

APLICAÇÕES DIDÁTICAS EM MODELAGEM PARAMÉTRICA DE GEOMETRIAS COMPLEXAS DA ARQUITETURA CONTEMPORÂNEA

DIDACTIC APPLICATIONS IN PARAMETRIC MODELING OF CONTEMPORARY ARCHITECTURE' COMPLEX GEOMETRIES

Janice de Freitas Pires¹

Alice Theresinha Cybis Pereira²

Resumo

O presente artigo relata uma das etapas da pesquisa desenvolvida com o intuito de reconhecer a estrutura de saber da geometria complexa da arquitetura contemporânea, como conhecimento para a ação projetual. Tal etapa refere-se a uma aplicação didática que visou avaliar como a explicitação de tal saber por meio de uma rede de conceitos contribuiu para a compreensão de tais geometrias, sua representação e fabricação por meios digitais. Foram propostas atividades que promoveram a inserção das teorias e técnicas de representação gráfica digital por modelagem paramétrica e atividades de projeto, focando-se em um tipo de superfície complexa específica. Este tipo de superfície foi estudado em seus aspectos de desempenho, visando compreender sua adoção em propostas projetuais da arquitetura contemporânea. Os resultados referem-se à descrição pelos estudantes dos processos desenvolvidos, em termos teóricos e tecnológicos, a apresentação dos modelos digitais em realidade virtual e protótipos obtidos por impressão 3D e uma análise das atividades desenvolvidas quanto aos objetivos didáticos.

Palavras-chave: geometria complexa; modelagem paramétrica; ensino de projeto de arquitetura.

Abstract

This paper reports one of the stages of research developed in order to recognize the structure of knowledge of the complex geometry of contemporary architecture, as knowledge for design action. Such stage refers to a didactic application that aimed to evaluate how the explication of such knowledge through a network of concepts contributed to the understanding of such geometries, their representation and manufacture by digital means. Activities were proposed that promoted the insertion of theories and techniques of digital graphic representation by parametric modeling and project activities, focusing on a specific complex surface type. This type of surface has been studied in its performance aspects in order to understand its adoption in project proposals of contemporary architecture. The results refer to the description by the students of the processes developed, in theoretical and technological terms, the presentation of digital models in virtual reality and prototypes obtained by 3D printing and an analysis of the activities developed regarding the didactic objectives.

Keywords: complex geometry; parametric modeling; architectural design teaching.

¹ Professora Doutora, Universidade Federal de Pelotas – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Pelotas, RS, Brasil, janicefpires@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1975-3147.

² Professora Doutora, Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento Expressão Gráfica, Florianópolis, SC, Brasil, acybis@gmail.com; ORCID: 000-0001-9056-8182.

1. Introdução

Em função do desenvolvimento tecnológico atual, o projeto em Arquitetura vem passando por grandes quebras de paradigmas, em relação à própria maneira de projetar e ao uso de dispositivos computacionais ao longo de todo o processo de projeto e de construção.

Neste contexto, a arquitetura contemporânea e seu processo de projeto fundamentam-se por um lado, no desenvolvimento tecnológico que possibilita integrar ambientes digitais de representação gráfica e simulação para a busca da forma e a sua otimização e, por outro lado, na exploração do funcionamento dos sistemas naturais, seus processos e a formação de suas geometrias. Esta última abordagem foi empregada por arquitetos do passado, como Gaudí, Frei Otto, Félix Candela, Heinz Isler e Luig Nervi (CHILTON & CHUNG, 2017). Atualmente, é possível conectar práticas de projeto computacional e fenômenos da natureza, oferecendo uma abordagem potente na arquitetura, no sentido de economia de materiais e integração qualitativa com o ambiente ou o lugar de sua inserção.

Como consequência destas abordagens, a arquitetura contemporânea dos últimos 20 anos tem se caracterizado pela adoção de geometrias de grande complexidade, fundamentadas em um senso estético/formal, no seu desempenho estrutural e de conforto ambiental, ou até mesmo nas técnicas presentes em dispositivos computacionais, as quais facilitam a proposição pelos arquitetos de tais geometrias. No entanto, outras geometrias (complexas) que não necessariamente surgem de processos de conformação ocorridos na natureza ou de processos computacionais também possuem requisitos especiais de racionalidade no processo construtivo e otimização funcional e que podem, por isto, atingir uma satisfatória harmonização com o ambiente natural em que a arquitetura será construída (BERTOL, 2011; BURRY & BURRY, 2010).

A presença desta realidade nos escritórios de arquitetura delimitou um problema didático para as escolas, relativa à preparação do futuro profissional de arquitetura. Tal problema passa pela conscientização e conhecimento sobre as formas criadas em tais processos projetuais, apontando para a inclusão nos currículos das faculdades de arquitetura de propostas didáticas que possibilitem uma ampla interação entre os fundamentos arquitetônicos presentes em tais geometrias complexas, relativos aos seus elementos teóricos, às técnicas e tecnologias de representação gráfica (como a modelagem paramétrica e a fabricação digital). No entanto, tais conteúdos são muito pouco abordados nos contextos de ensino de arquitetura no Brasil e muitas vezes nem o são. O conhecimento sobre a geometria ainda é tratada de maneira restrita em abordagens de aspectos representacionais advindos da geometria descritiva, em que prevalece a aplicação do sistema bi projetivo para o desenho. Identifica-se assim a necessidade de um enfoque didático para a inserção destes novos conceitos na arquitetura, por sua característica interdisciplinar (geometria complexa, projeto, computação) e o qual possa ser integrado aos diferentes métodos adotados nas disciplinas de projeto e de representação (AUTOR).

Em trabalho anterior (PIRES, 2018), desenvolvido no contexto de doutoramento em Arquitetura e Urbanismo, de 2014 a 2018, na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, identificou-se a necessidade de um reconhecimento dos aspectos teóricos e tecnológicos para a representação gráfica digital de tais geometrias empregadas na arquitetura, levando a um processo de análise de saber (CHEVALLARD, 1999). O pressuposto foi de que a explicitação deste ‘saber’ oferecia uma base de conceitos para subsidiar processos de aprendizagem de modelagem paramétrica (WOODBURY, 2010) aplicada à geração de geometrias complexas da arquitetura contemporânea. Em tal trabalho foi constituída uma rede de conceitos da geometria complexa aplicada em exemplares da arquitetura contemporânea, com base em um conjunto de superfícies matemáticas e técnicas de modelagem paramétrica associadas a estas,

reconhecendo-se as propriedades arquitetônicas e geométricas que dão fundamentos ao seu emprego na arquitetura.

Neste trabalho, apresenta-se uma aplicação didática desenvolvida no ano de 2017, por meio de atividades ocorridas em uma disciplina de pós-graduação, as quais foram avaliadas visando apontar seu aperfeiçoamento para que possam oferecer oportunidades efetivas de inserção de tais conceitos no ensino de arquitetura.

Considera-se que a relevância do estudo está também em contribuir para o conhecimento sobre a aplicabilidade de tais geometrias e ir além dos aspectos técnicos da representação e usar a representação (modelagem) para conhecer aspectos funcionais e qualitativos de tais geometrias.

2. Referencial Teórico e Metodológico

O presente estudo teve como fundamentos teóricos duas teorias didáticas do educador francês Yves Chevallard: a Teoria da Transposição Didática – TD (1991) e a Teoria Antropológica da Didática - TAD (1999). A primeira teoria questiona a natureza dos saberes que circulam nas instituições e suas transformações ao longo do tempo, considerando suas especificidades e sua gênese. Destaca que, em processos de transposição didática (eleição de saberes para formação), é fundamental conhecer tal natureza do saber para além do contexto didático, considerando-se igualmente os contextos científico (do saber sábio, ou saber de caráter teórico e tecnológico) e profissional (em que circula o saber prático, de resolução de problemas, o ‘saber-fazer’, nome atribuído pela teoria).

