

As relações geométricas subjacentes nas cascas de Eladio Dieste

The underlying geometrical relationship in the shells of Eladio Dieste

Felipe Corres Melachos 

Wilson Florio 

Resumo

Apenas na última década, a obra do engenheiro Uruguaio Eladio Dieste (1917-2000) vem ganhando disseminação acadêmica internacional, sendo que uma de suas principais contribuições para a concepção formal-estrutural na arquitetura e engenharia civil foi o desenvolvimento iterativo da tipologia estrutural das abóbadas gaussianas, cascas de dupla-curvatura estruturadas em cerâmica armada. Entretanto, não há registros de uma definição estabelecida para a geometria arquitetônica destas tipologias estruturais. Tampouco existem evidências concretas acerca da concepção e desenvolvimento projetual destas estruturas. Por conseguinte, o objetivo deste artigo é evidenciar as relações geométricas subjacentes nas abóbadas gaussianas descontínuas projetadas e construídas por Eladio Dieste em cerâmica armada, a variação dominante desta tipologia estrutural. Esta análise foi conduzida através da modelagem paramétrica e da regressão polinomial de estudos de caso selecionados a partir de fontes primárias originais, justamente por estas ferramentas computacionais permitirem o correto manejo de geometrias tidas como formalmente complexas. A contribuição esperada para esta pesquisa reside em aprofundar o entendimento entre a relação do processo de projeto e a geometria resultante no objeto de estudo, assim como o entendimento da conformação geométrica desta tipologia estrutural desenvolvida por Eladio Dieste.

Palavras-chave: Modelagem paramétrica. Abóbada gaussiana. Cerâmica armada.

Abstract

Only within the last decade, the works of Uruguay an Engineer Eladio Dieste (1917-2000) have been gaining international academic dissemination, one of whose main contributions in the realm of formal-structural conception within architecture and civil engineering reside in the iterative development of the structural typology of the gaussian vault shells in reinforced brickwork. However, there is not an established definition for this typology's architectural geometry. Also, there is hardly any evidence of how such shells were designed. Therefore, the main objective, of this paper is to demonstrate the underlying geometric relationships in the discontinuous gaussian vault shells designed and built by Eladio Dieste in reinforced brickwork, the dominant typological variation within the object of study. This analysis was carried out by means of the parametric modeling and the polynomial regression of selected case studies from the primary sources, since such computational tools allow for the proper geometrical management of formally complex geometries. The expected contributions of this study reside in the deepening of the understanding of the relationship between the design process and the geometry of the object of study, as well as the understanding of the geometrical conformation of the structural typology conceived by Eladio Dieste.

¹Felipe Corres Melachos

¹Universidade Estadual de Campinas
Campinas - SP - Brasil

²Wilson Florio

²Universidade Presbiteriana Mackenzie
São Paulo - SP -

Recebido em 04/03/23

Aceito em 15/09/23

Keywords: Parametric modeling. Gaussian vault. Reinforced brickwork.

Introdução

A problemática para esta pesquisa parte da existência de estudos parciais, porém muito localizados (Pablo Bonta, 1963; Carbonell, 1987; Torrecillas; Perez, 1996a, 1996b; Pedreschi, 2000; Anderson, 2004; Carvalho, 2004; Pedreschi; Theodossopoulos, 2006; Melachos; Florio, 2018) acerca da obra do engenheiro uruguaio Eladio Dieste (1917-2000), autor de importantes inovações técnico-construtivas no século XX. A Igreja de Cristo Obrero em Atlántida no Uruguai, de autoria de Eladio Dieste, foi inclusive recém tombada pela UNESCO (2021) como Patrimônio Mundial em 2021.

Dentre as principais contribuições de Eladio Dieste figuram suas realizações e experimentações com a técnica construtiva da cerâmica armada, adequando-a para com a realidade técnica e financeira de suas áreas de atuação. Estas explorações resultaram, dentre outras, na tipologia estrutural inédita das abóbadas gaussianas, superfícies estruturais rígidas de dupla-curvatura e de configuração geométrica até então indeterminada. A literatura científica acerca das abóbadas gaussianas se concentra em sua execução, ao invés de seu projeto, especialmente no que diz respeito a sua ideação e geometrização propriamente ditas.

Esta pesquisa se detém na identificação e análise das relações geométricas subjacentes nas cascas projetadas e construídas por Eladio Dieste, definidas como abóbadas gaussianas descontínuas em cerâmica armada. Estas constituem a variação dominante das abóbadas gaussianas, sendo caracterizadas por aberturas zenitais entre os módulos estruturais da cobertura. Assim, esta análise identifica a existência de equações que sintetizem as soluções geométricas das abóbadas gaussianas descontínuas na obra de Eladio Dieste, uma geometria geradora, que demonstra que há mais de uma mera semelhança geométrica entre as seções de exemplares do objeto de estudo.

Contudo, é importante ressaltar que o escopo deste trabalho não engloba as implicações geométricas adotadas na resistência e rigidez estrutural das cascas supracitadas, fundamentais para a viabilidade da própria concepção arquitetônica dentro da técnica construtiva empregada. Sua discussão e análise propriamente dita constitui uma outra pesquisa, e demanda métodos distintos, os quais serão apresentados no decorrer desta investigação.

