sul: 2000. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000

LEDERGERBER-RUOFF, Erika Brigitta. **Isometrias e ornamentos no plano euclidiano**. São Paulo: Atual, 1982.

LIMA, Fábio. **A prática da tesselação: racionalização construtiva de painéis arquitetônicos complexos**. Arq. Arq. v.17 n.1 2021. <https://doi.org/10.4013/arq.2021.171.01>

MAYER, Rosirene. **A linguagem de Oscar Niemeyer**. 2003. 162 páginas. Dissertação de mestrado – Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

MELLO, Roberto Lecomte de. **Projetar em madeira: Uma nova abordagem**. 2007. 195 páginas. Dissertação de mestrado - UnB, Brasília, 2007.

MITCHELL, William J. **A Lógica da arquitetura: projeto, computação e cognição**. Ed. da Unicamp. Campinas, São Paulo, 2008.

PADRÓN, Ivan. **Conceptos Geométricos**. 2006. Disponível em <http://www.geometriadescriptiva.com/teoria/aperez/cap_01aconceptos_geometricos/05-superficie.htm> acessado em outubro de 2010.

PARTEL, Priscila Maria Penalva. **Sistemas Estruturais e Construtivos utilizando madeira roliça de reflorestamento**. 1999. 119 páginas. Dissertação de mestrado - EESC/USP, São Paulo, 1999.

PIETRO, Donato Di. **Geometria Descritiva**. Buenos Aires. Ed. Alsina, 1960.

POTTMANN, Helmut. ASPERL, Andreas. HOFER, Michael. KILIAN, Axel. **Architectural Geometry**. Exton, Pensilvânia: Bentley Institute Press, 2007. 724 páginas, primeira edição.

RAJABZADEH, Shaghayegh. SASSONE, Mario. **Brick patterning on free-form surfaces**. *Nexus Netw J* 19, 5–25 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00004-016-0305-9>

RANTA-MAUNUS, Alpo (coordenador do projeto). **Round Small Diameter Timber for Constructions**. Final report of project FAIR CT 95-0091. VTT Technical Research Centre of Finland. Espoo, 1999.

SCHIPPER, Roel. CONSTANZI, Chris Borg. BOS, Freek. AHMED, Zeeshan. WOLFS, Rob. **Double curved concrete printing: printing on non-planar surfaces**. Delft University of Technology, 2017.

STEADMAN, Philip. **The Evolution of designs: Biological analogy in architecture and the applied arts**. Cambridge University Press, 1979

TERIBELE, Alessandra. **Arquitetura com madeira roliça: processo generativo de superfícies e articulações**. 2011. 131 páginas. Dissertação de Mestrado – UFRGS, Porto Alegre, 2011.

VALLE, Ivan Manoel Rezende do. **O modelo reduzido no ensino de construção em madeira**. In: EBRAMEM. Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. São Carlos: EESC/USP, 2000. CD-ROM.

WEBER, Raquel. **A linguagem da estrutura na obra de Vilanova Artigas**. 2005. 133 páginas. Dissertação de mestrado – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

ZANGIÁCOMO, André Luiz. **Estudo de elementos estruturais roliços de madeira**. 2007. 142 páginas. Tese de doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2007.