A TAD é, segundo Borda (2002), uma teoria que interpreta "a atividade de estudo de uma disciplina dentro de um sistema social (particularmente o didático)". Esta teoria analisa em maior profundidade a natureza dos saberes que circulam em tal contexto, oferecendo um modelo sistêmico para isso, a partir identificação de quatro elementos fundamentais: problemas ou tarefas, técnicas de resolução das tarefas, tecnologias que justificam, explicam e produzem as técnicas, e teorias, que tem o mesmo papel em relação às tecnologias. A teoria realça a importância de, em um contexto didático, o saber constituir-se em estrutura integral, estando presentes todos estes elementos. Ao estruturar o saber atentando a uma dinâmica entre seus elementos, são produzidos discursos mais potentes para o ensino, de apoio às próprias atividades didáticas.

A duas teorias deram suporte a etapa de explicitação de estruturas de saber da pesquisa e, em relação às atividades didáticas propostas neste trabalho, auxiliou a identificar e selecionar as estruturas de saber a serem consideradas, assim como estabelecer os parâmetros do processo de avaliação destas.

3. Procedimentos Metodológicos: o Desenvolvimento da Proposta Didática

A proposta de aplicação foi desenvolvida e realizada em uma disciplina de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (POSARQ) da Universidade Federal de Santa Catarina, denominada de Projeto Assistido por Computador, em que são experimentadas inserções com tecnologia digital no processo de projeto de arquitetura.

A partir da seleção de um conteúdo específico, foram desenvolvidas atividades com características distintas, as quais são: a inserção de teorias relativas à geometria complexa recorrente na arquitetura contemporânea com enfoque nas superfícies matemáticas e seus processos de geração; o reconhecimento de técnicas de modelagem paramétrica de tais

geometrias por meio de atividades de representação gráfica digital; e o desenvolvimento de um processo projetual apoiado em tais conceitos e técnicas de modelagem paramétrica. Os resultados das atividades foram sistematizados pelos estudantes nas seguintes etapas: descrição dos processos desenvolvidos, em termos teóricos e tecnológicos; a apresentação dos modelos digitais em realidade virtual; e protótipos obtidos por impressão 3D.

3.1. A Seleção de Conteúdos e de Técnicas de Modelagem Paramétrica

A seleção de conteúdos se baseou, por um lado, na delimitação de um problema geral de projeto de arquitetura que envolvesse a representação gráfica de uma geometria complexa, como as superfícies matemáticas apontadas em Burry e Burry (2010), Perez-Garcia e Gómez-Martínez (2009) e Carmo (1987).

Por outro lado, a proposta era iniciar por uma base de geometria (como as superfícies curvas pertencentes à classe tradicional de superfícies sistematizadas em Rodrigues, 1960), que permitisse avançar na compreensão da geometria complexa empregada na arquitetura. Justifica-se esta escolha em função também de que a aprendizagem da modelagem paramétrica pode ser potencializada se ensinada a partir da compreensão dos entes geométricos fundamentais e dos processos de geração destas superfícies tradicionais, avançando para as de maior complexidade.

Nesse sentido, identificou-se que o tema de superfícies mínimas poderia abarcar o espectro do problema proposto, por estar relacionado de alguma maneira, tanto com a classe tradicional de superfícies curvas, quanto com os desdobramentos matemáticos e tecnológicos obtidos no século XX que influenciaram a produção de arquitetura nos últimos anos (como a modelagem paramétrica, por exemplo). Também foi preponderante o fato de que tais superfícies adicionam um conhecimento mais amplo sobre técnicas desenvolvidas ao longo da história para a definição de formas arquitetônicas e possuem uma relação estrita com as estruturas naturais, as quais têm inspirado arquitetos em projetos de regeneração na arquitetura (LITTMANN, 2008).

A escolha da modelagem paramétrica se deu em função dos objetivos traçados na pesquisa considerando-se que este tipo de modelagem ativa os estudantes a terem um maior conhecimento em geometria, em linguagens descritivas e algorítmicas, potencializando a aprendizagem de tais temas para o projeto de arquitetura.

3.2. A Caracterização do Contexto de Aplicação

A disciplina em questão era formada por sete estudantes, seis deles com formação em Arquitetura e um com formação em Design. Todos os estudantes tinham pouco conhecimento sobre geometrias complexas da arquitetura contemporânea e superfícies curvas e não possuíam experiência em modelagem paramétrica, ou seja, nunca haviam utilizado a programação visual em seus trabalhos e pouco sabiam sobre o seu funcionamento (a parte operacional).

3.3. As Estratégias Didáticas

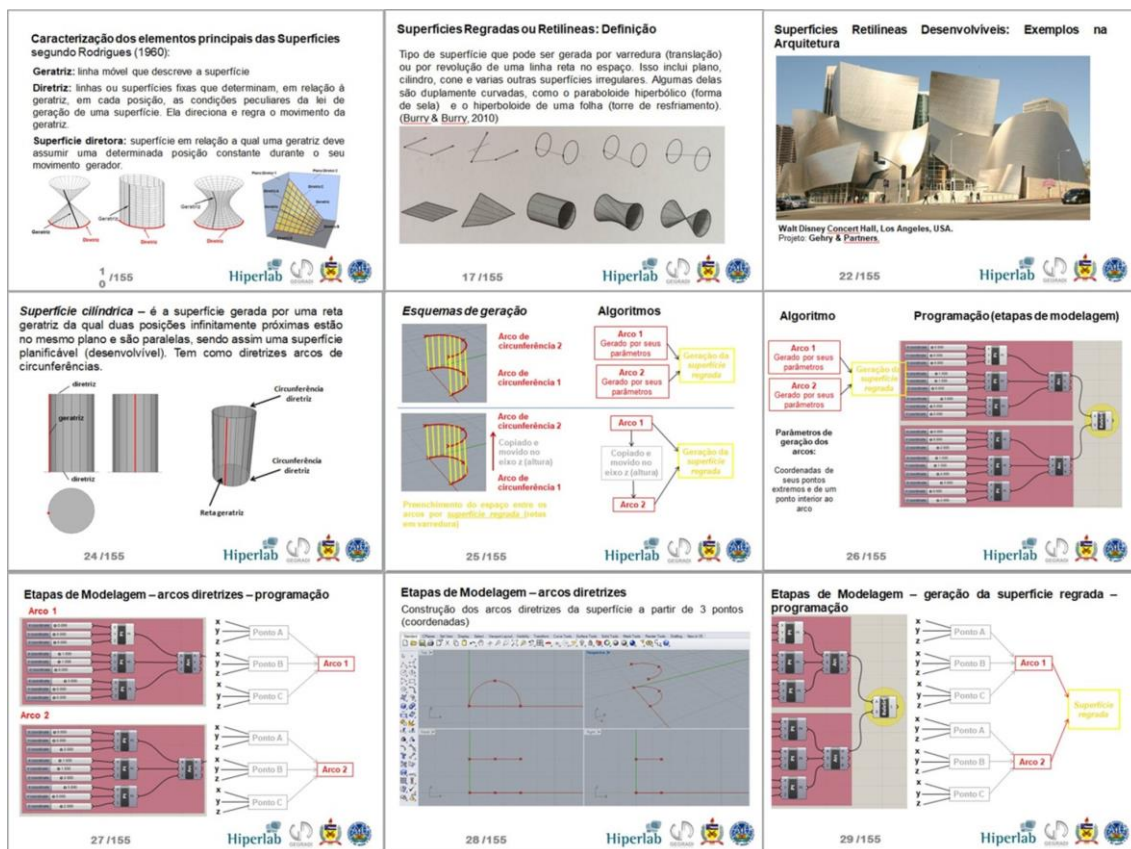
Previamente já se havia estruturado uma proposta de aplicação que poderia também ser utilizada em outros níveis de formação em arquitetura. Esta inicia pelos conceitos fundamentais de geometria das superfícies curvas e de modelagem paramétrica e passa por níveis crescentes de complexidade, até a abordagem das geometrias complexas e das técnicas

necessárias e parâmetros para modelá-las. O intuito é fazer com que os estudantes se apropriem aos poucos de tais conceitos até o ponto de tornarem-se autônomos para reconhecer a geometria a ser representada e/ou concebida e desenvolver seus próprios processos de modelagem.