O método empregado para esta análise foi a modelagem paramétrica e a regressão polinomial de estudos de caso selecionados a partir de desenhos técnicos originais, obtidos em fontes primárias. Os recursos computacionais permitiram a identificação de geometrias tidas como formalmente complexas. A modelagem paramétrica é condizente com as novas ferramentas digitais do século XXI (Bechthold, 2008) que viabilizam a projeção e análise de geometrias de dupla-curvatura na contemporaneidade, fomentando a tangibilidade da interpretação de sua construção geométrica. Sua adoção nesta pesquisa ocorreu de maneira exploratória, de modo a investigar as possíveis relações geométricas subjacentes supracitadas no objeto de estudo. Já a regressão polinomial foi uma estratégia iterativa, a partir de contato prévio com as pesquisas anteriores correlatas, de tal sorte a explorar possíveis conformações geométricas das seções transversais e longitudinais dos objetos de estudo.

A contribuição original deste artigo reside em demonstrar o entendimento entre a relação do processo de projeto e a geometria resultante no objeto de estudo, assim como o entendimento da conformação geométrica da tipologia estrutural das abóbadas gaussianas descontínuas desenvolvida por Eladio Dieste. Este estudo acrescenta novos conhecimentos acerca deste importante engenheiro uruguaio, bem como de suas realizações construtivas e arquitetônicas.

Este trabalho está estruturado na seguinte sequência: introdução, referencial teórico, procedimentos metodológicos, discussão e considerações finais. A seção denominada procedimentos metodológicos demonstra as etapas de realização da pesquisa, os critérios para a seleção do objeto de estudo e nove estudos de caso. Na seção denominada “pesquisa realizada e resultados obtidos”, são explicitados os procedimentos de cada etapa e sub etapa da pesquisa, evidenciando os produtos obtidos decorrentes da base empírica da pesquisa e de sua análise. Já na seção denominada “discussão”, ocorre a confrontação entre o estado-da-arte da literatura sobre o objeto de estudo e os achados da pesquisa, ao passo que em “considerações finais” foi realizada uma síntese sobre o desenvolvimento da pesquisa realizada e sobre o potencial para trabalhos futuros.

Referencial teórico

Esta exploração acadêmica visa a identificação e análise de relações geométricas subjacentes nas cascas projetadas e construídas por Eladio Dieste em cerâmica armada, denominadas abóbadas gaussianas descontínuas. Este trabalho constitui uma sistematização dos resultados obtidos durante a pesquisa de

Melachos (2020), onde foi constatado que as abóbadas gaussianas descontínuas, tais como o Galpão de Palenga (Figura 1) projetado e construído por Eladio Dieste em Montevideo em 1981, constituem 46 das 56 obras construídas por Dieste na tipologia das abóbadas gaussianas. Sua construção se deu predominantemente no continente sul-americano, mais especificamente no Uruguai, com exemplares dispersos no Brasil, Argentina e Espanha.

Tal qual mencionado anteriormente, as explorações acadêmicas acerca da produção projetual e construtiva do engenheiro uruguaio Eladio Dieste (1917-2000) são caracterizados por estudos parciais e muito localizados. No próprio Brasil, no final do século XX e no início do século XXI existe uma concentração de explorações acerca da arquitetura uruguaia justamente na região sul do Brasil, muito em função de uma proximidade cultural e geográfica. Marques (2016, 2012) e Comas, Canez e Bohrer (2004), examinaram a atuação destes personagens uruguaio em associação com importantes arquitetos brasileiros da região.

A produção do engenheiro Uruguaio Eladio Dieste é importante dentre os construtores uruguaio que atuaram no Brasil, porque exportaram interpretações latino-americanas de arquiteturas racionalistas (Waisman, 2013) mundo-afora, tanto em um viés técnico construtivo quanto em um viés formal-espacial. Anderson (2004) destaca as abóbadas gaussianas projetadas e estruturadas em cerâmica armada por Eladio Dieste como uma de suas principais inovações estruturais, representando além de uma invenção tipológica, também o maior precedente para grandes vãos nesta técnica construtiva (García del Castillo y López *et al.*, 2019). O levantamento de fontes primárias demonstrou que existem duas variações de abóbadas gaussianas, contínuas (sem a interrupção de aberturas, como na Igreja de Cristo Obrero), e descontínuas (com a interrupção de aberturas, como na CEASA, sigla que significa “Centrais de Abastecimento”, de Porto Alegre). A maioria das abóbadas gaussianas projetadas e construídas por Eladio Dieste em cerâmica armada se deu na variação tipológica descontínua (Melachos, 2020). Assim sendo, o objeto de estudo desta pesquisa são as abóbadas gaussianas descontínuas projetadas e construídas por Eladio Dieste em cerâmica armada, caracterizadas pela existência de aberturas zenitais entre seus módulos estruturais.

Figura 1 -Tomada geral das abóbadas gaussianas descontínuas do Galpão de Palenga, construído por Eladio Dieste em Montevideo, em 1981



Fonte: Finotti (2023).

