REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2019, Vol. 09, No. 19
DOI 10.23972/det2019iss19pp29-42

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

A estruturação do saber para o reconhecimento das superfícies complexas da obra Disney Concert Hall

Janice F. Pires[1]; Alice T. C. Pereira[2]

1 *Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil*

2 *Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil*

RESUMO

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. A presença desta realidade nos escritórios de arquitetura delimitou um problema didático para as escolas, relativa à preparação do futuro profissional de arquitetura para enfrentar esta realidade. 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, as técnicas e tecnologias de representação gráfica (como a modelagem paramétrica) e de construção. Identificou-se que a Teoria Antropológica da Didática, advinda da área da didática da matemática, poderia apoiar um processo de explicitação da estrutura de saber relativa a tais geometrias e os seus processos de modelagem paramétrica. Com isto, buscou-se explicitar didaticamente o saber envolvido em um conjunto de superfícies matemáticas adotadas na arquitetura contemporânea, a partir dos exemplos de obras analisadas por autores de referência. Visando alcançar o objetivo didático, estruturou-se uma rede de conceitos (retirado para não identificação) relativa à estrutura integral do saber envolvido na geometria de tais obras de arquitetura e, neste trabalho, relata-se a estruturação de tal saber para as superfícies matemáticas da obra Disney Concert Hall, de Gehry & Partners. O reconhecimento dos elementos de saber relativos a tal geometria permitiu não apenas compreendê-la em maior profundidade, mas também questionar e até mesmo refutar algumas caracterizações dadas por autores que analisam a arquitetura contemporânea sob o aspecto da geometria. Um estudo científico, desenvolvido pelo fundador do centro de tecnologia do escritório que projetou as superfícies da obra, tornou possível redefinir esta geometria e, ao mesmo tempo, forneceu subsídios para traçarem-se discussões sobre a importância de tal saber para o ensino de arquitetura.

PALAVRAS-CHAVE

Geometria Complexa;
Estruturas de Saber;
Modelagem Paramétrica;
Ensino de Arquitetura

The structuration of knowledge to the recognition of the Disney Concert Hall complex surfaces

ABSTRACT

The contemporary architecture of the last 20 years has been characterized by the adoption of geometries of great complexity, based on an aesthetic / formal sense, its structural performance and environmental comfort, or even the techniques present in computational devices, which facilitate the proposition by the architects of such geometries. The presence of this reality in the offices of architecture delimited a didactic problem for the schools, relative to the preparation of the future professional of architecture to face this reality. This problem involves the awareness and knowledge about the forms created in such design processes, pointing to the inclusion in the curricula of architecture faculties of didactic proposals that allow a wide interaction between the architectural foundations present in such complex geometries, relative to their theoretical elements, techniques, and technologies of graphical representation (such as parametric modeling) and construction. It was identified that the Anthropological Theory of Didactics, coming from the area of didactics of mathematics, could support a process of clarification of the structure of knowledge relative to such geometries and its parametric modeling processes. With this, we tried to explicitly explain the knowledge involved in a set of mathematical surfaces adopted in contemporary architecture, from the examples of works analyzed by reference authors. In order to reach the didactic objective, a network of concepts (removed for non-identification) was structured on the integral structure of the knowledge involved in the geometry of such architectural works. In this article, we report the structuring of such knowledge for the mathematical surfaces of the Disney Concert Hall by Gehry & Partners. The recognition of the elements of knowledge related to such geometry allowed not only understanding it in greater depth but also to question and even refute some characterizations given by authors who analyze contemporary architecture under the aspect of geometry. A scientific study, developed by the founder of the office's technology center that designed the surfaces of the work, made it possible to redefine this geometry and, at the same time, provided inputs to discuss the importance of this knowledge for architectural Teaching.

KEYWORDS

Complex Geometry;
Knowledge Structures;
Parametric Modeling;
Teaching Architecture

CONTATO: Janice de Freitas Pires – *janicefpires@hotmail.com*

© 2019 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

A arquitetura contemporânea dos últimos 20 anos tem se caracterizado pela adoção de geometrias de grande complexidade, sejam estas devido ao seu senso estético/formal, desempenho estrutural e de conforto ambiental, ou até mesmo pela incorporação de técnicas em dispositivos computacionais, as quais facilitam a proposição pelos arquitetos de tais geometrias em seus processos projetuais.

A presença desta realidade nos escritórios de arquitetura delimitou um problema didático para as escolas de arquitetura, relativa à preparação do futuro profissional que irá enfrentar tal mudança na prática profissional. Não se trata de instrumentar os estudantes exclusivamente para a utilização de ferramentas computacionais que lhes proporcionem liberdade formal, sem existir a consciência e o conhecimento sobre as formas que serão criadas, mas de incluir nos currículos das faculdades de arquitetura propostas didáticas que possibilitem uma ampla interação entre os fundamentos arquitetônicos presentes em tais geometrias complexas, relativos aos seus elementos teóricos, as técnicas e tecnologias de representação gráfica e de construção.

Visando aprofundar esta questão e buscar uma resposta para tal problema, foi desenvolvida uma pesquisa em nível de doutorado, que teve o objetivo de explicitar didaticamente o saber envolvido em um conjunto de superfícies matemáticas adotadas na arquitetura contemporânea, a partir dos exemplos de obras analisadas por Burry & Burry (2010). A explicitação de tal saber fundamentou-se nos pressupostos da Teoria Antropológica da Didática – TAD (Chevallard, 1999), para a qual um saber está constituído por uma estrutura dinâmica, que possui os seguintes elementos: um problema ou uma classe de problemas a serem resolvidos; uma técnica ou várias técnicas de resolução; as tecnologias que justificam, explicam e suportam as técnicas; e as teorias, que desempenham este mesmo papel em relação à tecnologia, referindo-se a um nível mais profundo de explicação destas. Chevallard (1991) destaca que, de acordo com o contexto em que o saber está sendo inserido, um ou outro elemento de tal estrutura do saber será preponderante ao outro, no entanto o autor pontua que, em um contexto didático, o saber deve estar constituído em sua estrutura integral.

Para alcançar o objetivo de explicitar o saber envolvido nas superfícies matemáticas adotadas na arquitetura contemporânea dos últimos 20 anos, constituiu-se uma rede de conceitos (retirado para não identificação) relativa à estrutura integral do saber envolvido na geometria de tais obras de arquitetura. Neste artigo, relata-se o processo de explicitação de tal saber para as superfícies matemáticas da obra Disney Concert Hall, de Gehry & Partners, discutindo-se por fim a sua importância para o ensino de arquitetura.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme anteriormente descrito, a explicitação do saber da geometria complexa da arquitetura contemporânea, relativo às superfícies matemáticas, fundamentou-se nos pressupostos da Teoria Antropológica da Didática - TAD (1999), do educador francês Yves Chevallard.

Para Borda (2002), as teorias deste autor auxiliaram a identificar que tipos de conteúdos ou elementos de saber (nos termos da TAD) necessitavam serem tratados estrategicamente para a ocorrência da inserção da tecnologia digital nas escolas de arquitetura no final do séc. XX e início do séc. XXI (transposição didática, nos termos da Teoria da Transposição Didática - TD, do mesmo autor). Segundo a TD, um conteúdo didático sofre transformações quando transita em diferentes contextos institucionais (científico, profissional e educativo) e isto se deve a caracterização que é dada ao próprio saber, em que, num dado contexto, por exemplo, é atribuída uma maior importância à inserção dos elementos tecnológicos de um saber, e em outro, dos elementos teóricos que constituem este mesmo saber, ou, em adição, das técnicas. Por esta teoria, estes elementos associam-se a resolução de um problema específico ou de uma classe de problemas relacionados. Em um processo de transposição de um determinado saber para o contexto educativo, para que se preserve a estrutura integral deste saber (conforme exigido pela TD), é necessário promover o reconhecimento dos elementos que o constituem. A mesma autora considera que a TAD, a partir da caracterização de tais elementos, fornece um quadro teórico de base para análise do saber.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Com base no modelo de análise descrito na seção anterior, desenvolveu-se um estudo analítico sobre as superfícies matemáticas da obra Disney Concert Hall, em que explorações em modelagem paramétrica trouxeram uma compreensão mais profunda da estrutura geométrica de tais superfícies. O estudo partiu de descrições apresentadas por autores que analisam arquitetura, sendo que estas foram sendo explicadas pela adição de novas estruturas de saber abordadas por autores específicos da área da matemática e geometria, que deram suporte também para as explorações em modelagem paramétrica.

Por fim, todos os elementos de saber foram reunidos em uma rede de conceitos de suporte ao ensino de arquitetura. O estudo ficou assim caracterizado pelas seguintes etapas: - O reconhecimento de descrições relativas à geometria da obra de arquitetura; - A análise e explicitação do saber que envolve tal geometria; - A estruturação dos elementos de saber relativos à superfície da obra (incluindo-se a modelagem paramétrica); - A constituição de uma rede de conceitos que abarca tal estrutura de saber.

3.1 Uma Descrição Inicial da Obra

O *Disney Concert Hall* (Figura 01) é uma sala de concertos, um espaço projetado por Gehry e Partners para ser a casa da Filarmônica de Los Angeles e é, ao mesmo tempo, uma escultura de forma livre. A concepção desta obra teve como premissa a evolução do projeto do espaço do salão em conjunto com a acústica, resultando em uma proposta de projeto do interior para o exterior.



Figura 1 Fotografia aérea do Disney Concert Hall, de Gehry & Partners.
Fonte: Mizzomi (2015).

Segundo o site da Filarmônica de Los Angeles, o cuidado com a acústica se evidencia na contratação de Minoru Nagata,

responsável pelo projeto acústico do *Suntory Hall* de Tóquio, aclamado quanto aos seus aspectos de desempenho. Suas superfícies são revestidas de aço inoxidável, formando uma cortina ou pele independente, curvada, composta de superfícies onduladas convexas e côncavas.

Para Shelden (2002), um dos fundadores e diretor de tecnologia do TCO (*Technology Officer*) da *Gehry Technologies*, a variedade de formas geométricas apresentadas nas obras de Gehry remete ao desenvolvimento de uma taxonomia abrangente. Segundo o autor, em tais formas, existe um conjunto importante de intenções de construção comuns, unificadas por abordagens que são semelhantes à manipulação de materias de superfície, e que ficam sujeitas a um conjunto comum de restrições associadas de construtibilidade e economia.