Neste processo, são inseridos conceitos específicos de linguagem de programação visual e de geometria relacional, de maneira que não se apresentem complexos nas atividades iniciais, mas que são imprescindíveis para representar tais geometrias, a partir das próprias relações existentes entre os entes geométricos, definidas por suas regras de geração. Em relação às atividades de projeto as estratégias didáticas são no sentido de apresentar aos estudantes exemplos importantes de projetos de arquitetura que adotam as superfícies a serem abordadas, em seus aspectos geométricos e funcionais.

Todas as atividades contam com a disponibilização de materiais didáticos (Figuras 01 e 02) para abordar os conceitos e os processos de modelagem das superfícies curvas (classe das retilíneas desenvolvíveis e não desenvolvíveis e a classe das superfícies propriamente curvas, a partir de Rodrigues, 1960). Os materiais se baseiam em esquematizações dos processos de geração de cada geometria, visando facilitar o entendimento das descrições algorítmicas.

Figura 1: Materiais didáticos de superfícies cônicas e cilíndricas, com teorias e técnicas de modelagem paramétrica

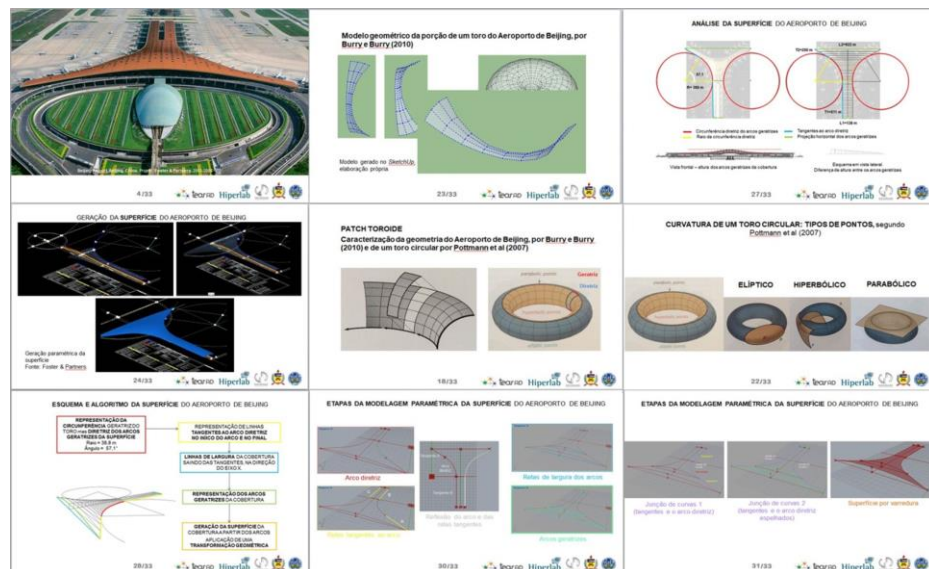


Fonte: Elaboração própria (2016)

Foram disponibilizados materiais com exemplos de modelagem de superfícies complexas, tais como do Aeroporto de Beijing (que adota uma porção de um toro) e da Estação de trem de Stuttgart (que adota uma superfície mínima), obras apresentadas em Burry

& Burry (2010). A seleção da primeira obra justifica-se por ser formada por elementos básicos da geometria (concordância de arcos de circunferência e retas).

Figura 2: Materiais didáticos sobre superfícies complexas da arquitetura de duas obras de arquitetura contemporânea, com teorias e técnicas de modelagem paramétrica.



Fonte: Elaboração própria (2016).

A proposta objetivou avaliar a característica das curvaturas de tais superfícies e relacioná-las ao seu desempenho estrutural, o qual é amplamente otimizado com o emprego de superfícies de dupla curvatura e, especialmente, as superfícies mínimas. Destacou-se aos estudantes que, mesmo sendo uma superfície complexa, ela pode ser representada a partir da análise de suas partes fundamentais (curvas geratrizes / diretrizes e processos de geração), facilitando sua representação.

3.4. O Desenvolvimento das Atividades de Modelagem Paramétrica

No transcorrer das atividades não se registrou momentos de expressiva falta de compreensão dos conceitos abordados e/ou dos processos de descrição da geometria e das técnicas de modelagem paramétrica (em relação à operacionalidade do *plug-in* de modelagem em linguagem de programação visual *Grasshopper*). Teve-se o cuidado de tratar da linguagem utilizada de maneira fundamentalmente explicativa, não se restringindo ao uso da linguagem da ferramenta (tecnológica) e sim se adotando a linguagem científica (a que explica e descreve teoricamente as ferramentas). Isto para que os estudantes pudessem compreender os tipos de dados de entrada que cada técnica incorpora durante a programação visual, facilitando sua apropriação.

3.5. O Desenvolvimento das Atividades de Projeto

As atividades contaram com as seguintes etapas:

- a. Apresentação de um projeto de referência e/ou conceitos de projeto e a geometria utilizada, justificando a escolha;

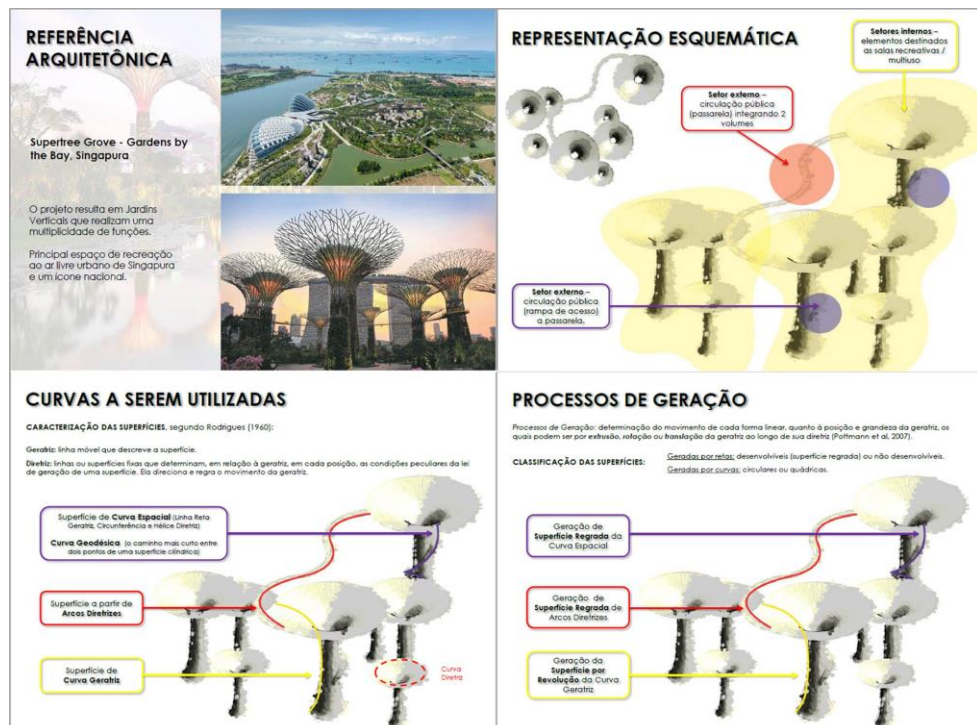
- b. Descrição das hipóteses de representação (modelagem geométrica) com texto e esquemas visuais;
- c. Descrição algorítmica anterior ao desenvolvimento da modelagem;
- d. Emprego da linguagem científica;
- e. As imagens de cada etapa da programação com o respectivo resultado visual da geometria;
- f. Avaliação da superfície quanto as suas curvaturas visando verificar a condição de superfície mínima;
- g. Relações paramétricas entre os elementos geométricos das superfícies.

Um relato das atividades de cada estudante foi desenvolvido para dar subsídios às análises, destacando-se os tipos de superfícies utilizadas e as estratégias de modelagem empregadas. Letras de A à F serão utilizadas para especificar cada estudante, sendo que a atividade do estudante C não será apresentada por se assemelhar estritamente com a do estudante B, tanto na forma quanto nas técnicas de modelagem empregadas.

3.5.1. A Modelagem da Obra com uma Curva Semelhante à Curva do Main Station Stuttgart

O estudante A identificou que, em relação ao projeto da obra a ser representada, a geometria dos módulos era gerada pela revolução de uma curva ao redor de um eixo vertical, deslocado dos pontos da curva (Figuras 3 e 4). A curva e a superfície são semelhantes às da estação de trem de Stuttgart, tendo a forma de um cálice. No interior e a redor destes cálices, estão localizadas rampas, as quais, geometricamente, são conformadas por helicoides de superfície mínima.