Levantamentos em bases de dados acadêmicas de pesquisa, como o Web-of-Science e o Avery Index, indicam que existe uma escassez de literatura acerca de Eladio Dieste. O objeto de estudo aparece um número ainda menor de publicações, tanto em suas grafias no idioma inglês quanto no castelhano (*gaussian vaults* e *bóvedas gausas* respectivamente). Suas menções ocorrem em publicações explorando seu processo construtivo (Anderson, 2004; Carbonell, 1987; Carvalho, 2004; Pedreschi, 2000; Pedreschi; Theodossopoulos, 2006; Torrecillas; Perez, 1996a), acrescido de depoimentos do próprio Dieste sobre suas premissas teórico-práticas (Carbonell, 1987; Torrecillas; Perez, 1996a) e impressões de críticos contemporâneos (Pablo Bonta, 1963) e a posteriori (Anderson, 2004). Carvalho (2004) talvez apresente uma das pesquisas onde o processo construtivo do objeto de estudo é melhor discretizado, sugerindo que a apreensão de sua geometria no canteiro de obras se dá através da leitura de seções esquemáticas, denominadas “costelas”. Ainda, Dieste, em seu *Métodos de Cálculo* (Torrecillas; Perez, 1996b), indica que as geometrias que iam para o canteiro de obras eram obtidas por meio de iterações de seções que pudessem lidar com os esforços de flambagem e de peso próprio.

Foram poucas as instâncias de detectada literatura específica explorando a constituição geométrica do objeto de estudo. Em Remo Pedreschi e Dimitris Theodossopoulos (2006) fica constatada a matriz catenária da seção longitudinal, ao passo que o próprio Dieste (Carbonell, 1987; Torrecillas; Pérez, 1996a) sugere que as cascas das abóbadas gaussianas são essencialmente cascas de diretriz catenária, cuja ondulação transversal e amplitude variável tem o intuito de estabelecer sua rigidez perante esforços de flambagem. Já Pedreschi e Larrambeber (2004) sugerem que as abóbadas gaussianas são formadas por seções de catenária transladadas horizontalmente, mas com flecha gradualmente variável. Com relação à superfície do objeto de estudo, Allen (2004) sugere que a mencionada superfície seria essencialmente cilíndrica, e o próprio Dieste (Carbonell, 1987; Torrecillas; Pérez, 1996b) é o único a realizar a distinção entre as variações contínua (sem aberturas zenitais) e descontínua (com aberturas zenitais). Já os termos “dupla-curvatura” e “casca” (Carbonell, 1987; Torrecillas; Pérez, 1996a, 1996b; Allen, 2004; Anderson, 2004; Bechthold, 2008; Pedreschi; Larrambeber, 2004) foram predominantes enquanto tentativas de classificação da superfície do objeto de estudo. Por fim, é importante ressaltar que o termo “gaussianas” referente ao nome da tipologia em questão foi uma homenagem ao matemático alemão Carl Friedrich Gauss que partiu do próprio Eladio Dieste (Carbonell, 1987; Torrecillas; Pérez, 1996a; Anderson, 2004).

O referencial teórico supracitado não identificou eventuais relações geométricas subjacentes presentes na seção transversal e superfície do objeto de estudo. Anderson (2004), por exemplo, se limita a alcunhar a seção transversal como seção em “S”, ao passo que Bechthold (2008) as classifica como “senóides”. Pedreschi e Theodossopoulos (2006) estabelecem que as seções longitudinais do objeto de estudo apresentam uma relação entre flecha e vão entre 1:8 e 1:10, sendo 1:10 a proporção mais disseminada.

García del Castillo y López *et al.* (2019) eleva as abóbadas gaussianas como principal precedente para o desenvolvimento de grandes vãos com a utilização de cerâmica armada. Dentro deste contexto, é importante ressaltar que a cerâmica passa por um processo de redescoberta caracterizado por novas ferramentas de projeção e fabricação digital (Bechthold, 2016), suscitando sua disseminação na indústria e academia enquanto elemento construtivo para superfícies estruturais rígidas na contemporaneidade (Ugarte-Urzúa *et al.*, 2020).

Nas últimas duas décadas, as ferramentas digitais voltadas para projeto de arquitetura e de engenharia tornaram-se mais eficazes, seja para a concepção de formas inovadoras, seja para a construção de geometrias complexas de dupla-curvatura (Kolarevic, 2003). Com menos desperdício de materiais (Pottmann *et al.*, 2007; Schodek; Bechthold, 2014) novas estruturas têm surgido em decorrência das possibilidades de análise estrutural. A modelagem paramétrica em especial, pode ser utilizada como método investigativo (Sass, 2000), visando a aferição de relações geométricas e tipológicas em geometrias complexas (Schumacher, 2009; Veiga, 2016; Melachos *et al.*, 2019a, 2019b, 2023). Assim sendo, a modelagem paramétrica, decorrente da exploração no Rhinoceros 3D em associação com o plugin Grasshopper 3D, foi selecionada como meio de construção geométrica dos estudos de caso a partir de desenhos obtidos fontes primárias.

A modelagem paramétrica do objeto de estudo empregou protocolos experimentais de modelagem computacional de superfícies de dupla-curvatura. Datta, Sharman e Chang (2016), apresentam a modelagem computacional e prototipagem exploratória de abóbadas gaussianas, mas sem o estabelecimento de uma definição geométrica propriamente dita e sem a utilização de desenhos originais para aferir a geometria modelada em relação aos projetos e/ou obras estruturados enquanto abóbadas gaussianas. Nestas pesquisas tampouco foram identificadas eventuais relações geométricas subjacentes no objeto de estudo.