A partir de Pottmann et al (2007) e Rodrigues (1960), é possível identificar a classe de superfícies a qual pertence à geometria adotada na obra do *Disney Concert Hall*: estas são da classe de superfícies denominadas de regradas planificáveis (como definem os primeiros autores), ou da classe das superfícies retilíneas desenvolvíveis (nomenclatura sistematizada em Rodrigues a partir dos estudos de Gaspar Monge para a geometria descritiva).

Shelden (2002, pág. 170) destaca que o comportamento destas superfícies é como o de uma folha de papel: "podem ser desenroladas em uma configuração plana sem deformação da superfície". Este comportamento assinala o mesmo autor, é o esperado para uma folha de material de superfície fabricada, sendo tais superfícies um elemento importante no arsenal de técnicas utilizadas em Gehry e Partners para a modelagem da construtibilidade.

A seguir será feita uma análise dos elementos de saber que constituem esta classe de superfícies, inicialmente a partir das descrições de Burry e Burry (2010), e logo, por outras abordagens, visando compreender os principais conceitos geométricos intrínsecos a estas superfícies.

3.2 Descrição e Imagens da Obra a partir de Burry & Burry (2010)

Nesta seção, apresenta-se um resumo da análise feita por Burry & Burry (2010) para a obra Disney Concert Hall, de Gehry e Partners (1988-2003), contendo as descrições mais significativas em relação à definição do projeto e principalmente a geometria da obra, objetivando facilitar a leitura e a análise do saber que será desenvolvida na sequência. As palavras e expressões assinaladas no texto referem-se: aos conceitos (marcadas na cor cinza); às descrições ou explicações dos conceitos (sublinhadas em cor preta); e aos termos e expressões que caracterizam a geometria da superfície (palavras em formato itálico).

Quanto ao projeto, Burry & Burry citam o fato de este ter evoluído conjuntamente com os projetos acústicos, com destaque para o salão como elemento organizador central do projeto, visando ampliar o âmbito do edifício: "a ideia do público em casa, abraçando os artistas" (Burry & Burry, 2010, pág. 44). Os autores explicam que o projeto desenvolveu-se em uma linhagem tectônica, a qual havia sido adotada inicialmente por Gehry na década de 1980 com o Vitra Design Museum em Weil am Rhein, com ideias que buscaram a expressão mais completa da realização do Bilbao Guggenheim em 1997.

Segundo Burry & Burry (2010, pág. 44), assim como ocorre em toda a arquitetura construída, em Gehry "há um processo de tradução, desde a sua concepção abstrata aos vários modos de representação de idéias e intenções (geralmente iterativas), a descrição para construção, para a realização construída". Os autores destacam o trabalho de Dennis Shelden, fundador de um CTO da Gehry Technologies, o qual possui "um quadro teórico claro no qual ele vê estas traduções, que considera os mapeamentos bem definidos de transformações matemáticas entre espaços geométricos topológicos diferentes, mas relacionados" (BURRY & BURRY, 2010, pág. 45). Para os autores, as superfícies sinuosas adotadas por Gehry "têm suas próprias características inerentes, tendo tais geometrias construções diferentes, mas que necessitam ser mapeadas com um sentido de elementos de construção unitários, os quais tem que estarem de acordo com várias regras de ordenação para apoiar e abrigar o edifício e em conformidade com as convenções de gravidade e direcionalidade no mundo físico". Burry e Burry (2010) destacam que a modelagem física de tais superfícies desenvolvíveis deve aderir a uma linguagem de materiais em folha, mas a modelagem computacional incorpora restrições que são desconhecidas quando se está modelando com o papel no mundo físico, como por exemplo, de acordo com Shelden, 2002, o coeficiente de curvatura inerente a cada material, como o papel e o aço. No entanto Burry e Burry explicam que, por não haver necessidade, num primeiro momento, de se conhecer as restrições da modelagem computacional inerente a estas superfícies, a manipulação direta sobre folhas de papel facilita a sua adoção no projeto de arquitetura.

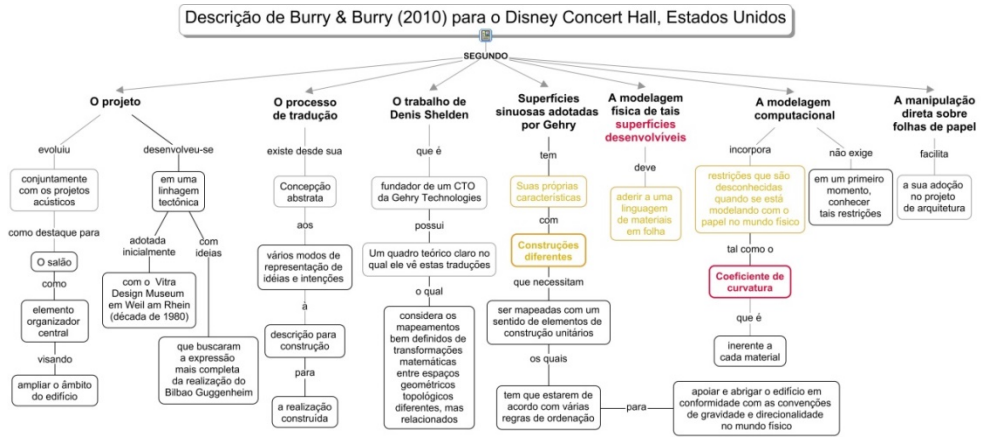


Figura 2 Mapa conceitual que expressa uma ontologia em linguagem natural relativa à descrição de Burry e Burry para o Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

A descrição de Burry & Burry foi esquematizada (Figura 2) em um mapa de conceitos, contendo os termos associados à obra, as descrições sobre estes termos e as relações entre estes elementos, caracterizando uma ontologia em linguagem natural

Sobre esta descrição foram marcados com retângulos na cor vermelha os conceitos geométricos a serem ampliados e na cor amarela os conceitos que se referem aos tipos de entes geométricos e seus atributos formais.

Na sequência estes termos e definições serão analisados a partir de referênciais específicos da geometria tais como Pottmann et al (2007) e Rodrigues (1960). Também será utilizado como referêncial de análise o trabalho de doutorado de Shelden (2002), o qual é específico sobre as superfícies sinuosas da arquitetura de Gehry e a configuração de sua construtibilidade.

3.3 Análise do saber – superfícies desenvolvíveis e curvatura

Segundo Burry e Burry (2010), estas superfícies caracterizam-se pelos conceitos de curvatura e superfícies desenvolvíveis. Para interpretá-las, existe uma preocupação com a sua 'curvatura gaussiana', conforme descrito em Burry & Burry (2010, pág. 255). Para o autor, uma superfície desenvolvível é uma superfície cuja curvatura Gaussiana tem valor igual à zero em todos os pontos. Essa superfície pode ser um plano, mas também um cilindro. Um cone ou qualquer uma das muitas outras formas curvadas ou dobradas que se pode criar a partir de uma folha plana com dimensões estáveis e que não pode ser esticada, mas pode ser cortada e colada.

As superfícies desenvolvíveis, adotadas por Gehry para o projeto do *Disney Concert Hall*, sendo de curvatura única e que podem ser desenroladas no plano, segundo Burry & Burry (2010, pág. 46), "podem ser exploradas diretamente para encontrar estruturas de apoio e para a construtibilidade no edifício".

Todas as superfícies desenvolvíveis são superfícies regradas – uma de suas principais curvaturas em cada ponto é o produto da curvatura positiva da seção circular e a curvatura zero da linha reta da extensão do circulo na terceira dimensão. Superfícies desenvolvíveis são bastante significantes no projeto de arquitetura, proporcionando uma ampla gama de formatos que podem ser fabricadas a partir de uma folha plana de algum tipo de material, ou de materiais planos que podem realizar somente uma única curvatura limitada (Burry & Burry, 2010, pág. 255).

A curvatura Gausiana é o produto das curvaturas principais (Pottmann ET AL, 2007). Tendo as superfícies regradas desenvolvíveis uma única curvatura, seus pontos são dos tipos elípticos e parabólicos, ou seja, um ponto qualquer desta superfície sempre terá em uma das direções principais uma curvatura que pode ser positiva ou negativa, e na outra direção principal curvatura nula, pela existência de uma linha reta contida em um plano que também contém as retas infinitamente próximas a esta linha (Pottmann ET AL, 2007; Rodrigues, 1960). Se uma das curvaturas é nula, a curvatura Gausiana como produto das duas curvaturas, também será nula.

Devido a este fato, Pottmann ET AL (2007) destacam que estas superfícies são caracterizadas pela propriedade de poderem ser mapeadas isometricamente no plano, ou seja, mapeamentos em que os comprimentos das curvas são preservados (Figura 3). O desdobramento plano da superfície é também chamado de seu desenvolvimento. Como os mapeamentos isométricos preservam a curvatura gaussiana, uma superfície desenvolvível tem a mesma curvatura gaussiana que o plano (isto é, tem uma curvatura gaussiana em extinção) sendo seu desdobramento em modelos de papel um meio importante no processo de projeto arquitetônico.

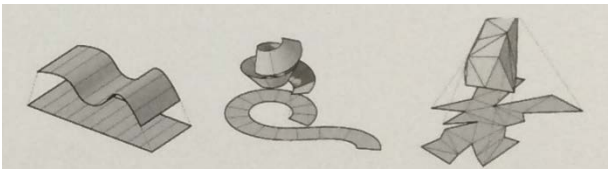


Figura 3 Mapeamentos isométricos das superfícies desenvolvíveis sobre o plano.
Fonte: Pottmann ET AL, 2007.

A estrutura de saber que descreve os elementos geométricos primários e o processo de geração das superfícies desenvolvíveis foi analisada a partir de Rodrigues (1960) e Pottmann ET AL (2007). Para estes autores, tais superfícies são constituídas basicamente por superfícies cilíndricas, cônicas e superfícies tangentes de curvas espaciais (mais precisamente o helicoide desenvolvível). No helicoide desenvolvível, as tangentes da hélice diretriz formam um ângulo constante ϕ com o plano da circunferência diretriz de base, sendo este ângulo de inclinação fixo para todas as tangentes, as quais são as geratrizes do helicoide. Isto resulta em uma superfície com inclinação fixa, ou seja, conformada por curvas de declive constante (Pottmann ET AL, 2007).