Figura 3: Análises pelo estudante A das superfícies a serem modeladas parametricamente.

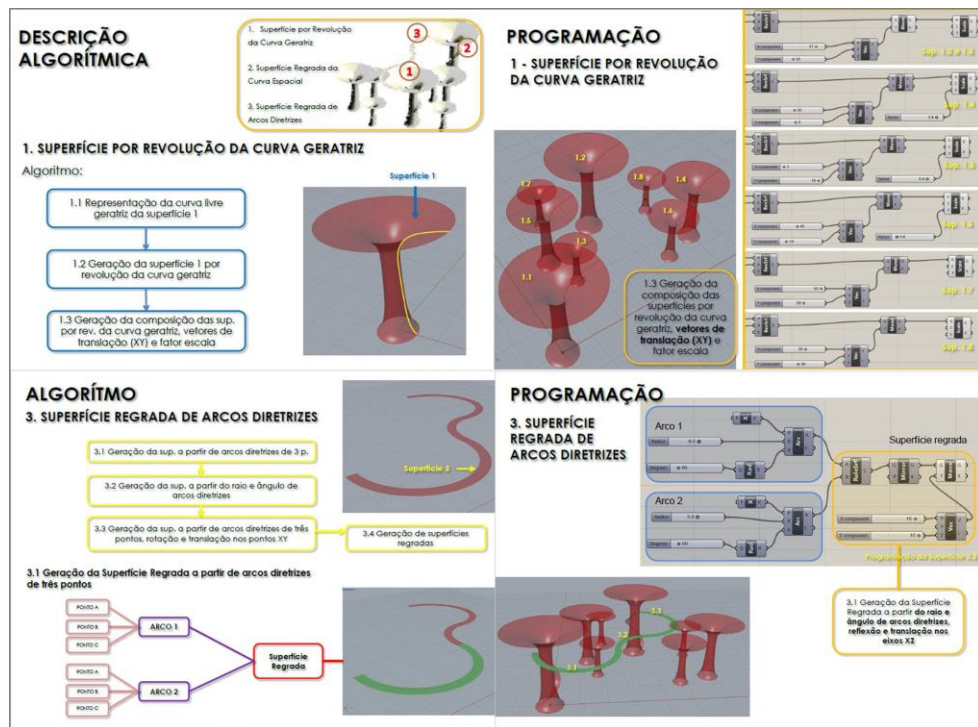


Fonte: Elaborado pelo estudante A (2017).

A obra é constituída por várias superfícies do mesmo tipo, mas definidas com diferentes escalas. Estas superfícies abrigam unidades de convivência, salas recreativas e espaços multiuso no projeto, e são conectadas por intermédio de passarelas que se estendem sobre o espaço do parque.

Para o processo de modelagem, o estudante inicialmente delimitou uma das superfícies e definiu a curva geratriz da geometria, modelando-a a partir de uma curva livre (paramétrica). Após esta definição, aplicou a esta curva a transformação de revolução de curvas, para gerar a superfície. Para configurar as demais superfícies componentes da obra, foram aplicadas transformações de escala, devido à ocorrência de instâncias da superfície em diferentes tamanhos, conforme já referido.

Figura 4: Modelagem paramétrica pelo estudante A das superfícies da obra estudada.



Fonte: Elaborado pelo estudante A (2017).

3.5.2. As Modelagens das Obras com Superfícies Mínimas em Enneper

A atividade apresentada pelo estudante B traz uma primeira análise geométrica da cobertura do terminal de ferry Yeoui-naru, do arquiteto Luca Poiam, identificando que está conformada por uma superfície mínima denominada pelo nome do matemático que a descobriu no século XIX (Enneper).

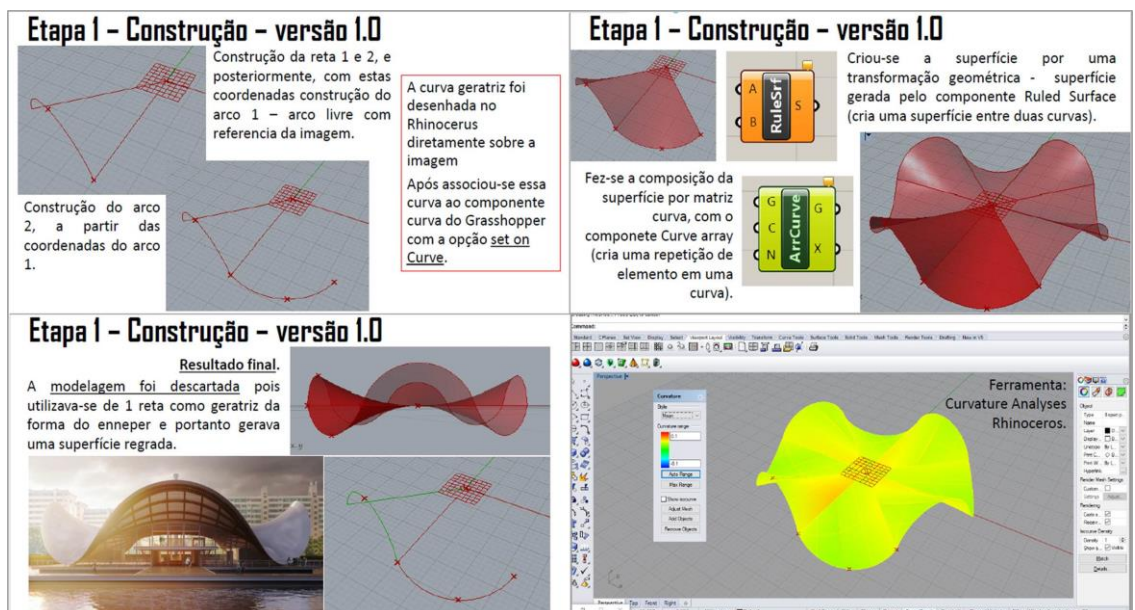
A partir das análises, o estudante identificou que esta poderia ser composta em simetria de uma porção que estava limitada pelas linhas retas presentes na superfície. Esta identificação foi possível ao consultar o material didático que apresenta a estrutura geométrica desta superfície. O estudante considerou que a superfície poderia ser formada por 08 partes iguais em simetria de reflexão e de rotação de 45 graus. As diretrizes ficariam determinadas pelas linhas retas e a geratriz por uma única curva. A superfície, pela hipótese traçada, seria gerada por superfície regrada (*ruled surface). Observa-se que nesta primeira análise apresentada pelo estudante (Figura 5) há um equívoco quanto ao uso do processo de

geração por superfície regradada, pois neste tipo de processo, as geratrizes são linhas retas, e na análise foram apontadas geratrizes curvas, e superfícies mínimas não podem ser geradas unicamente por linhas retas, com exceção do helicóide de plano diretor. A análise de curvaturas indicou um valor ligeiramente diferente de zero para a curvatura média, ilustrado na última imagem da mesma figura, em que a superfície fica caracterizada pela cor amarela.

Depois de esclarecimentos dados ao estudante, este refez a sua análise e fez a identificação de uma porção da superfície delimitada somente por curvas (primeira imagem da Figura 6), embora pudesse ter sido escolhida uma porção que tivesse uma reta na superfície. As geratrizes seriam duas curvas da borda da porção e a diretriz outra curva situada na borda externa desta porção. A técnica de geração escolhida foi de superfície a partir das bordas (*Edge surface).