A utilização da regressão polinomial como método de pesquisa ocorreu na investigação da geometria constituinte das seções transversais e longitudinais do objeto de estudo, assim como a viabilização da

modelagem paramétrica da superfície a partir de eventuais equações que sintetizassem a geometria de suas seções transversais e longitudinais. A adoção deste instrumento metodológico se deu de maneira iterativa através da exploração do método dos mínimos quadrados (Mendenhall; Beaver; Beaver, 2006) associado ao *curve fitting*, sendo balizado pelo coeficiente de determinação R^2 (Custódio; Andrade; Augusto, 1997). Os softwares utilizados foram o Microsoft Excel e o *R*, devido à familiarização dos autores com sua operação.

Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos desta investigação envolvem elementos de pesquisa qualitativa e quantitativa, constituídos pela base teórica e pela base empírica, sintetizadas na Figura 2. A pesquisa foi iniciada com sua base teórica, no âmbito qualitativo, por meio de uma revisão bibliográfica em livros e teses, identificados através de consultas em bibliotecas locais. Esta consulta inicial, acrescida da exegese de artigos acadêmicos obtidos e captados a partir de indexadores acadêmicos, como o *Web-of-Science* e o *Avery Index*, indicaram o problema da pesquisa em questão: definir a geometria das abóbadas gaussianas descontínuas de Eladio Dieste por meio de suas relações geométricas subjacentes. Este levantamento inicial indicou também a necessidade da realização de visitas *in-loco* das obras do engenheiro uruguaio, de seu ainda ativo escritório *Dieste y Montañez*, assim como das bibliotecas e universidades locais na América do Sul e Espanha.

Figura 2 - Síntese dos procedimentos metodológicos da pesquisa

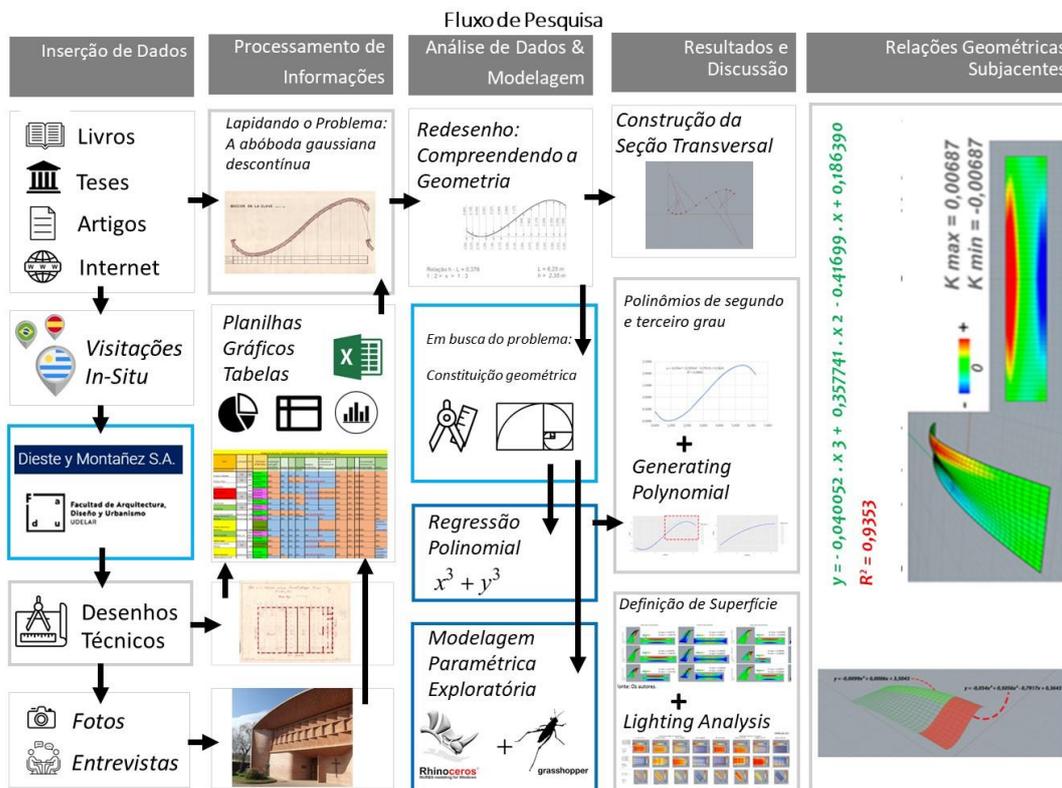
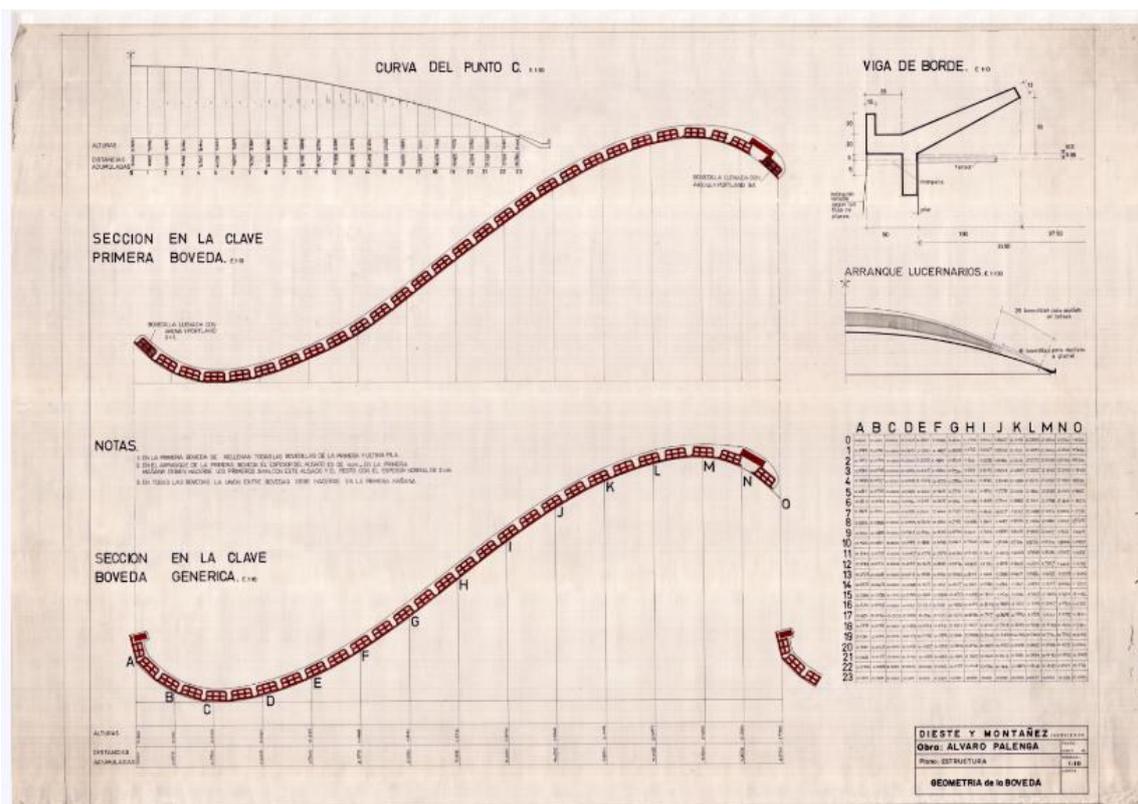