De acordo com a classificação de Monge, sistematizada por Rodrigues (1960), as superfícies em questão podem ser geradas pelo movimento de linhas retas (geratrizes) apoiadas em linhas curvas, o que as caracterizas como superfícies retilíneas, ou pela extrusão de linhas curvas ao longo de um eixo contido em um plano perpendicular ao plano que contém tais curvas, quando são então classificadas como superfícies propriamente curvas. O cilindro e o cone (Figura 4), por exemplo, são classificados em Pottmann ET AL (2007) como superfícies retilíneas devido ao processo de geração pela rotação de uma reta ao redor de um eixo de rotação.

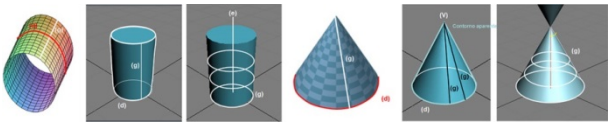


Figura 4 Processos de geração de superfícies cilíndricas e cônicas.
Fonte: Elaboração própria a partir de Rodrigues (1960). Imagem á esquerda e ao centro obtidas na Enciclopédia Livre Universal em Espanhol e na Wikipedia.

Em Rodrigues (1960) a classificação como 'superfícies propriamente curvas' é devida ao processo de extrusão de uma circunferência na direção de uma reta perpendicular ao seu plano (caso do cilindro) ou a extrusão de circunferências de raios variáveis que convergem para um vértice (caso do cone).

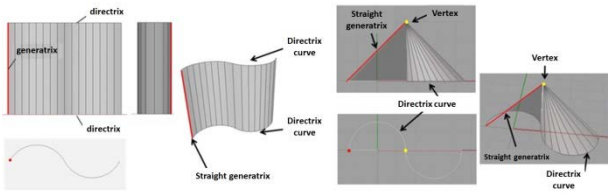


Figura 5 Elementos principais das superfícies cilíndrica e cônica geral.Fonte: Cilíndrica por Cristiane Nunes (bolsista de iniciação científica do GEGRADI/UFPel) e Cônica por elaboração própria.

As superfícies cilíndricas e cônicas classificadas como 'superfícies retilíneas' por Rodrigues (1960) são do tipo geral aberta, geradas pelo movimento de linhas retas apoiadas em

arcos de circunferência (partes da curva) e estão ilustradas na Figura 5.

Estas superfícies também podem ter diretrizes em *curvas livres* (curvas suaves que se pode formar e transformar por um pequeno número de pontos de controle, mantendo-se a continuidade da curva, segundo Pottmann ET AL, 2007). No entanto, os mesmos autores consideram a classificação de *superfícies regradas* (nomenclatura utilizada para descrever superfícies em que as geratrizes são linhas retas que varrem o espaço tridimensional com base em regras específicas, segundo Pottmann ET AL, 2007) também para o cone e o cilindro de revolução. A mesma Figura ilustra os elementos principais das superfícies cilíndricas e cônicas geral.

Inicialmente, por meio de uma análise visual, identificou-se que estas poderiam ser as superfícies predominantes na estrutura geométrica do *Disney Concert Hall* de Gehry. Além destas, também se identificou o emprego de superfícies retilíneas desenvolvíveis em que as diretrizes são *curvas livres* (flexíveis). Estas curvas podem ser representadas por meio de curvas paramétricas, tais como Splines, curvas de Bèzier e NURBS (Pottmann ET AL, 2007), que são conformadas por pontos de controle, sendo necessário compreender como cada curva é manipulada, suas características e as diferenças entre cada tipo dentro desta classe. Na Figura 6 está ilustrada uma superfície que possui como diretriz curvas livres que foram representadas digitalmente a partir de curvas NURBS.

À curva superior diretriz desta superfície foi aplicada uma escala de redução, o que gerou uma superfície cônica. Esta curva também foi transladada no eixo y, gerando uma superfície cônica inclinada.

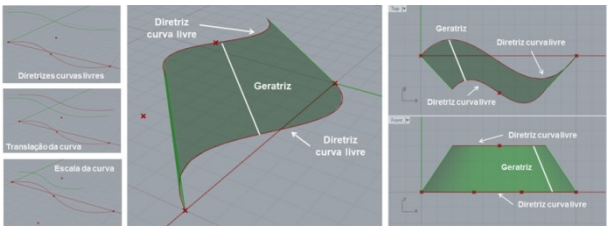


Figura 6 Superfície cônica geral inclinada formada por diretrizes em curva livre. Fonte: Elaboração própria.

3.4 Modelagem Paramétrica das Superfícies da Obra

O processo de modelagem envolveu as etapas: de análise gráfica sobre as imagens das superfícies da obra; a identificação de suas geratrizes, diretrizes e regras de geração; e o desenvolvimento de algoritmos que contemplassem as etapas dos processos de representação paramétrica.

Para o estudo em questão, delimitaram-se quatro superfícies, as quais estão demarcadas sobre uma fotografia aérea do edifício Disney Concert Hall e sobre a vista ortográfica superior referente à sua implantação (Figura 7).



Figura 7 Delimitação das superfícies da obra Disney Concert Hall a serem estudadas: à esquerda, sobre a fotografia aérea; à direita, sobre a implantação. Fonte: Mizzomi (2015) e Gehry & Partners.

A análise partiu da ideia que as superfícies da obra poderiam ser essencialmente configuradas por dois tipos de superfícies desenvolvíveis, as cilíndricas e as cônicas. Em uma primeira análise sobre a planta-baixa da obra identificou-se visualmente que as curvas diretrizes das superfícies 1, 2, 3 e 4 podem ser descritas por curvas livres, sendo que: na superfície 1 a diretriz superior parece ser exatamente igual à diretriz inferior da curva, tanto em formato como em dimensão, configurando uma porção de uma superfície *cilíndrica geral*; na superfície 2 a curva diretriz superior tem uma semelhança para a curva diretriz inferior, com uma diferença de escala em relação a esta, configurando uma superfície *cônica geral*; e na superfície 3, ao analisarem-se imagens de sua estrutura construtiva, observou-se que parecem existir muitas porções de superfícies regradas, podendo-se distinguir entre elas porções de *superfícies cônicas* e de *superfícies cilíndricas*. A superfície 4 visualmente remete a uma porção de uma *superfície cônica*, em que a diretriz é uma curva livre ou uma composição de arcos de circunferência. No entanto, somente uma análise detalhada e precisa destas superfícies poderá definir com exatidão as hipóteses traçadas a partir da análise visual. Destaca-se que, inicialmente, foram selecionadas as superfícies 1 e 2 para análise e representação, pela hipótese de poderem ser geradas a partir de apenas duas curvas diretrizes caracterizadas por igualdade ou semelhança entre elas, fazendo com que uma das curvas possa ser representada a partir da outra.

3.4.1 Modelagem das Superfícies 1 e 2

A análise destas superfícies visando sua modelagem paramétrica foi feita por meio de traçados sobre a projeção superior (planta-baixa) do projeto, conforme ilustrado na linha superior das Figuras 8 e 9. Tomaram-se as dimensões de largura, altura e profundidade das superfícies, para representar um retângulo de referência para inserir as imagens em vista superior no ambiente do *Rhinoceros*.

A curva diretriz inferior de ambas as superfícies foi traçada por meio de uma curva livre a partir da imagem inserida no Rhinoceros em vista superior. Para a superfície 1, esta curva foi importada para o ambiente de modelagem paramétrica do Grasshopper para extrair seus pontos de controle e gerar uma curva interpolada por estes pontos (Figura 8, linha inferior à direita).

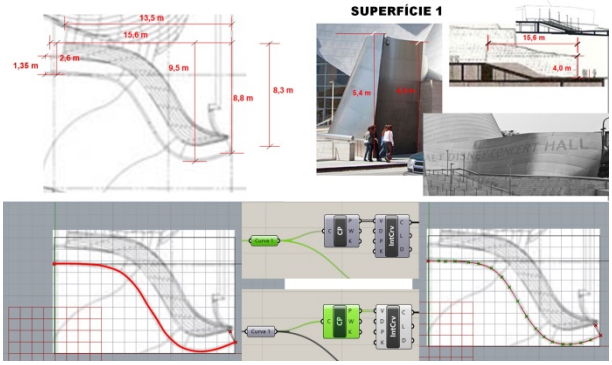


Figura 8 Análise das dimensões da Superfície 1, em projeção superior e vista frontal, e representação da curva diretriz inferior no ambiente do Rhinoceros e do Grasshopper. Fonte: Elaboração própria a partir das imagens de Gehry & Partners.

Para representar a geratriz inferior da Superfície 2 foi construída uma curva livre do tipo NURBS de grau 2, a partir também da definição de pontos de controle, em número de três, os pontos inicial, final e um ponto no interior da curva (Figura 9, linha inferior ao centro e à esquerda). A justificativa para o uso de curvas livres de tipos diferentes tem o objetivo didático de inserir os conceitos e técnicas associados a estes tipos de curvas e suas diferenciações.

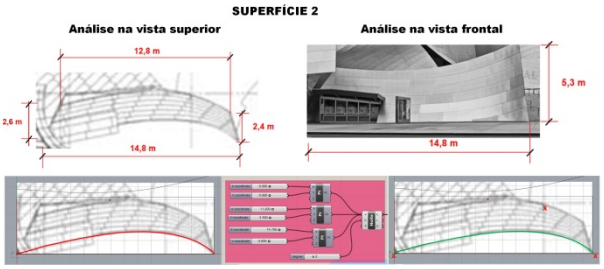


Figura 9 Análise das dimensões da superfície 2, em projeção superior e vista frontal, e representação da curva diretriz inferior no ambiente do Grasshopper.
Fonte: Elaboração própria a partir das imagens de Gehry & Partners.

A representação da segunda geratriz das superfícies (localizadas em sua parte superior) foi feita por instância e translação no eixo Z da curva diretriz inferior. Para a superfície 1, esta instância se deu pelo processo de equidistância (*offset*) e translação no eixo Z da curva diretriz (à esquerda da Figura 10). Para a superfície 2, a instância da curva foi obtida por translação em Y e Z da curva inicialmente representada e a aplicação da transformação de escala, em um fator de 0.95 (uma redução de tamanho).