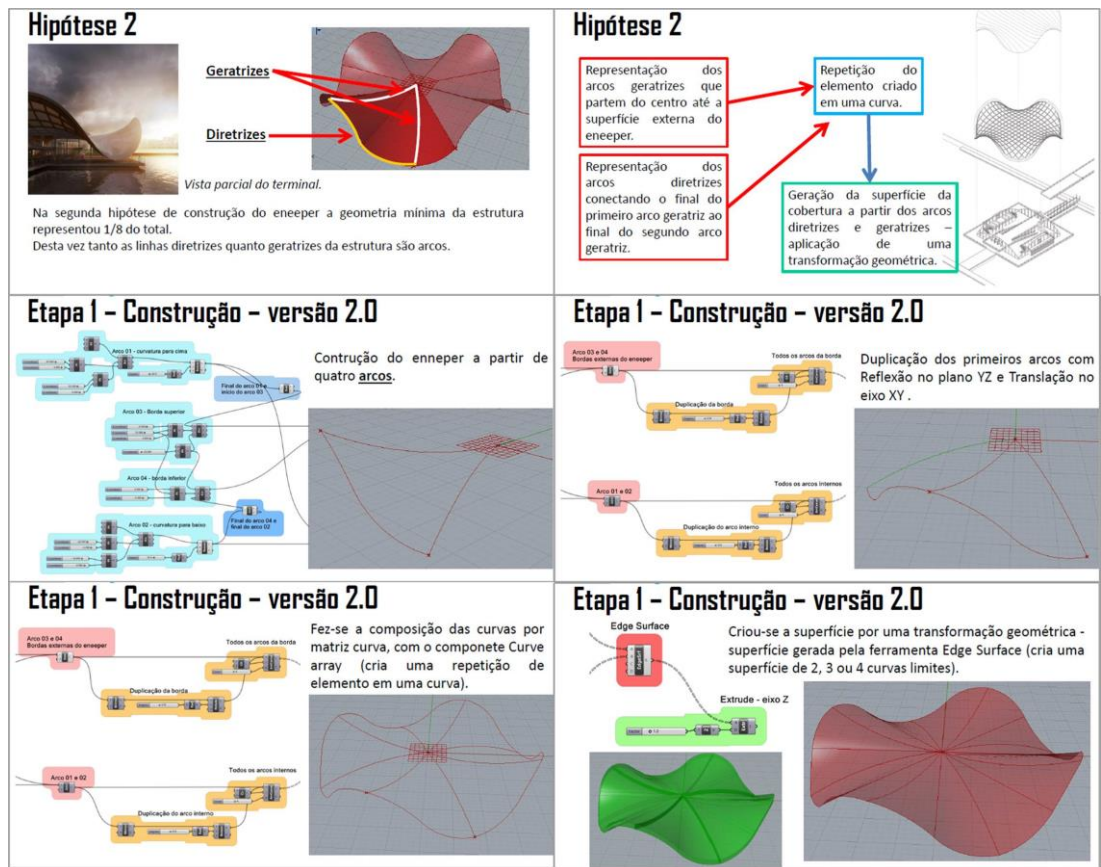
O estudante C também modelou uma superfície mínima em Enneper, a qual se configura com curvaturas mais acentuadas do que a superfície do estudante B. Ao fazer sua análise da superfície, o estudante incorreu no mesmo equívoco do estudante B, utilizando para o processo de geração a técnica de superfície regradada. O resultado deste processo, tal como ocorrido com o estudante B, foi uma superfície que não possui características de superfície mínima. O estudante também reformulou o processo de modelagem, utilizando a técnica de geração de superfícies a partir das diretrizes (curvas de borda).

Figura 5: Primeiro processo de modelagem pelo estudante B da superfície Enneper da obra.



Fonte: Elaborado pelo estudante B (2017).

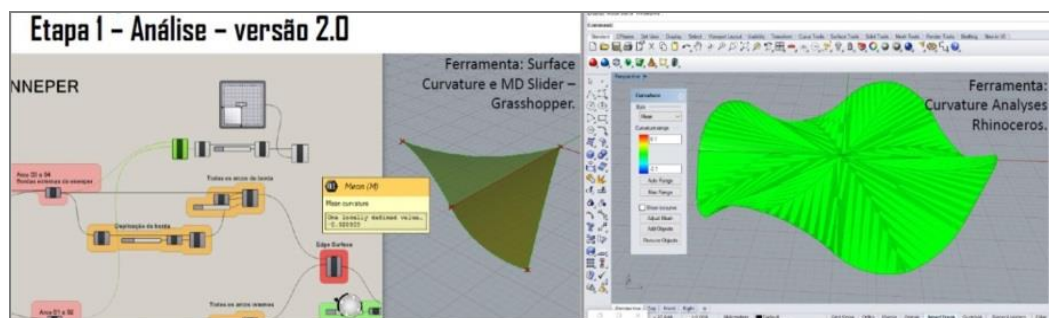
Figura 6: Análise e segundo processo de modelagem pelo estudante B da superfície Enneper da obra.



Fonte: Elaborado pelo estudante B (2017).

A análise de curvaturas (Figura 7), diferentemente da primeira superfície modelada, indicou valores praticamente iguais à zero para a curvatura média em todos os pontos da superfície, embora com pequenas variações na coloração verde clara sobre a superfície (cor que indica o valor zero para esta curvatura). Isto significa que a superfície gerada possui um comportamento muito próximo ao de uma superfície mínima.

Figura 7: Análise de curvatura da superfície Enneper modelada pelo estudante B.



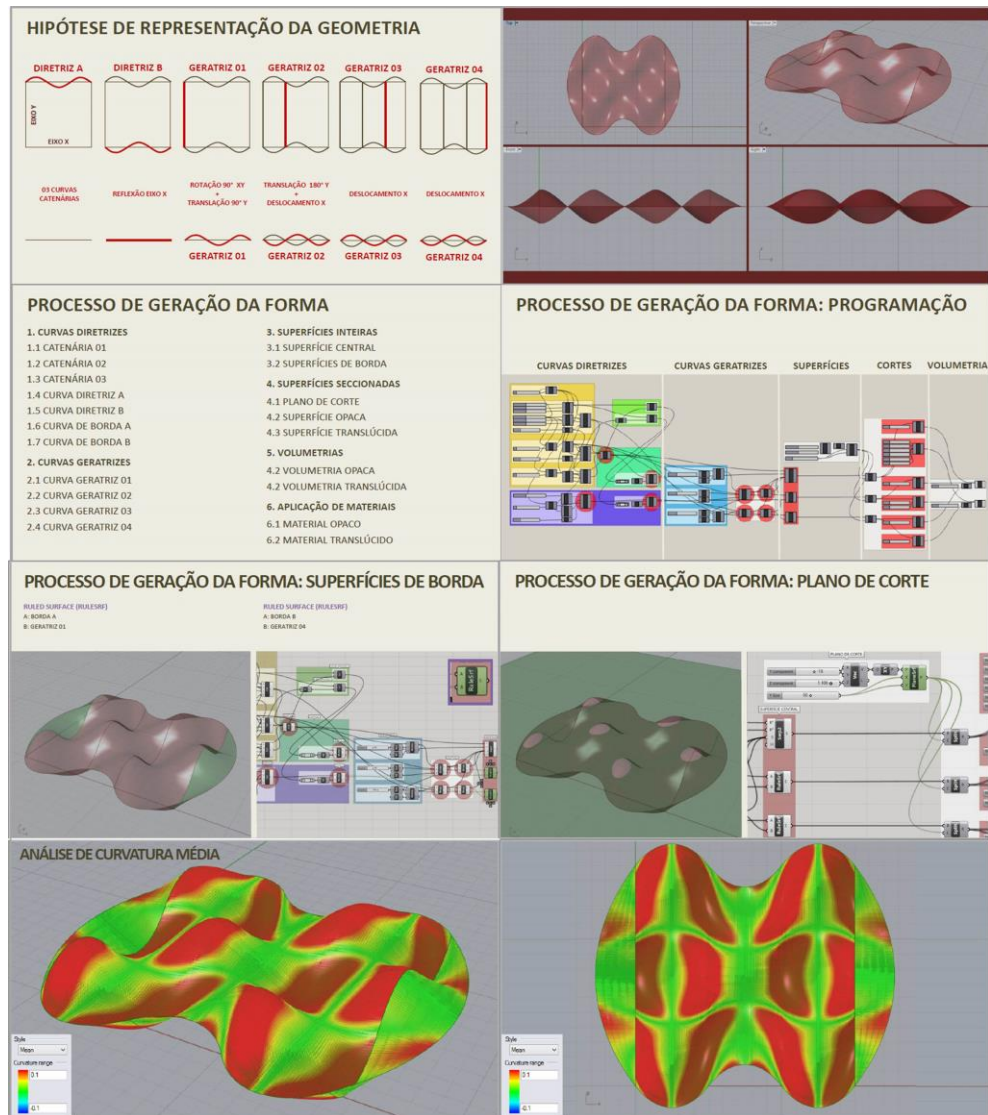
Fonte: Elaborado pelo estudante B (2017).