Figura 3 - Exemplo de “prancha de geometria da abóbada” para o estudo de caso do Galpão Palenga



Fonte: Dieste & Montañez(1981).

A revisão bibliográfica e visitação *in-loco* de obras de Eladio Dieste no Uruguairenderam aos pesquisadores a obtenção de material inédito a partir de fontes primárias de consulta. Primeiramente, a análise aprofundada deste rico material apontou que a forma das abóbadas gaussianas era registrada em desenhos denominados “pranchas de geometria da abóbada” (Figura 3). Na sequência, partiu-se para uma etapa quantitativa desta pesquisa, calculada pela filtragem dos desenhos técnicos obtidos com relação à presença de “pranchas de geometria da abóbada”. Assim, de um total de 247 obras projetadas por Eladio Dieste, foram identificadas 51 abóbadas gaussianas, das quais constatou-se que 45 eram abóbadas gaussianas descontínuas (Figura 4). As visitas *in-loco* renderam cópias digitalizadas dos desenhos técnicos de 24 destes exemplares, sendo que nove destes projetos possuíam os jogos mais completos de informações técnicas incluindo a “prancha de geometria da abóbada”. Estes 9 projetos foram então selecionados como estudos de caso: o Cine Cel Cur (1987, Montevideo, Uruguai), o Colégio Hermanos Maristas (1981, Montevideo, Uruguai), o Depósito Portuário (1976, Montevideo, Uruguai), a Fábrica Caputto (1971, Salto, Uruguai), a Fábrica de Tabaco (1980, Montevideo, Uruguai), o Galpão de Lãs Piedras Altas (1986, Florida, Uruguai), Galpão Palenga (1981, Montevideo, Uruguai), Galpão Ferrando (1979, Montevideo, Uruguai), e Galpão Frai Marcus (1986, Canelones, Uruguai).

Pesquisa e resultados obtidos

A busca pela compreensão da geometria subjacente do objeto de estudo teve como ponto de partida o redesenho (Figura 5) das seções transversais e longitudinais dos estudos de caso a partir das informações na “prancha de geometria da abóbada” de cada projeto. Todas as “pranchas de geometria da abóbada” apresentam seções transversais e longitudinais, detalhes das vigas de borda, e uma tabela de suas coordenadas da altura das interseções entre as seções transversais (0 – 23 no caso do Galpão de Palenga) e as seções longitudinais (A – O no caso do Galpão de Palenga) (Figura 2). Ocasionalmente estas pranchas apresentam diagramas das aberturas entre os módulos das coberturas que diferenciam as abóbadas gaussianas descontínuas de sua variação contínua, mas sem grande detalhamento dimensional. O redesenho se deu através do software AutoCAD devido à familiarização dos autores com a ferramenta e em função de sua versão estudantil gratuita. Neste procedimento, as coordenadas da tabela da “prancha de geometria da abóbada” de cada projeto foram inseridas no desenho e interpoladas através de uma *spline*. Este redesenho dos estudos de caso foi importante porque propiciou apreensão inicial da geometria das seções do estudo de caso e, particularmente, o

entendimento das “pranchas de geometria”, determinante para a viabilidade da componente empírico da pesquisa. É importante destacar que nesta etapa foram detectados muitos erros nos desenhos originais, como imprecisões de cotas. Apesar deste fato, foi possível a extração de estatísticas sobre a conformação geométrica de cada estudo de caso (Figura 6), outro componente quantitativo dentre os procedimentos metodológicos adotados.