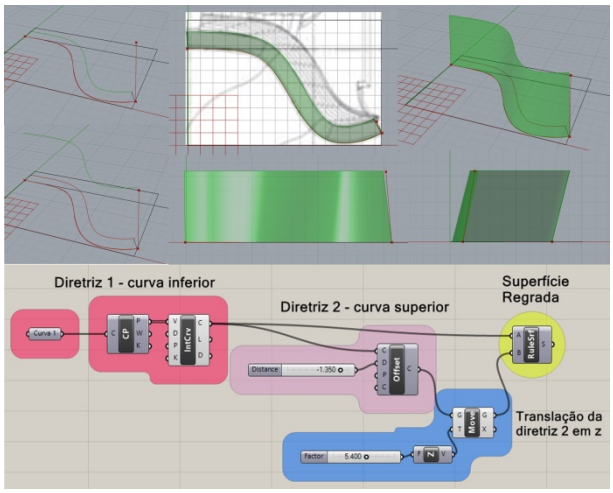


Figura 10 Processo de geração da Superfície 1 do Disney Concert Hall com a respectiva modelagem por programação visual.
Fonte: Elaboração própria.

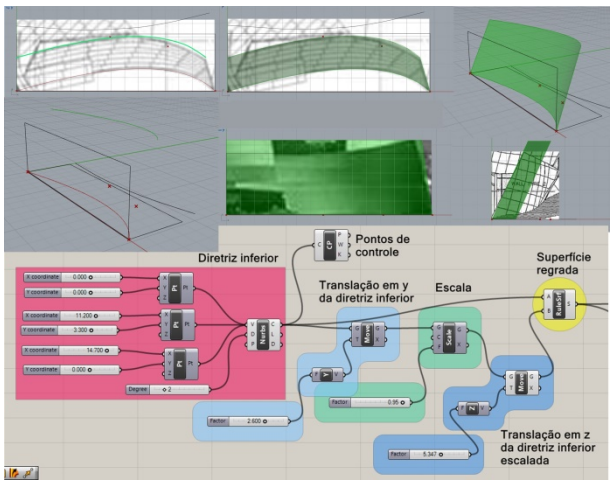


Figura 11 Primeira parte do processo de geração e modelagem por programação visual da Superfície 3 do Disney Concert Hall.
Fonte: Elaboração própria.

A superfície regrada pode então ser gerada a partir das duas curvas diretrizes da superfície (ao centro e à direita das Figuras 10 e 11). Na parte inferior das mesmas Figuras encontram-se as modelagens paramétricas das superfícies 1 e 2. A superfície 2 resultante é do tipo cônica geral, devido à diferença de escala das curvas diretrizes.

Na análise inicialmente desenvolvida para a superfície 2 também foi identificado que existe um recorte na parte superior da superfície, em formato curvo, sendo necessário, após gerar a superfície, realizar uma seção nesta superfície, com um plano curvo que se corresponda com o perfil do recorte.

Ao trabalhar-se com vistas ortográficas, destaca-se que a curva visualizada em tais vistas (como na vista frontal) é uma projeção da curva que está no espaço tridimensional, ou seja, esta curva que será representada diretamente sobre a imagem em vista ortográfica, por ser uma curva plana, não irá ajustar-se a superfície curva no espaço tridimensional. Isto ocorre porque a superfície curva no espaço tridimensional possui pontos em diferentes planos. Por isto foi necessário gerar um plano de seção com o formato desta curva, para que tal perfil contido neste plano pudesse seccionar a superfície em todos os seus pontos no espaço tridimensional (modelagem paramétrica ilustrada na Figura 12).

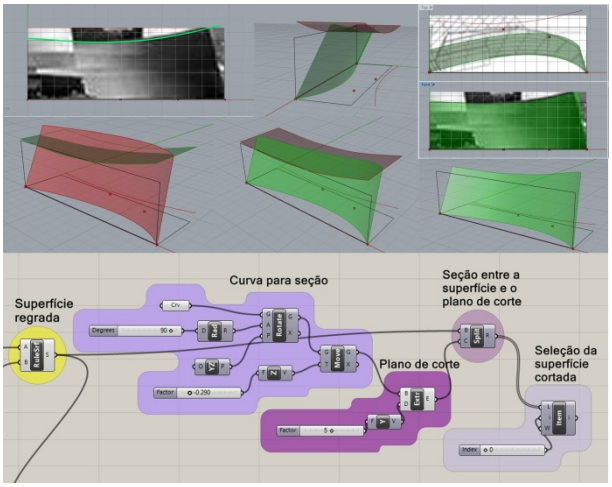


Figura 12 Modelagem paramétrica por programação visual para a geração da seção na superfície 2 do Disney Concert Hall.
Fonte: Elaboração própria.

As análises visuais das curvaturas das superfícies (Figura 13) indicam o valor ao redor de zero para a curvatura gaussiana, pela presença da cor verde na superfície. Estas análises visuais levam a supor que as superfícies configuradas são do tipo planificáveis.

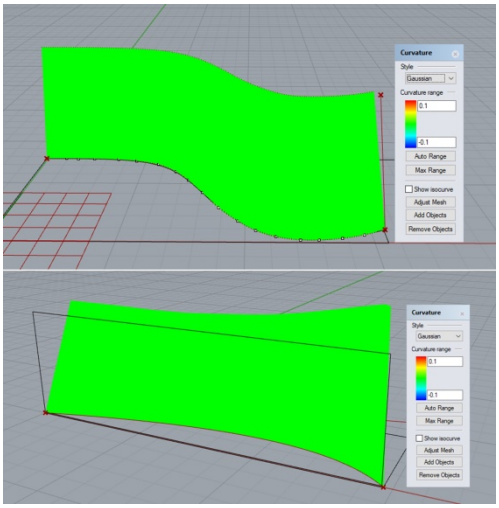


Figura 13 Análises visuais das curvaturas Gaussianas das Superfícies 1 e 2 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

3.4.2 Modelagem das Superfícies 3 e 4

As Superfícies 3 e 4 são mais complexas que as duas superfícies inicialmente apresentadas (1 e 2). As explorações para gerar tais superfícies tendo como base apenas imagens em projeção paralela ortogonal (vistas ortográficas) não obteve resultado positivo, devido à complexidade das curvas e as restrições impostas pela classe de superfícies desenvolvíveis. Foi necessário buscar um modelo digital tridimensional que pudesse auxiliar no mapeamento das porções de superfícies planificáveis, constituintes do todo destas superfícies. Tal modelo foi encontrado no site 'Thingiverse', uma comunidade aberta que disponibiliza modelos digitais tridimensionais para uso em dispositivos de impressão 3D.

As superfícies foram analisadas diretamente sobre o modelo digital, identificando-se as porções que poderiam ser compostas com regras de concordância de superfícies.

Para a Superfície 3 (Figura 14), identificaram-se duas porções de superfícies: a porção 1 definida por duas curvas planas diretrizes semelhantes em projeção superior (a diretriz de limite superior e a diretriz de limite inferior); a porção 2 definida por uma curva plana suave no seu limite inferior e uma curva espacial com curvatura variável e mais abrupta no seu limite superior.

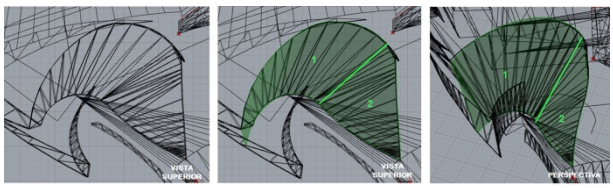


Figura 14 Análise e mapeamento das porções da Superfície 3 sobre o modelo digital tridimensional da obra. Fonte: Elaboração própria.

Para cada uma das porções, foram lançadas hipóteses de representação, as quais serão descritas a seguir.

- Para a primeira porção, identificou-se a mesma hipótese anteriormente traçada para as superfícies 1 e 2, em que a curva diretriz inferior poderia ser obtida como uma instância da curva diretriz superior, por ser uma regra para gerar superfícies planificáveis. Este é um método dedutivo de análise por se transferir uma regra geral das superfícies planificáveis para aplica-la na representação particular da superfície 3. A obtenção de tal instância foi testada com a aplicação de escala de redução de 0.5 da curva, com o centro da escala no ponto inicial da curva diretriz superior. A curva resultante se ajustou a curva do modelo digital (primeira imagem da Figura 15), passando do limite desta em uma das extremidades. A superfície entre estas curvas diretrizes foi gerada e foi feita uma seção por uma linha reta para recortar a parte da superfície que não foi empregada na obra (última imagem da mesma Figura).

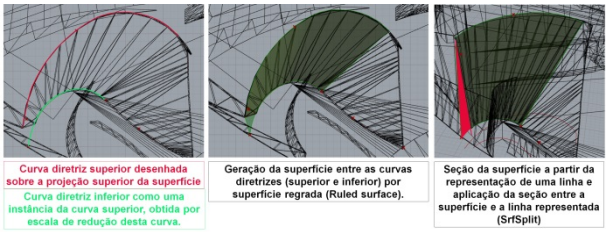


Figura 15 Geração da primeira porção da Superfície 3 da obra Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

A Figura 16 ilustra as etapas de modelagem, o algoritmo, a programação visual, as vistas ortográficas e a perspectiva da superfície resultante.

Como a regra de geração de superfícies planificáveis foi aplicada na definição das curvas diretrizes, a análise de curvatura indicou que todos os pontos possuem curvatura gaussiana igual a zero absoluto conforme pode ser visto na imagem localizada no canto inferior direito da mesma Figura.

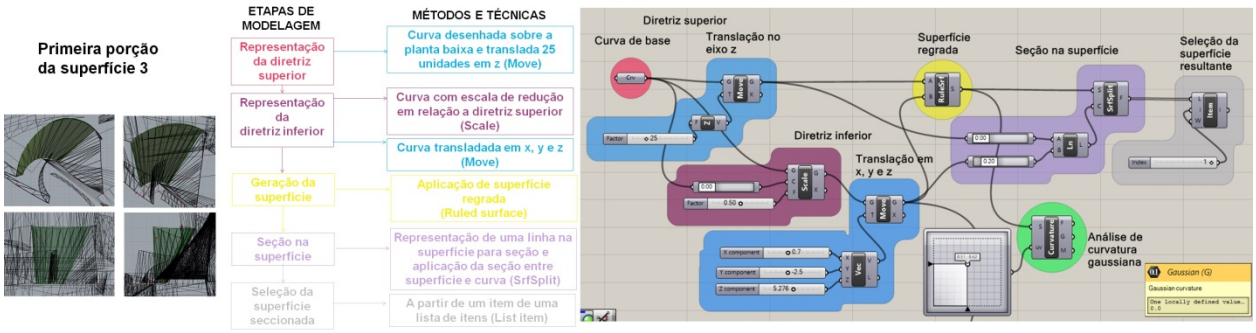


Figura 16 1 Algoritmo e programação visual do processo de geração da primeira porção da superfície 3 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

Para a segunda porção desta superfície, a que possui como diretriz inferior uma curva plana suave e como diretriz superior uma curva espacial com curvatura variável, não foi possível traçar a hipótese anterior de curvas instanciadas para a definição das curvas geratrizes. Devido a isso, lançou-se também a hipótese de uma superfície em helicoide desenvolvível (que possui curvas diretrizes em circunferência e hélice cilíndrica), no entanto, a análise da configuração da curva espacial de limite superior indicou que esta não se correspondia com a descrição de uma curva hélice cilíndrica, o que inviabilizou confirmar a hipótese traçada.