3.5.3. As Propostas de Projeto com Superfícies Construídas por Catenárias

A concepção da forma do estudante D baseou-se na geração de uma rede de curvas

constituídas por catenárias, configuradas como geratrizes e diretrizes da superfície proposta (Figura 8). O estudante utilizou o conceito de concordância entre curvas, o qual foi apresentado durante o desenvolvimento das atividades de modelagem de superfícies cilíndricas.

Figura 8: Hipótese e processo de modelagem propostos pelo estudante D.



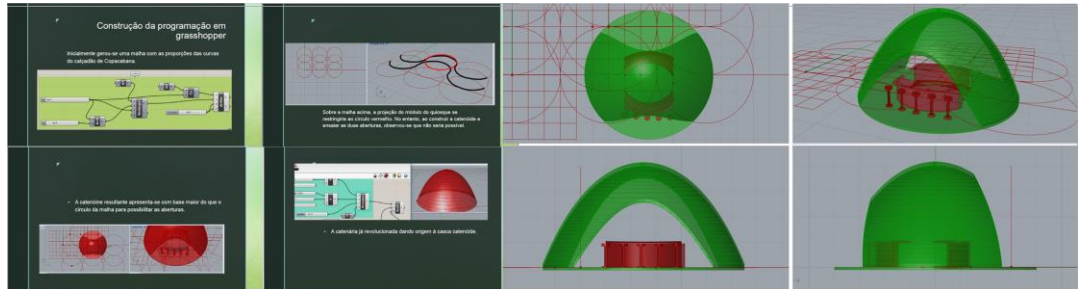
Fonte: Elaborado pelo estudante D (2017).

A composição de curvas geratrizes e diretrizes foi dada por simetrias de reflexão nos eixos x, y e z, com atribuição do parâmetro 'direção da gravidade' (um vetor no eixo y, com sinal positivo ou negativo e um valor de entrada); o estudante também apresentou a descrição de todas as etapas do processo de geração da forma (curvas diretrizes e geratrizes, geração da superfície e seções) e a programação visual completa.

O estudante E propôs uma superfície para um quiosque de praia inspirado pelas curvas do calçadão de Copacabana. Nesta etapa, o estudante lançou algumas hipóteses para gerar a superfície idealizada, que pudesse visualmente assemelhar-se às curvas do calçadão e que fosse gerada por curvas catenárias (Figura 9). A ideia do estudante era gerar uma cúpula em

catenoide.

Figura 9: Hipótese e processo de modelagem propostos pelo estudante E para um quiosque de praia, empregando curvas catenárias para gerar a superfície.



Fonte: Elaborado pelo estudante E (2017).

Quanto a este processo de modelagem desenvolvido pelo estudante E, destaca-se que a geometria formada não é de superfície mínima, pois o estudante modelou um catenoide em que o processo de geração foi da curva catenária em torno do eixo de simetria da curva. No entanto, o catenoide correspondente a uma superfície mínima é obtido pela revolução não em torno do eixo da curva e sim em torno de um eixo ortogonal a este eixo. Este é um processo que não ficou claro para o estudante, devido ao fato de tal superfície não ter sido abordada nos exemplos tratados nas atividades de modelagem paramétrica desta superfície. Aqui se pode salienta a importância da conexão integral entre os conceitos da geometria e as atividades de modelagem, ou seja, a necessidade de sempre haver uma abordagem de aplicação (técnicas com tecnologias associadas) para a compreensão de um conteúdo teórico de geometria.

O estudante F desenvolveu uma proposta de superfície em que a curva geratriz era semelhante à curva da obra *Main Station Stuttgart*, mas apenas em uma porção da curva, já que o estudante preferiu modificar a sua conformação em outra porção. Isso instigou a exploração da forma pelo estudante, embora houvesse grande probabilidade de que não seria configurada uma superfície mínima, já que tais superfícies possuem regras matemáticas rígidas ou são configuradas por modelos de suspensão (BURRY & BURRY, 2010). A proposta arquitetônica era de uma capela, em que o estudante, para conceituar sua proposta de projeto, utilizou os termos: Introspecção; Ideia de acolhimento, Segurança; Convergência para o centro; Espaço de culto. Outras palavras anotadas pelo estudante junto aos croquis de projeto são: Luz/sombra/cores; Estrutura integrada com cobertura; Fluidez na forma. O estudante, para desenvolver a sua proposta, delimitou as curvas diretrizes da superfície como arcos de circunferência, os quais foram inicialmente representados no processo de modelagem paramétrica (as duas primeiras imagens da Figura 10). As curvas geratrizes também foram construídas por segmentos de arcos de circunferência, em número de três.

Para as superfícies dos estudantes D e E (emprego de curvas catenárias) é possível se afirmar que estas não são modelos de superfícies mínimas e é muito remota a possibilidade de refinamento para atingir esta condição, devido à presença de somente curvas catenárias como geratrizes (caso do estudante D) e da não correspondência correta do processo de geração para curvas catenárias gerarem superfície mínima (caso do estudante E). Já para a proposta do estudante F não é possível fazer tal afirmação em princípio, seria necessário aprofundar a pesquisa quanto à abordagem de modelos funiculares (modelagem física ou simulação) em relação à definição geométrica de tais modelos sob a ação de forças físicas.

Figura 10: Proposta de projeto e processo de modelagem do estudante F para uma capela com cobertura inspirada na superfície da obra Main Station Stuttgart.

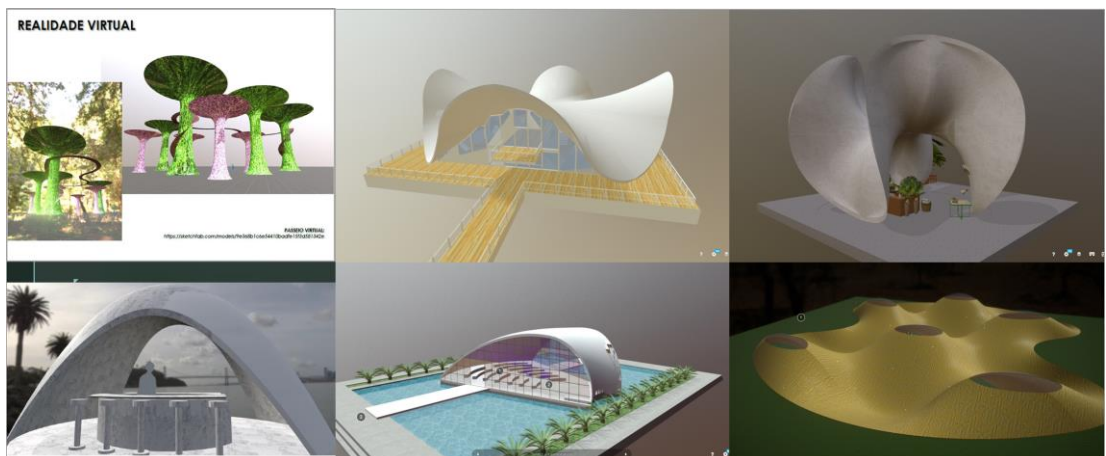


Fonte: Elaborado pelo estudante F (2017).

3.6. Superfícies em Realidade Virtual

A proposta didática ainda contou com uma etapa de desenvolvimento de modelos em realidade virtual (Figura 11), pelos estudantes dos projetos analisados na seção anterior. Esta objetivou que os estudantes pudessem ter uma melhor percepção das superfícies geradas principalmente em relação ao uso arquitetônico dado a cada uma delas, já que a partir desta técnica é possível “passar” em torno dos modelos e no interior destes. A proposta foi guiada por um bolsista de mestrado cujo tema consiste de aplicações para o ensino de arquitetura com o apoio de técnicas de realidade virtual e o qual atuou como colaborador da disciplina.

Figura 11: Modelos com inserção de texturas e exportados para realidade virtual.