A Figura 6 demonstra a interpretação dos dados contidos nas pranchas de desenho e de seu redesenho a partir das fontes primárias. Os gráficos na Figura 6 estabelecem as proporções de flecha para vão transversal (Figura 6, a esquerda) e longitudinal (Figura 6, a direita) dos nove estudos de caso. No caso dos vãos transversais, fica evidente uma alternância da proporção de valores entre 1:2 e 1:3 (maioria) ou 1:3 e 1:4 (minoria).

Já no caso dos vãos longitudinais, a Figura 3 demonstra uma distribuição isonômica entre as proporções de 1:11 e 1:12; 1:10 e 1:11; e 1:7 e 1:8, com uma única instância ocorrendo na relação 1:8 e 1:9. Assim sendo, fica estabelecido que a relação flecha – vão para os vãos transversais dos estudos de caso ficou na proporção $1:2 > x > 1:4$. Da mesma maneira, fica estabelecido que a relação flecha – vão para os vãos longitudinais ficou na proporção $1:11 > x > 1:8$, sendo que sua média aritmética ficou, aproximadamente, em 1:10. Utilizando da mesma sistemática, foram comparadas: 1., as grandezas dos vãos longitudinais e transversais; 2., o dimensionamento de flechas para ambos os vãos; 3., o distanciamento entre as demarcações e a quantidade destas demarcações na “prancha de geometria da abóbada”; e 4., a escala dos desenhos obtidos para ambas as seções.

Figura 4 - Diversidade de tipologias estruturais na obra de Dieste (a), e de abóbadas gaussianas descontínuas e contínuas (b)

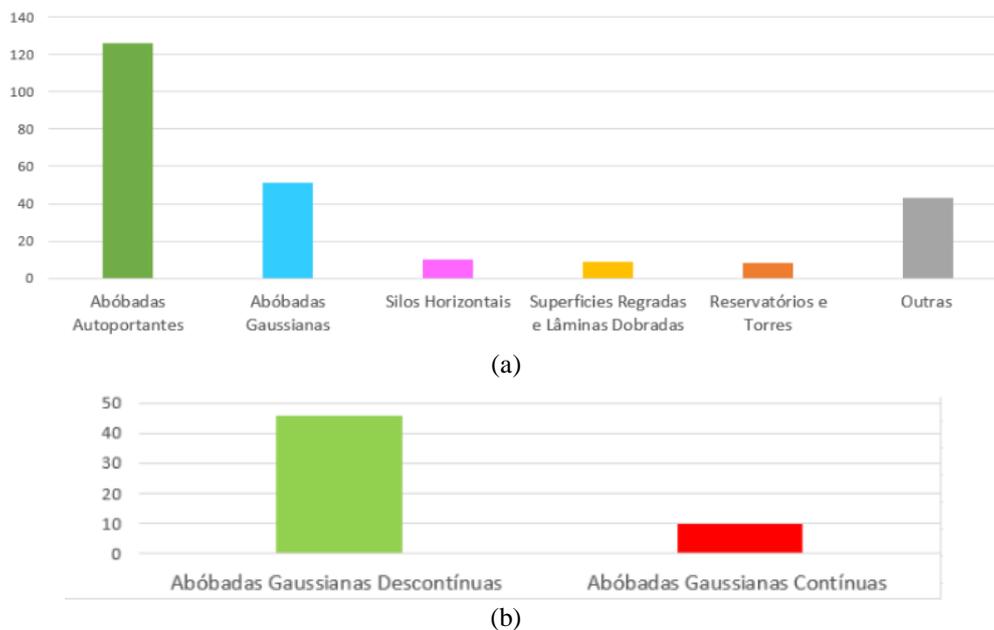


Figura 5 - Exemplo de redesenho das seções transversais e longitudinais chave a partir das pranchas de geometria para o estudo de caso Galpão de Palenga