Mesmo com a probabilidade de não se obter uma superfície com valor de curvatura gaussiana em zero absoluto, identificou-se que as curvas diretrizes poderiam ser representadas em arco de circunferência e em curva livre, a partir dos pontos da malha do modelo digital (curvas na cor vermelha e verde na Figura 17).

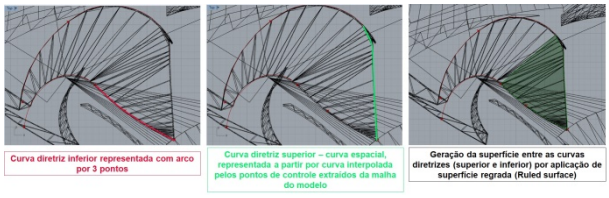


Figura 17 Etapas do processo de geração da segunda porção da Superfície 3 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

O arco de circunferência foi representado a partir de três pontos localizados sobre a curva do modelo em malha, sendo

que, para atribuir a geometria relacional com a curva da primeira porção da superfície, o primeiro ponto do arco foi extraído desta. O segundo e o terceiro pontos foram obtidos a partir da definição de suas coordenadas. A diretriz espacial foi representada por uma curva interpolada entre vários pontos, extraídos diretamente do modelo de malha. A Figura 18 ilustra o algoritmo de modelagem e a programação visual para esta porção de superfície.

A análise da curvatura gaussiana indicou um valor diferente do valor zero absoluto, embora muito próximo a este, conforme ilustrado na parte inferior à direita da Figura 18. Justifica-se isto pelo fato de que as curvas geratrizes não foram geradas como instância uma da outra, transformação que preserva as propriedades essenciais da curva instanciada. Esta relação geométrica não existe entre as curvas desta porção da superfície em função da ocorrência de recortes em sua parte superior, os quais configuraram uma curva espacial mais complexa e por consequência uma superfície do tipo não planificável em sua curvatura gaussiana.

Para representar a superfície 4 da obra, da mesma maneira que ocorreu com a superfície 3, houve a necessidade de delimitar porções desta superfície visando obter uma representação mais próxima possível de uma superfície planificável. Ao se traçar diretamente sobre o modelo digital as curvas diretrizes e gerar uma única superfície regrada entre estas curvas, observou-se que a curvatura da superfície resultante se distanciou consideravelmente do valor zero absoluto. O mapeamento por porções também se aproxima do processo de tradução para a construção, desenvolvido no TCO de Gehry e Partners, o qual incorpora as restrições geométricas impostas pela classe de superfícies desenvolvíveis, além das características do material de construção.

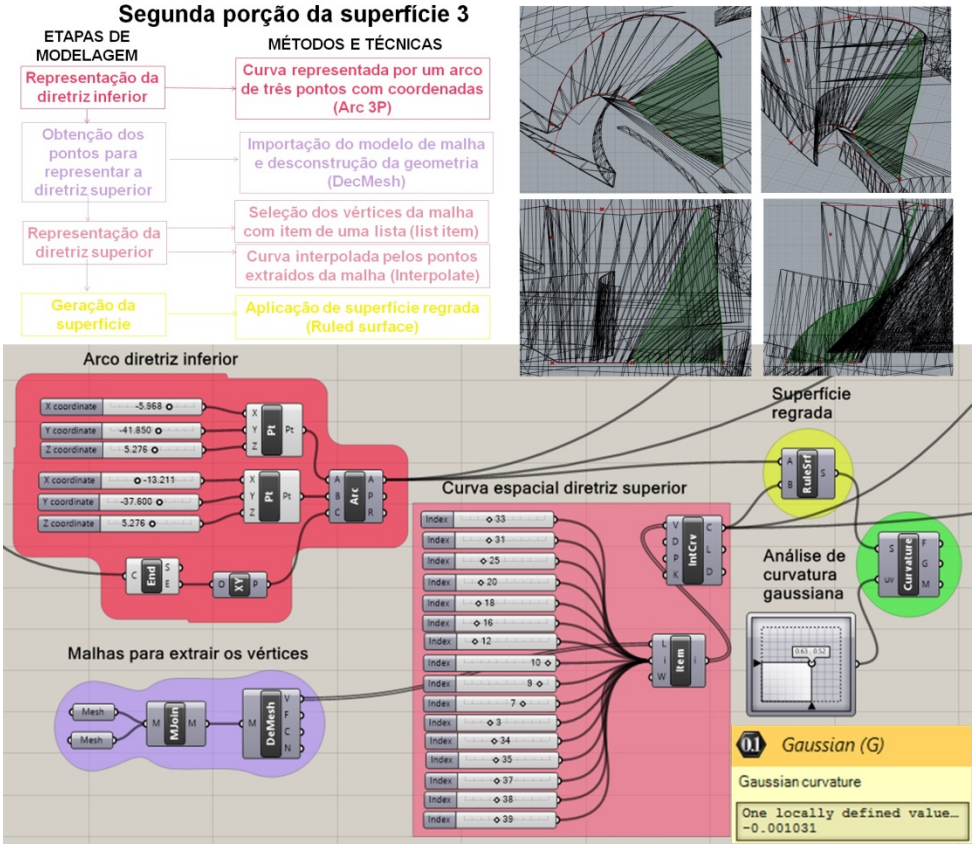


Figura 18 2 Algoritmo e programação visual do processo de geração da segunda porção da superfície 3 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria

Em uma primeira análise da Superfície 4, identificaram-se sobre o modelo digital cinco porções de superfícies, as quais são descritas a seguir (Figura 19):

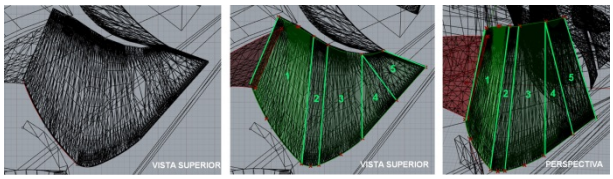


Figura 19 Primeira análise e mapeamento das porções da Superfície 4 sobre o modelo digital tridimensional da obra Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

- A primeira porção possui na sua parte inferior uma curva plana diretriz em arco de circunferência com pouca curvatura e, na sua parte superior, uma curva espacial com curvatura muito pequena e com alguma declividade (dada pela diferença de altura entre seus pontos);
- A segunda porção também possui um arco de circunferência em sua parte inferior, mas diferentemente da primeira, sua curvatura é acentuada, e, na sua parte superior, uma curva espacial suave com alguma declividade;
- A terceira porção possui, em sua parte inferior, uma diretriz suave em arco de circunferência e, na sua porção superior, uma curva espacial com alguma declividade;
- A quarta porção é limitada na sua parte inferior por uma reta e na sua parte superior por um ponto;
- E a quinta porção é delimitada por uma reta na sua parte inferior e por uma curva espacial com alguma declividade na sua parte superior.

Visualmente também se observou que as diretrizes inferiores das duas primeiras porções não possuem concordância (existe uma quina na junção das curvas), mas o mesmo não ocorre com a parte superior da superfície, supostamente havendo concordância entre os arcos nestas porções. Esta hipótese pôde ser comprovada durante o processo de modelagem paramétrica de tais curvas diretrizes.

Visando otimizar o processo de modelagem, as porções 4 e 5 foram unificadas, representando-se a curva diretriz inferior com um único arco de circunferência, o que resultou no total de 4 porções de superfícies (Figura 20).

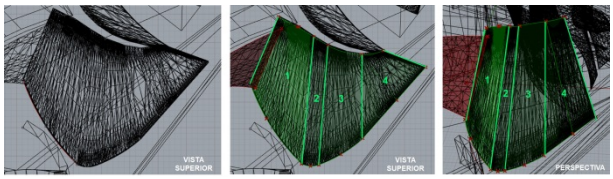


Figura 20 Segunda análise e mapeamento das porções da superfície 4 sobre o modelo digital tridimensional.
Fonte: Elaboração própria a partir do modelo digital tridimensional da obra.

A primeira análise, a partir da qual se identificaram diretrizes compostas por arcos e retas, em cinco porções da superfície, foi um reconhecimento prévio e também experimental do processo de modelagem paramétrica.

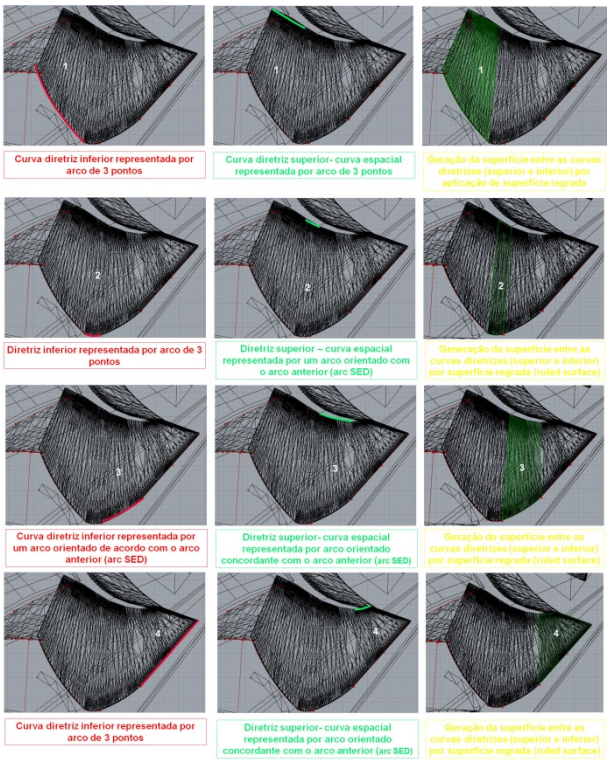


Figura 21 Etapas do processo de geração das quatro porções da superfície 4 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria a partir de um modelo digital tridimensional.