Fonte: Elaborado pelos estudantes (2017).

Na etapa de preparação dos arquivos e de mapeamento de texturas, alguns destes modelos apresentaram superfícies não totalmente fechadas, como o segundo e o terceiro modelo da primeira linha da Figura 11, os quais foram reparados tanto para esta aplicação como para os modelos de impressão 3D.

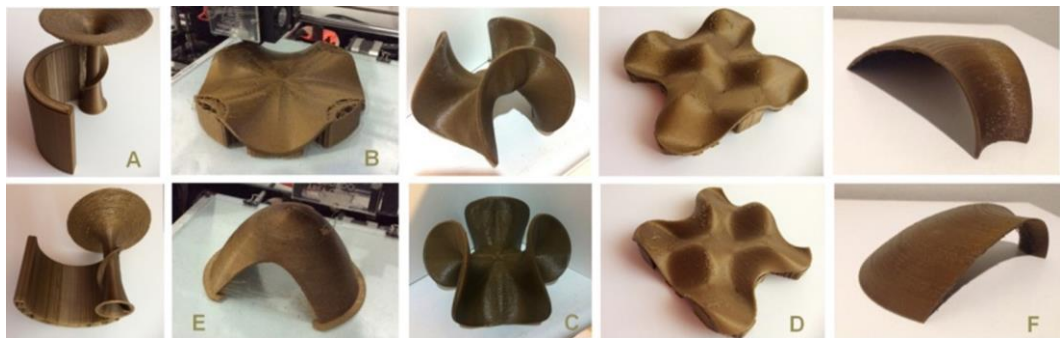
3.7. Impressão 3D das Superfícies

A materialização dos modelos obtidos por modelagem paramétrica teve o objetivo de proporcionar uma maior percepção da geometria modelada e foi desenvolvida por impressão 3D, que é uma tecnologia de fabricação aditiva, em que ocorre a sobreposição sucessiva de camadas de material, até que o objeto tridimensional seja formado (VOLPATO, 2007).

Para viabilizar as impressões, foi necessário atribuir espessura aos modelos, o que exigiu a aplicação de técnicas diferenciadas para cada tipo de superfície modelada, tais como extrusões e equidistância, em função da característica de suas curvaturas.

A Figura 12 ilustra os modelos de impressão 3D de cada uma das geometrias modeladas parametricamente pelos estudantes.

Figura 12: Modelos de impressão 3D das superfícies modeladas pelos estudantes.



Fonte: Elaborado pelo grupo de discentes e docentes (2017), com apoio do laboratório de fabricação digital PRONTO 3D/UFSC.

3.8. Análises das Atividades Quanto aos Objetivos Didáticos

Visando contextualizar e avaliar a proposta de aplicação frente aos objetivos traçados anteriormente, os quais se correspondem com os elementos de saber presentes nos propósitos da Teoria Antropológica da Didática (CHEVALLARD, 1999), as análises se concentraram na proposição e no desenvolvimento das atividades pelos estudantes, tendo seus princípios descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Objetivos didáticos das atividades de aplicação.

a. Compreensão da geometria e das técnicas de modelagem associadas
b. Apropriação da linguagem científica
c. Postura investigativa e busca de soluções de representação
d. Questionamento e uso correto dos conceitos abordados
e. Entendimento da lógica da representação paramétrica e proposição de soluções próprias alternativas
f. Experimentação e auto avaliação sobre o processo de desenvolvimento do trabalho.

Fonte: Elaboração própria.

Compreensão da Geometria e das Técnicas de Modelagem Associadas

Os resultados das atividades desenvolvidas pelo estudante A, B e C atingem o objetivo de compreensão da geometria e das técnicas associadas de modelagem paramétrica.

O estudante A em um primeiro momento não havia atingido este objetivo, em função

de não ter participado dos momentos didáticos que abordaram o tema superfícies mínimas. No entanto, em um segundo momento, a partir de orientações e consultas aos materiais didáticos, foi atingido um grau mais profundo de compreensão e por consequência de autonomia no processo de modelagem.

Os estudantes B e C apresentaram em suas atividades uma compreensão integral da superfície a ser representada, em seus entes geométricos fundamentais e os processos de geração e compositivos (os tipos de simetrias e seus parâmetros). Inicialmente, houve a adoção equivocada da de geração por superfície regrada para representar a superfície da obra. Mas em um segundo momento, os estudantes revisaram os conceitos e os processos de modelagem empregados, remodelando as superfícies com técnicas adequadas. Importante destacar que a resolução deste problema de modelagem influenciou no grau de satisfação dos referidos estudantes, motivando-os para as atividades de impressão 3D dos modelos.

A atividade desenvolvida pelo estudante D atingiu parcialmente este objetivo, por um lado pelo emprego totalmente autônomo dos conceitos geométricos compositivos (essencialmente por reflexão de curvas), aplicados sobre curvas catenárias para representar uma rede complexa de curvas geratrizes e diretrizes, que geraram uma superfície curva complexa a partir de transformações geométricas simples. Mas por outro lado, não resultou em uma superfície mínima.

A atividade apresentada pelo estudante E não apresenta um entendimento completo da geometria de superfície mínima e de seus processos de geração, devido ao tipo de catenoide obtido. Embora tenha havido uma satisfatória apropriação das técnicas de modelagem paramétrica pelo estudante, o catenoide modelado não é de superfície mínima.

A atividade desenvolvida pelo estudante F apresenta uma relação mais concreta entre geometria complexa e processo projetual, para um espaço de culto, no qual os conceitos de projeto foram expressos a partir da geometria utilizada. Os principais conceitos de projeto associados a geometria e apontados pelo autor da proposta são: luz/sombra/cores; estrutura integrada com cobertura; e fluidez na forma. Em termos de compreensão do conceito de superfície mínima e de seus processos de geração, esta proposta de atividade não atingiu plenamente o objetivo traçado. Em termos geométricos, a única proposição original do estudante foi para a definição da curva geratriz da superfície, baseada na curva de uma obra anteriormente estudada e na idealização do estudante para o formato da cobertura de seu projeto. Por outro lado, esta proposta apresentou de maneira mais clara e efetiva o uso dos conceitos da geometria e da modelagem paramétrica em uma aplicação de projeto.

Apropriação da Linguagem Científica

Em relação a este objetivo, considera-se que as atividades dos estudantes B e D apresentam um nível elevado de apropriação da linguagem científica. Na atividade do estudante C o emprego da linguagem científica é mais restrito do que o emprego em B e D. As atividades dos estudantes A e E empregam a linguagem científica, mas com algumas incorreções em determinados momentos. Na atividade do estudante F o emprego da linguagem científica é menos efetivo do que nas demais atividades analisadas. Ao comparar-se o alcance deste objetivo em cada uma das atividades analisadas com o primeiro objetivo que foi analisado nas mesmas atividades, é possível afirmar a existência de uma interdependência entre eles. Isto quer dizer que o nível de entendimento da geometria e dos processos de geração associados influencia a apropriação da linguagem científica e vice-versa.

Postura Investigativa e Busca de Soluções de Representação

Destacam-se com um nível pleno de atingimento deste objetivo, em particular, as atividades propostas pelos estudantes B e D. Justifica-se esta análise pelo fato de o estudante B ter buscado outra maneira de analisar a geometria a ser representada e ter formulado alternativas de representação em relação as tais análises geométricas, resolvendo o problema com o qual havia se deparado ao gerar uma superfície regrada. Mais do que isso, sua proposta de configuração da geometria foi a que chegou mais próxima, de fato, de uma superfície mínima, relativamente ao valor da curvatura média dos pontos da superfície em torno de zero.

A justificativa segue com a proposta do estudante D, o qual idealizou uma forma geométrica a partir de uma rede de curvas catenárias e transpôs de maneira autônoma tal idealização para o ambiente de modelagem paramétrica, reconhecendo que o emprego de transformações simples de simetrias por reflexão sobre curvas poderia gerar tal superfície, tendo esta alto grau de complexidade. Considera-se que tal fato caracteriza-se com um elevado nível de postura investigativa, em que o estudante tanto visualizou a geometria da superfície detalhadamente antes de efetivar a modelagem quanto concebeu uma geometria complexa com base nos conceitos relativamente simples de geometria apresentados nas atividades didáticas (curvas e processos de geração). A atividade do estudante E apresenta algum nível de postura investigativa, pela exploração de alternativas de geração da geometria idealizada, mas as quais não se corresponderam efetivamente com o conceito de superfícies mínimas solicitado para a atividade.