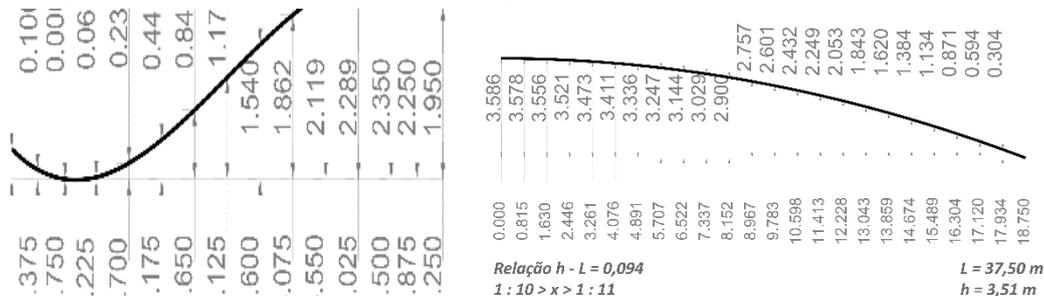
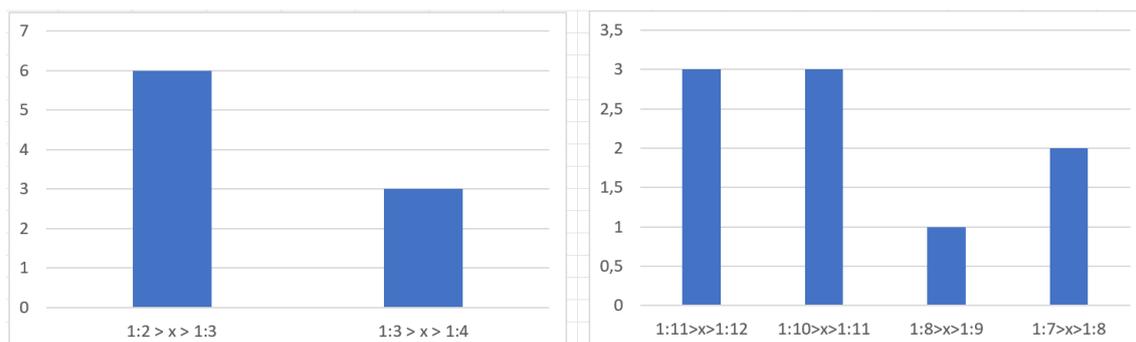


Figura 6 - Relação Flecha (altura) do vão transversal (esquerda) e flecha (altura) do vão longitudinal (direita) das abóbadas gaussianas



Conforme mencionado anteriormente, o processamento das informações e conhecimentos anteriores revelou lacunas na análise do objeto de estudo, mais especificamente a indefinição da geometria das abóbadas gaussianas descontínuas e a possível presença de relações geométricas subjacentes nestes elementos. Esta lacuna conduziu a experimentações, tanto na plataforma CAD quanto com software de modelagem paramétrica.

O experimento realizado foi a aferição da possibilidade de gerar as curvas das seções transversais e longitudinais do objeto de estudo por meio de equações, de modo a aferir eventuais relações geométricas subjacentes entre os estudos de caso. Procedeu-se para a regressão polinomial das seções transversais e longitudinais de cada estudo de caso a partir das coordenadas de distância acumulada e altura acumulada extraídas a partir de sua respectiva “prancha de geometria da abóbada” (Tabela 1).

O processo da regressão polinomial foi iniciado no programa Microsoft Excel através de ferramentas de *curve fitting* balizadas pela compatibilidade visual do modelo gerado e seu coeficiente de determinação (R^2), decorrente do método dos mínimos quadrados (Mendenhall; Beaver; Beaver, 2006), onde o valor de 1,00 significa um ajuste (ou fitting) perfeito (Custódio; Andrade; Augusto, 1997). A Figura 8 indica que, no caso do Galpão de Palenga, houve um bom ajuste de R^2 para sua seção transversal, com um polinômio de 3º grau com coeficiente $R^2 = 0,9992$. O ajuste das curvas foi realizado iterativamente para o polinômio de grau mais simples, seguindo o princípio da simplicidade (Mendenhall; Beaver; Beaver, 2006).

A Tabela 2 demonstra que a regressão polinomial das seções transversais chave resultou em polinômios de terceiro grau para todos os estudos de caso. Já a Tabela 3 indica que a regressão polinomial das seções longitudinais chave resultou em polinômios de segundo grau para todos os estudos de caso. Em ambos os quadros, os graus de confiabilidade representados pelo coeficiente R^2 foram elevados.

Posteriormente, foi realizada a regressão polinomial por meio do uso de ferramentas *curve fitting* das coordenadas de todas as seções transversais dos estudos de caso, em um experimento, e das longitudinais, em outro experimento, agora no software R. Neste experimento os modelos resultantes de cada experimento foram obtidos a partir do método descritivo de suavização Loess (Cleveland, 1979; Cleveland *et al.*, 1990; Dagum; Luati, 2002), também derivado do método dos mínimos quadrados (Mendenhall; Beaver; Beaver, 2006) utilizado no experimento anterior. A Figura 9(a) ilustra o resultado obtido para a regressão polinomial das seções transversais, gerando o polinômio ilustrado na Equação 1 com coeficiente R^2 de 0,9353. Já o resultado obtido para a regressão polinomial das seções longitudinais, gerou o polinômio ilustrado na Equação 2, com coeficiente R^2 de 0,3752. É importante destacar que este experimento constitui uma aproximação do conjunto de todas as curvaturas de seção transversal, sem, contudo, ter a intenção de criar uma fórmula para todas as obras do engenheiro uruguaio. Reconhece-se, portanto, a unicidade de cada obra projetada e construída por Eladio Dieste.