Além de simplificar o processo de representação paramétrica, o objetivo foi também de gerar uma superfície em maior correspondência com as superfícies curvas e verificar as alterações nos valores da curvatura das superfícies geradas pelas duas hipóteses nesta porção da superfície. O resultado após o processo de modelagem foi que a segunda hipótese com diretrizes representadas exclusivamente por arcos de circunferência (sem linhas retas como diretrizes) gerou uma superfície com valor de curvatura mais próximo ao valor zero em relação à primeira hipótese. Destaca-se que a geração de superfícies regradas em que as diretrizes são uma reta e uma curva resulta em superfícies com dupla curvatura, não planificáveis, denominadas de 'conoides', em que as retas geratrizes são retas reversas (RODRIGUES, 1960).

As hipóteses de representação lançadas para as quatro porções de superfície foram as seguintes (Figura 21):

- As diretrizes das porções da superfície (curvas planas e curvas espaciais) poderiam ser representadas a partir de arcos definidos por três pontos (ponto inicial, ponto final e ponto interior ao arco);
- A representação dos arcos adjacentes poderia abarcar a regra de concordância ao aplicar-se a mesma direção para os pontos extremos dos arcos, que seria dada pela direção do ponto extremo do arco imediatamente anterior, utilizando-se componentes que avaliam curvas e que constroem arcos orientados.

As explorações em modelagem paramétrica permitiram identificar que a os arcos das diretrizes inferiores das porções 2 e 4 não possuíam concordância, pois, ao se representarem os mesmos com a regra descrita acima, estes assumiram uma configuração diferente das curvas do modelo digital. As demais curvas diretrizes puderam ser obtidas aplicando-se a regra de concordância de arcos, com direções iguais nos pontos de conexão. Para atribuir tal concordância entre os arcos há a necessidade de associar mutuamente os pontos inicial e final dos arcos concordantes.

As figuras de 22 a 25 ilustram os processos de modelagem, os esquemas descritivos dos processos e as etapas de programação visual, relativos às quatro porções da Superfície 4.

A análise de curvatura por meio da modelagem paramétrica possibilita identificar o valor numérico da curvatura e dar uma interpretação precisa em relação a sua característica. As análises visuais desenvolvidas no *Rhinoceros* e a qual foram apresentadas para as primeiras superfícies modeladas (1 e 2) é um tipo de análise mais intuitiva em relação à análise feita no ambiente do *Grasshopper*. Embora isto possa facilitar a identificação da curvatura na totalidade da superfície, observou-se que uma curvatura muito próxima à zero fica definida pela mesma cor que uma curvatura no valor de zero absoluto, não sendo perceptível a diferença de coloração se esta houver.

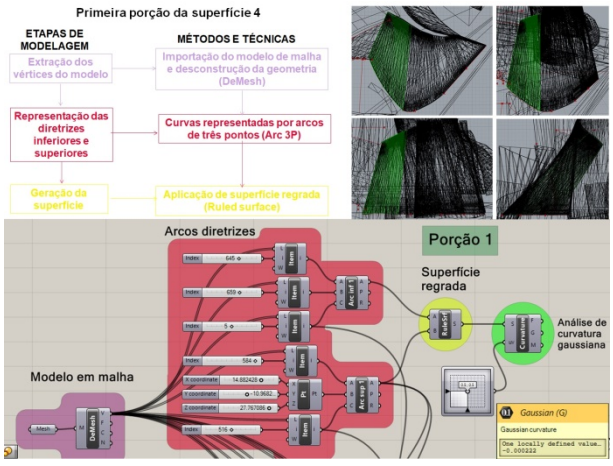


Figura 22 Algoritmo e programação visual do processo de geração da primeira porção da superfície 4 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

A análise em modelagem paramétrica da superfície 1 indicou valor diferente de zero absoluto, embora apresentasse coloração verde clara na análise realizada no *Rhinoceros*. Esta superfície teve sua diretriz superior gerada por transformação

de equidistância aplicada sobre a diretriz inferior, não sendo esta uma transformação de semelhança entre curvas. A teoria explica a distinção entre os tipos de transformações aplicadas em entes geométricos, sendo que a escala tem propriedades de semelhança, mas a equidistância não possui tais propriedades (Pottmann ET AL, 2007). Com tal tipo de transformação não é possível gerar curvas diretrizes de superfícies retilíneas que configurem uma superfície do tipo cônica ou cilíndrica.

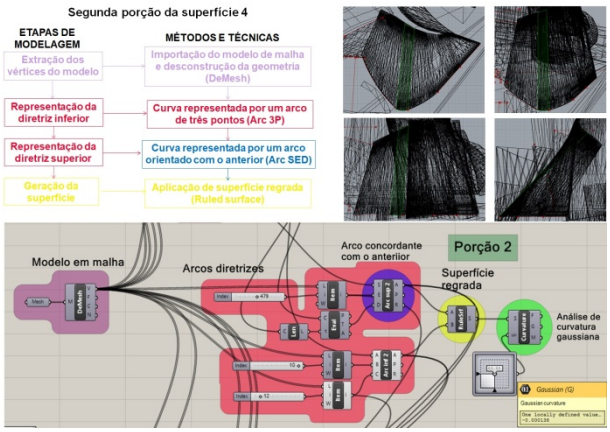


Figura 23 Algoritmo e programação visual do processo de geração da segunda porção da superfície 4 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

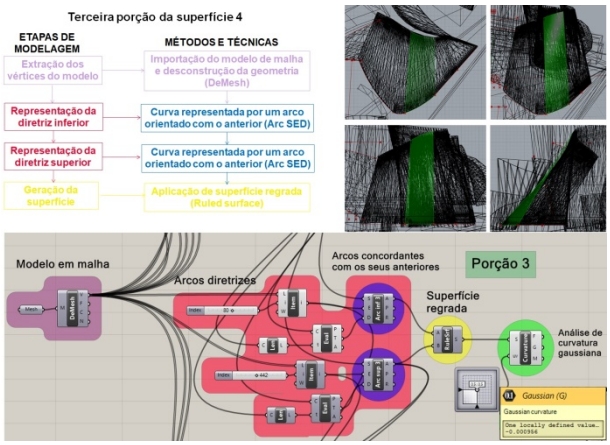


Figura 24 Algoritmo e programação visual do processo de geração da terceira porção da superfície 4 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

Visando gerar uma superfície planificável, a superfície 1 foi refeita a partir das informações do modelo digital e com outra hipótese de modelagem, estabelecendo-se relações entre partes das curvas que compõem as diretrizes inferior e superior. Na primeira hipótese apresentada no início desta seção, a curva diretriz inferior foi representada por uma curva do tipo NURBS e a curva superior por equidistância desta.

Nesta segunda hipótese, buscou-se representar a curva diretriz inferior a partir da composição de dois arcos em concordância. A hipótese para gerar a diretriz superior foi por aplicação de transformações de translação e de escala aos dois arcos que compõem a curva diretriz inferior, individualmente, para explorar os valores que ajustavam tais arcos ao formato da curva diretriz superior do modelo tridimensional. Com este processo, foi mantida a regra de representação de superfícies cônicas (que são planificáveis), sendo que, para configurar o primeiro arco superior, a escala aplicada foi de ampliação, e para o segundo arco, foi de redução. As superfícies resultantes são duas superfícies cônicas invertidas, uma em relação à outra.

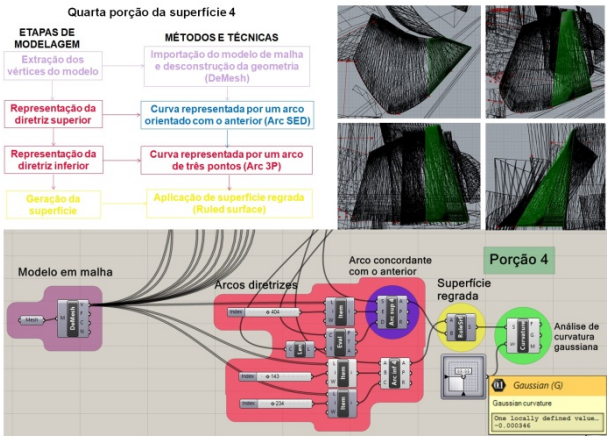


Figura 25 Algoritmo e programação visual do processo de geração da quarta porção da superfície 4 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

A Figura 26 ilustra o algoritmo e a programação visual referente à este segundo processo de modelagem paramétrica da superfície 1. A curvatura gaussiana no valor de zero absoluto foi atingida para a superfície modelada por este processo de geração, conforme ilustrado na parte inferior direita da mesma Figura.

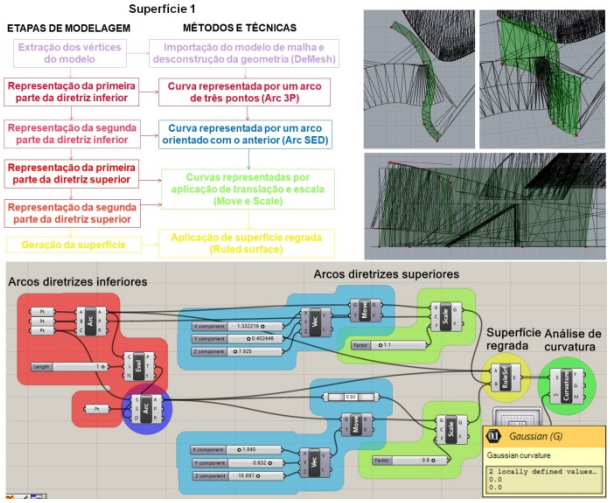


Figura 26 Algoritmo e programação visual do segundo processo de geração da superfície 1 do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

Destaca-se que nestes processos de modelagem há a presença constante dos elementos de saber das teorias de superfícies curvas e das classes de transformações geométricas em associação as técnicas de geração. As hipóteses lançadas por meio de métodos dedutivos só puderam ser formuladas por haver um conhecimento prévio de tais estruturas de saber. Ou seja, aqui se apresenta de maneira mais clara a noção apresentada em Gascón (1993), do saber como um objeto problemático a ser teorizado, bem como um objeto teórico (um modelo) para a solução de problemas.