Questionamento e uso correto dos conceitos abordados

As atividades dos estudantes B e C novamente atingiram este objetivo, desde que ambos reformularam o seu entendimento sobre os conceitos tratados em relação a superfícies mínimas que também são regradas. Já a atividade do estudante D apresentou a incorreção de gerar uma superfície mínima apenas com curvas catenárias. As atividades do estudante A apresentam algumas incorreções, as quais não se relacionam ao conceito de superfícies mínimas. O principal equívoco conceitual foi apresentado na atividade do estudante E, devido a escolha incorreta do eixo de revolução da curva catenária para gerar o catenoide de superfície mínima.

Entendimento da Lógica da Representação Paramétrica e Proposição de Soluções Próprias Alternativas

Este objetivo foi alcançado com maior ênfase nas atividades apresentadas pelos estudantes B, C e D, novamente, com justificativas que estão relacionadas às anteriores para os demais objetivos. Isto reforça a existência de uma interdependência entre a compreensão da geometria e seus processos de geração, a apropriação da linguagem científica, a postura investigativa e busca de soluções de representação, o questionamento e o uso correto dos conceitos abordados e o entendimento da lógica da representação paramétrica e proposição de soluções alternativas. Pode se dizer que estes objetivos influenciam-se mutuamente, agindo como uma cadeia interconectada que irá refletir na postura dos estudantes quanto ao seu desenvolvimento frente à proposta das atividades. Já as atividades dos estudantes A, E e F foram mais limitadas que as anteriores em relação a tais aspectos.

Experimentação e auto avaliação sobre o processo de desenvolvimento do trabalho

As atividades dos estudantes B e C sintetizam o aspecto de auto-avaliação sobre o desenvolvimento da proposta, ao sistematizarem as reformulações e os tipos de aprendizagem

resultantes destas. A atividade do estudante D sintetiza um alto nível de experimentação, principalmente pela configuração geométrica complexa obtida, com o uso de curvas catenárias. A exploração de seções na parte superior da superfície, para gerar aberturas que seriam tratadas com material translúcido, reforça o grau elevado de experimentação. Este modelo, no entanto, inicialmente não foi possível de transpor para o ambiente de realidade virtual, devido ao fato de a geometria resultante ter um número elevado de polígonos, o que inviabilizou a aplicação de texturas sobre tal geometria e o processamento necessário para gerar a visualização neste ambiente. Devido a isso, a geometria do modelo teve que ser simplificada pelo estudante, para esta aplicação. As demais atividades novamente foram insipientes quanto a estes objetivos, com exceção da atividade do estudante E, a qual avalia de certa maneira o processo de desenvolvimento do trabalho, ao analisar as hipóteses de representação que foram investigadas.

4. Resultados e Discussão

As atividades de modelagem paramétrica desenvolvidas chamaram a atenção para aspectos teóricos não totalmente compreendidos durante a apresentação destes ou não associados pelos estudantes com o processo de modelagem (as próprias técnicas de geração de superfícies). Isto ocorreu com a geração de um tipo de superfície mínima escolhida por dois estudantes para os seus projetos, em que a técnica de geração inicialmente aplicada (por superfície regradada) não tinha correspondência com a regra geométrica desta superfície.

No entanto, tais aspectos da teoria em associação às técnicas não seriam identificados se não houvesse tido uma exploração mais profunda dos conceitos associados a tais superfícies (que permite também entender o significado de cada técnica de geração).

Quanto ao aspecto projetual, ficou claro que a representação de geometrias já aplicadas em obras de arquitetura é mais simples do que as geometrias idealizadas, situação em que houve maiores dificuldades para a conformação final da superfície. Em estágios mais avançados pode ser interessante trabalhar com esta liberdade de projeto, mas em estágios iniciais de aprendizagem isso pode não ser positivo em termos de aprendizagem, pela falta de experiência dos estudantes. Assim como frequentemente em estágios iniciais do ensino de projeto são usados referenciais estabelecidos da arquitetura moderna para análises e até mesmo para atividades de projeto, o estudo da geometria complexa da arquitetura contemporânea com foco nas superfícies matemáticas pode ser mais potente se ensinado a partir de exemplos significativos e projetos de arquitetos reconhecidos. Devido a que tais obras de arquitetura empregam geometrias já descritas matematicamente, as quais são conhecidas suas propriedades funcionais e arquitetônicas.

5. Considerações Finais

A aplicação de uma teoria didática atingiu o objetivo traçado inicialmente em que o próprio saber da geometria e das técnicas de modelagem paramétrica se constitui em um meio para resolução dos problemas de modelagem e proposição das superfícies complexas pelos estudantes. Este teoria foi enriquecida ao ser aplicada no contexto de ensino de arquitetura, já que normalmente a modelagem paramétrica das geometrias complexas é feita de maneira intuitiva e exploratória, com pouco conhecimento sobre as propriedades que tais geometrias possuem e sobre seus entes geométricos fundamentais e processos de geração.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de doutoramento e realização desta pesquisa e ao CNPQ por dar apoio à estruturação da rede de objetos de aprendizagem TEAR_AD (Tecnologia no Ensino e Aprendizagem em Rede nas áreas de Arquitetura e Design, <http://tearad.ufsc.br/>), da mesma universidade, ambiente que reúne objetos de aprendizagem e a rede de conceitos de base da geometria complexa (CONCEBA), desenvolvida no decorrer desta pesquisa.

Referências

BERTOL, Daniela. **FORM GEOMETRY STRUCTURE: from nature to design**. Exton, Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2011.

BORDA, Adriane Almeida da Silva. **Los saberes constitutivos del Modelado Geométrico y Visual, desde las instituciones científicas y profesionales a las Escuelas de Arquitectura: Un Análisis de Transposición Didáctica**. 2002. 500 pág. Tese (Doutorado). Universidad de Zaragoza, Espanha, 2002.

BURRY, Jane; BURRY, Mark. **The New Mathematics of Architecture**. London: ed. Thames e Hudson, 2010.

CHEVALLARD, Yves. **La Transposición didáctica**. Del saber sabio al saber enseñado. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 2013. 3ª ed. 4ª reimp. Título original: La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné. Grenoble: Pensée Sauvage, 2ème édition, 1991.

CHEVALLARD, Yves. El Análisis de las Prácticas Docentes en la Teoría Antropológica de Lo Didáctico. **Recherches en Didactique de Mathématiques**, Grenoble, Vol. 19, nº 2, pp. 221-266, 1999. (Traducción de Ricardo Barroso, Universidad de Sevilla). Disponível em: <<http://www.aloj.us.es/rbarroso/Pruebas/CHEVALLARD.PDF>>

CHILTON, John; CHUNG, Chu-Chun. Rooted in Nature: Aesthetics, Geometry and Structure in the Shells of Heinz Isler. **Nexus Network Journal**, v. 19, issue 3, pp. 763-785, Novembro de 2017.

LITTMAN, Jacob A. **Regenerative Architecture: A Pathway Beyond Sustainability**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado). University of Massachusetts – Amherst. Maio de 2009. Disponível em: <https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1389&context=theses> Acesso em: janeiro de 2016.

PEREZ-GARCIA, Agustin; GÓMEZ-MARTÍNEZ, Fernando. Natural structures: strategies for geometric and morphological optimization. **Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009**, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 28 September – 2 October 2009, Universidad Politecnica de Valencia, Spain. Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.)

PIRES, Janice de Freitas. **A constituição de uma rede de conceitos da geometria complexa da arquitetura contemporânea: das teorias a modelagem paramétrica das superfícies**. 28.06.2018. 435 p. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2018.

RODRIGUES, Álvaro. **Geometria Descritiva: Projeções, Curvas e Superfícies**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico Ltda., 1ª ed., 1960.

VOLPATO, Neri. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 1ª ed., 2007.

WOODBURY, Robert. **Elements of Parametric Design**. London: Routledge, 2010.