Os processos de modelagem da superfície 1 e de uma porção da superfície 4 do *Disney Concert Hall* permitiram identificar, precisamente nos termos da classificação apresentada em Rodrigues (1960) e Pottmann et al (2007), os tipos de superfícies empregadas. Ambas são configuradas por porções de superfícies cônicas, e tem curvas planas como diretrizes, o que facilita aplicar as regras de geração de superfícies planificáveis. As demais superfícies da obra ou porções de superfícies são delimitadas por curvas espaciais, principalmente em sua parte superior, dificultando o emprego

de tais regras de geração para representa-las. As curvas espaciais que aparecem nestas superfícies são devidas as seções que o arquiteto utiliza, com o objetivo de dar maior movimento, fluidez e estética as superfícies da obra.

Para a superfície 2, inicialmente foi feito uma análise e um processo de modelagem a partir de imagens, aplicando-se uma das regras de geração de superfícies cônicas a qual atribui uma relação intrínseca entre as curvas diretrizes inferior e superior. No processo de modelagem esta relação ficou estabelecida ao se gerar a curva diretriz superior por translação e escala da curva diretriz inferior, o que resultou em um modelo aproximado da superfície da obra, mas com curvatura gaussiana em zero absoluto. No entanto, ao se aplicar o mesmo processo sobre o modelo digital, obteve-se como resultado uma superfície com configuração diferente do modelo, desviando-se da superfície em um de seus extremos. Este resultado pôde ser compreendido a partir do trabalho de Shelden (2002), o qual explica o processo de conformação física de tais superfícies pelos atributos do material em folha em que a mesma será construída, e isto será contextualizado na próxima seção deste artigo.

Não se encontrou na literatura um método geométrico para mapear tais porções de superfícies curvas planificáveis a partir de uma superfície curva inteira. Pottmann ET AL (2007) e Shelden (2002) desenvolveram métodos com este propósito, mas os mesmos envolvem formulações matemáticas complexas para o atual contexto de ensino de arquitetura. As explorações apresentadas para uma parte das superfícies foram baseadas exclusivamente na aplicação da regra geométrica de geração de superfícies cônicas e cilíndricas, em que as curvas diretrizes são instâncias uma da outra, por aplicação de unicamente transformações de translação (para superfície cilíndrica) e simultaneamente de translação e escala (para superfícies cônicas). As demais superfícies obtidas não resultaram em curvaturas gaussianas com valor zero absoluto e a implicação desta caracterização em relação às superfícies de material em folha projetadas e empregadas por Gehry será contextualizada na seção de discussão.

3.5 A Estruturação da Rede de Conceitos das Superfícies do Disney Concert Hall

A estruturação da rede de conceitos foi desenvolvida a partir da categorização das estruturas de saber explicitadas durante os processos de análise e de modelagem paramétrica das superfícies da obra. Como resultado desta categorização, foram identificadas três categorias gerais as quais poderiam abarcar todas as estruturas de saber envolvidas (as teorias, as técnicas e as tecnologias associadas à superfície em questão).

3.5.1 A estrutura do conteúdo

As categorias gerais de estruturação do conteúdo são dadas pelos tipos de elementos de saber identificados (Figura 27), sejam estes: - as descrições da obra feitas por Burry & Burry; as imagens da obra apresentadas pelo mesmo autor e pelo arquiteto; e a ampliação da estrutura de saber da geometria a partir dos conceitos de superfícies regradas desenvolvíveis, de curvatura de superfícies e da modelagem paramétrica das superfícies que envolvem a sala de concertos.

As ampliações das descrições iniciais, obtidas a partir de outros autores das áreas da geometria e matemática, foram reestruturadas em novos mapas conceituais visando abarcar novas estruturas de saber, que podem ser acessados individualmente na rede de conceitos. Estas se referem: as definições de superfícies e seus elementos principais dadas por Rodrigues (1960) e Pottmann ET AL (2007); as definições referentes às curvas livres; dos parâmetros de classificação de geometrias e superfícies (Rodrigues, 1960); a classificação de superfícies curvas (Rodrigues, 1960); a classificação de superfícies retilíneas (Rodrigues, 1960); as definições das superfícies cilíndricas, cônicas e de aresta de reversão e dos seus processos de geração (Rodrigues, 1960 e Pottmann ET AL, 2007); a definição de curvatura de superfícies sistematizada por Euler em 1760 (Carmo, 1987); dos tipos de curvaturas em superfícies (Pottmann ET AL, 2007; Carmo, 1987; e Gorjanc, 2012); e as estruturas de saber tratadas por Shelden (2002) referentes aos aspectos construtivos de tais superfícies. Cada estrutura de saber complementa e amplia os conceitos apresentados nos esquemas visuais.

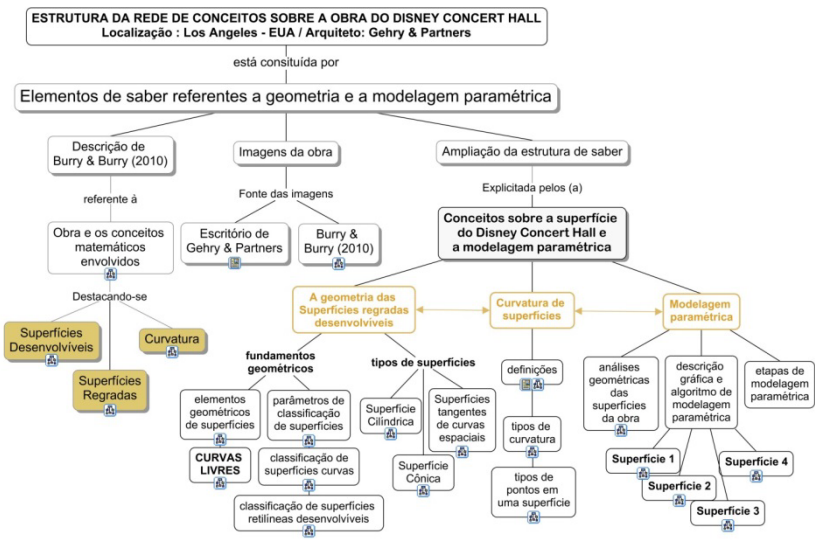


Figura 27 Estrutura da rede de conceitos da superfície do Disney Concert Hall. Fonte: Elaboração própria.

3.5.2 As especificidades das estruturas de saber

Exemplifica-se uma das especificidades do saber a partir do esquema visual que trata da classificação das Superfícies Retilíneas Desenvolvíveis (Figura 28), classe a qual algumas das superfícies do *Disney Concert Hall* pertencem.

Neste esquema é feita a identificação de tais classes, grupos e os nomes das superfícies correspondentes a estes, incluindo-se os parâmetros e os atributos que justificam esta classificação.

As estruturas de saber referentes à modelagem paramétrica foram categorizadas por meio de esquemas visuais que incluem a descrição detalhada das etapas de modelagem paramétrica que se relacionam com as próprias etapas de geração da superfície, incluindo-se: a representação

por programação visual dos elementos fundamentais da superfície (as curvas diretrizes – arcos e retas, e os arcos geratrizes); e o processo de geração da superfície, a partir de seus elementos fundamentais.

No próprio mapa que descreve a estrutura do algoritmo de modelagem paramétrica encontram-se os acessos aos mapas correspondentes a cada etapa de modelagem, as quais se constituem como novas estruturas de saber, detalhadas em outros mapas conceituais. Estes integram esquemas gráficos que objetivam relacionar o respectivo algoritmo de modelagem paramétrica, a programação visual e a descrição dos tipos de parâmetros que caracterizam os dados de entrada e saída de tal programação.

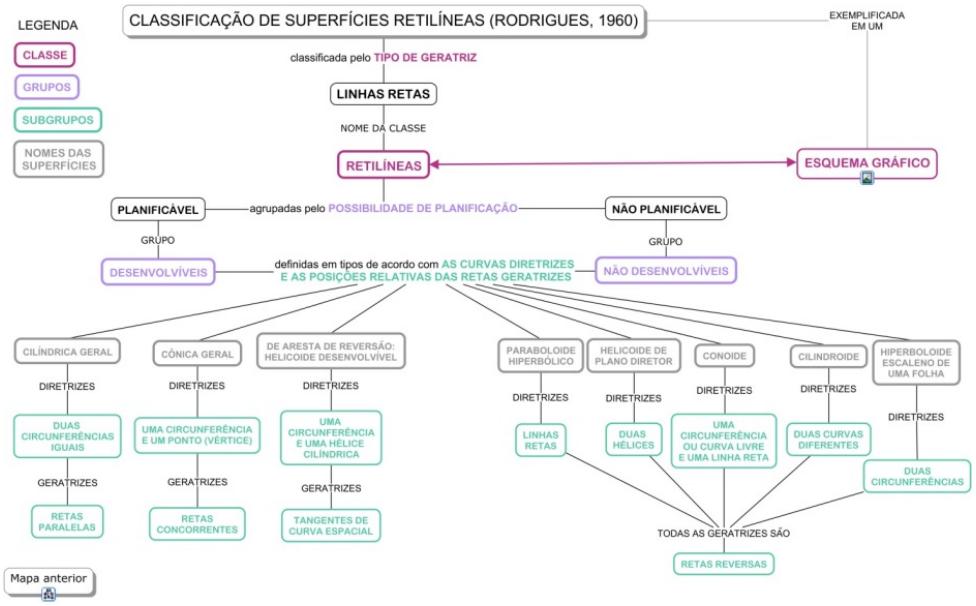


Figura 28 Classificação de superfícies retilíneas dada por Monge, segundo Rodrigues (1960). Fonte: Elaboração própria.

4. DISCUSSÃO

A geometria tratada neste trabalho é, entre aquelas que pertencem à classe abrangente de superfícies curvas, a que possui a referência mais concreta para modelos do mundo físico, pela correspondência direta com folhas de papel ou de outro material qualquer que possua um comportamento flexível (que seja maleável) dentro de um limite desejável. Isto quer dizer materiais que não sejam deformáveis ao extremo como aqueles que possibilitam configurar superfícies de forma livre, as quais não têm restrições sobre o tipo de geometria a ser criada. A restrição dada pela característica de mabeabilidade do material faz com que tais superfícies possuam atributos importantes do ponto de vista de descrição formal, de construtibilidade e economia no emprego de superfícies curvas na arquitetura. Importante também destacar que ao poderem ser geradas a partir da flexão do material em folha, como o papel, facilita sua adoção no processo de projeto arquitetônico, desde que esta técnica de curvamento do material produz modelos geométricos que podem ser desdobrados no plano, cortados e colados para gerar uma composição de superfícies curvas (POTTMANN ET AL, 2007).

Shelden (2002) destaca que as restrições geométricas destas superfícies são análogas as restrições dos materiais construtivos em folha, mesmo que de maneira aproximada. O autor afirma que esta característica pode ser suficiente para tratar diretamente com a construtibilidade durante o processo de concepção esquemática ou de modelagem das superfícies. Mas, deve-se ter consciência que existe uma interdependência destas formas aos materiais reais de construção, os quais condicionam a flexibilidade da geometria. Considera-se fundamental poder lidar com alguns destes materiais durante o desenvolvimento da concepção de tais geometrias em atividades de projeto. O autor cita materiais como papel, chapa de aço, placa de gesso, folha de alumínio e outros que impõem restrições que são significativamente diferentes sobre o conjunto de formas construtivas correspondentes. Para cada material, estas formas terão comportamentos diferentes, podendo em um material aparecer descontinuidades antes de atingir uma forma que foi habilitada suavemento por outro material. Se isto for desejado, naturalmente será ativada uma classe mais abrangente de formas do que as inicialmente pensadas. Nesse sentido, Shelden cita recursos como união de folhas, vincos, rasgos e rugas, que, se introduzidos, permitirão formas cada vez mais complexas.

Mesmo tendo-se conhecimento destas características qualitativas das superfícies planificáveis, segundo o mesmo autor, parece ser difícil desenvolver representações geométricas simples que captem estas qualidades em formas mais complexas. As representações das superfícies planificáves são limitadas e as representações das formas livres, de outra maneira, são muito mais abrangentes. Isto leva o autor a postular que a primeira poderia ser formulada como uma condição de restrição imposta à descrição de superfícies de forma livre e assim, portanto, representaria uma subclasse dessa classe mais geral de descrições de superfícies.

Uma das métricas de restrição é a curvatura gaussiana, abordada durante o desenvolvimento dos processos de modelagem paramétrica das superfícies. Shelden (2002) explica que as qualidades da métrica de curvatura gaussiana têm uma razoável afinidade com a formação de folhas no espaço, mas algumas propriedades materiais das chapas metálicas podem impactar esta avaliação qualitativa da forma. Por outro lado, em alguns casos, o comportamento material da folha pode ser desprezado para formas de superfície com curvatura gaussiana zero. Segundo o autor, a partir desta ideia também é possível presumir que os materiais em folha podem suportar alguma curvatura de superfície limitada, mas não nula. Nesta perspectiva, é possivel identificar uma medida de curvatura de superfície que mesmo não sendo nula é aceitável dada à construção da superfície. A partir desta investigação de

Shelden junto a Gehry e Partners foi possível a construção das superfícies da obra do *Disney Concert Hall* com superfícies em chapas metálicas com curvaturas gaussianas diferentes do valor zero absoluto, conforme visto nas explorações de modelagem paramétrica das superfícies que foram desenvolvidas. Para cada uma das superfícies foi empregado um limite predeterminado de curvatura não nula, para o qual havia correspondência com a construtibilidade material da superfície. Em resumo, com isto foi possível construir superfícies em folhas de material metálico as quais geometricamente não são planificáveis se analisadas sob o aspecto de sua curvatura gaussiana, devido ao fato de que tal material em folha pôde suportar as curvaturas que foram assumidas na geometria.

O autor pontua que, durante o processo de projeto, a interação física, tátil e direta com folhas de algum material guia os projetistas para configurações viáveis em resposta ao comportamento destes materiais, protegendo-os de geometrias que não abrangem a classe de superfícies em folha.

5. CONCLUSÃO

A metodologia adotada para analisar a estrutura de saber envolvido nas superfícies curvas do *Disney Concert Hall*, de Gehry & Partners, possibilitou uma compreensão mais profunda das descrições apresentadas por autores que analisam a geometria da arquitetura contemporânea. Possibilitou também fornecer uma estrutura de saber de apoio ao ensino do projeto de arquitetura.

As análises deste tipo de superfície e a indicação de que as superfícies da obra poderiam ser geradas essencialmente por 'porções de superfícies cilíndricas e cônicas' configurou-se como uma estrutura de saber fundamental para a modelagem paramétrica.

No entanto, mesmo que a modelagem de quatro superfícies da obra tenha indicado a existência de tais porções descritas por 'composições de superfícies cônicas e cilíndricas', identificou-se que o mesmo não era aplicável para todas as superfícies.

Isto está relacionado com o fato de que as superfícies da obra, em sua maior parte, não são superfícies planificáveis em termos geométricos, porque suas curvas diretrizes não podem ser representadas como instância uma da outra a partir de transformações geométricas que preservam suas características essenciais. Mas de outra maneira, estas superfícies 'podem ser construídas em material em folha'.

O trabalho de doutorado de Shelden (2002) trouxe uma explicação fundamental para o entendimento desta questão, referente aos processos de obtenção destas superfícies e a relação destes com a construtibilidade e as curvaturas gaussianas. O autor concluiu que os materiais em folha podem suportar alguma curvatura limitada da superfície, que não seja absolutamente nula, que foram assumidas na geometria, o que explica a ocorrência de curvaturas próximas ao valor zero na modelagem das superfícies da obra. Esta constatação tornou possível a construção das superfícies da obra e outras superfícies projetadas por Gehry, em que para cada uma delas foi empregado um limite predeterminado de curvatura não nula, correspondente com a 'construtibilidade do material'.

A importância para o contexto didático desta explicitação dos aspectos geométricos e construtivos de tais superfícies é o potencial que tal estrutura de saber possui para guiar a concepção de configurações viáveis que são definidas por meio de interações física, tátil e direta com folhas de algum material.

Destaca-se, por fim, que a aplicação de uma teoria que adota o próprio saber como modelo de análise de conteúdos didáticos e de seleção destes com vistas a um processo transpositivo (Chevallard, 1991) possibilita trazer para o contexto didático os 'saberes científicos' ('saber sábio', nos termos da teoria) aliados aos 'saberes a ensinar'.

Uma das contribuições da teoria que se pode citar é dar subsídios de análise do saber possibilitando-se questionar as descrições apresentadas em Burry & Burry (2010), relativas às afirmações sobre o tipo de superfícies da obra como sendo regradas planificáveis. Estes autores não contextualizam as superfícies adotadas no projeto a partir do trabalho de Shelden (2002), que de outra forma, traz elementos da estrutura de saber relativos à justificação de estas não serem planificáveis em seu rigor geométrico. Tal justificação é que as superfícies planificáveis (essencialmente cônicas e cilíndricas) são muito restritivas para as formas projetadas por Gehry. Mas o material em folha, de outro modo, permite conceber formas mais maleáveis em sua geometria sem o risco de projetar geometrias não almejadas, que o material em folha não consiga suportar sem rasgos ou vincos. Com isto é possível mostrar-se concretamente a relação entre geometria, projeto e construção.

Um dos desdobramentos futuros deste estudo é a aplicação em contextos de ensino de arquitetura que integram as tecnologias digitais no processo de projeto e a avaliação sobre a apropriação pelos estudantes da estrutura de saber explicitada.

REFERÊNCIAS

1. BORDA, A. 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. Tese (Doutorado em Ciências da Educação) - Universidad de Zaragoza, 2002.
2. BURRY, J, BURRY, M. The New Mathematics of Architecture. Thames e Hudson, Londres, 2010.
3. CARMO, M. P. Superfícies Mínimas. Instituto de Matemática Pura e Aplicada – IMPA, Rio de Janeiro, RJ, 1987.
4. CHEVALLARD, Y. La Transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado. Aique Grupo Editor, 3ª ed. 4ª reimp, Buenos Aires, 2013. Edição original: La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné. Pensée Sauvage, 2ème édition, Grenoble, 1991.
5. CHEVALLARD, Y. El Análisis de las Prácticas Docentes en la Teoría Antropológica de Lo Didáctico. Recherches en Didactique de Mathématiques, Grenoble 19:2: pp. 221–266, 1999. (Tradução de Ricardo Barroso, Universidad de Sevilla). Disponível em: <http://www.aloj.us.es/rbarroso /Pruebas/CHEVALLARD.PDF> Acesso em: 20 jan 2016.
6. CILINDRO. Enciclopedia, De la Enciclopedia Libre Universal en Español, 23 de janeiro de 2008. Disponível em: <http://enciclopedia.us.es/index.php?title=Cilindro&oldid =398676>.
7. GASCÓN, J. Desarrollo del conocimiento matemático y análisis didáctico: del patrón análisis-síntesis a la génesis del lenguaje algebraico. Recherches en Didactique des Mathématiques, Grenoble 13:3, pp 295-332, 1993.
8. GEHRY & PARTNERS. Disponível em: <https://www. foga.com/> Acesso em: 15 ago 2017.
9. GORJANC, S. Introduction to Surfaces, Tangent Planes and Normal Lines. Traduzido por Helena Halas and Iva Kodrnja - 3DGeomTeh - Developing project of the University of Zagreb. 2012. Disponível em: <http://www.grad.hr/

geomteh3d/Plohe/plohe1_eng.html> Acesso em: 10 agosto 2016.

10. LOS ANGELES WALT DISNEY CONCERT HALL 3D MODEL. MakerBot Thingiverse, Ago 2015. Disponível em: <https://www.thingiverse.com/thing:960077#> Acesso em: 19 fev 2018.
11. POSTMODERN ARCHITECTURE TAKES A STEP-BACK. Mizoomi, Londres, Out 2015. Disponível em: <https://mizoomi.wordpress.com/2015/10/25/postmodern-architecture-takes-a-step-back/>. Acesso em: 15 fev. 2018.
12. SHELDEN, D. Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry's Architecture. 2002. PhD diss., (Doutorado em Arquitetura, Institute of Technology, Dept. of Architecture) – University of Massachusetts, 2002. Disponívelem: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/16899> Acesso em: 20 fev 2018.
13. RODRIGUES, Á. Geometria Descritiva: Projetividades, Curvas e Superfícies. Ao Livro Técnico Ltda, 1a ed., Rio de Janeiro, RJ, 1960.
14. WALT DISNEY CONCERT HALL 10TH ANNIVERSARY. PROCESS 16 YEARS IN THE MAKING. Los Angeles Philharmonic Association, 2013. Disponível em: <http://wdch10.laphil.com/wdch/process.html>. Acesso em: 10 fev 2018.
15. WOODBURY, R. Elements of Parametric Design. Routledge, London, 2010.