$$y = -0.040052 \cdot x^3 + 0.357741 \cdot x^2 - 0.41699 \cdot x + 0.186390 \quad \text{Eq. 1}$$

$$R^2 = 0,9353$$

$$y = 3.568 - 1.203e - 01 \cdot x - 6.291e - 04 \cdot x^2 - 5.744e - 05 \cdot x^3 \quad \text{Eq. 2}$$

$$R^2 = 0,03752$$

Tabela 1 - Coordenadas de distância acumulada (X) e altura acumulada (Y) nas intersecções das seções longitudinais e transversais para o estudo de caso Galpão Palenga

| Ponto | Coordenada X (m) | Coordenada Y (m) |
|-------|------------------|------------------|
|-------|------------------|------------------|

| | | |
|---|--------|--------|
| A | 0,0000 | 0,4000 |
| B | 0,0375 | 0,1000 |
| C | 0,7500 | 0,0000 |
| D | 1,2250 | 0,0610 |
| E | 1,700 | 0,2310 |
| F | 2,1750 | 0,4880 |
| G | 2,6500 | 0,8400 |
| H | 3,1250 | 1,1750 |
| I | 3,6000 | 1,5400 |
| J | 4,0750 | 1,8620 |
| K | 4,5500 | 2,1190 |
| L | 5,0250 | 2,2890 |
| M | 5,5000 | 2,3500 |
| N | 5,8750 | 2,2500 |
| O | 6,2500 | 1,9500 |

Figura 8 - Regressão polinomial da seção transversal chave do Galpão Palenga

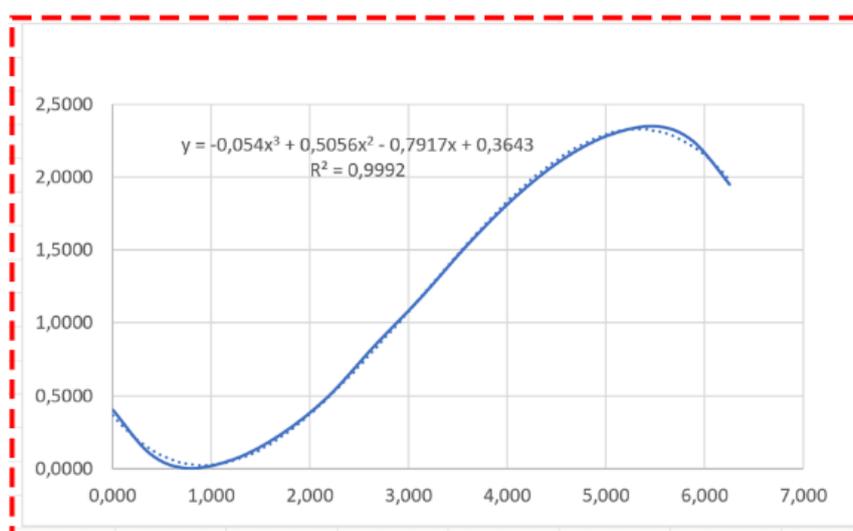


Tabela 2 - Polinômios resultantes da regressão polinomial das seções transversais

| Casos Selecionados | Polinômios de 3º grau - Seção Transversal | Fator R2 |
|-----------------------------|---|----------|
| Cine Cel Cur | $y = -0,0675x^3 + 0,4782x^2 - 0,5072x + 0,1421$ | 0,999 |
| Colégio Hermanos Maristas | $y = -0,0602x^3 + 0,4512x^2 - 0,4895x + 0,1315$ | 0,9995 |
| Depósito Portuário | $y = -0,0743x^3 + 0,633x^2 - 0,9479x + 0,3826$ | 0,998 |
| Fábrica Caputto | $y = -0,0631x^3 + 0,5707x^2 - 0,8989x + 0,3813$ | 0,9993 |
| Fábrica de Tabaco | $y = -0,0584x^3 + 0,526x^2 - 0,7751x + 0,3444$ | 0,9983 |
| Galpão de Lãs Piedras Altas | $y = -0,0784x^3 + 0,5879x^2 - 0,6746x + 0,1768$ | 0,9981 |
| Galpão de Palenga | $y = -0,054x^3 + 0,5056x^2 - 0,7917x + 0,3643$ | 0,9992 |
| Galpão Ferrando | $y = -0,0962x^3 + 0,7196x^2 - 0,9314x + 0,3114$ | 0,9996 |
| Galpão Frai Marcus | $y = -0,057x^3 + 0,4272x^2 - 0,4912x + 0,1465$ | 0,9994 |

Tabela 3 - Polinômios resultantes da regressão polinomial das seções longitudinais

| Casos Selecionados | Polinômios de 2º grau - Seção Longitudinal | Fator R2 |
|--------------------|--|----------|
|--------------------|--|----------|

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------|
| Cine Cel Cur | $y = -0,0211x^2 + 0,0089x + 2,5914$ | 0,997 |
| Colégio Hermanos Maristas | $y = -0,0175x^2 + 0,0013x + 1,8111$ | 1 |
| Depósito Portuário | $y = -0,0086x^2 + 3E-05x + 4,3075$ | 0,998 |
| Fábrica Caputto | $y = -0,0087x^2 - 4E-05x + 4,1849$ | 1 |
| Fábrica de Tabaco | $y = -0,0097x^2 + 0,0005x + 3,5992$ | 0,9999 |
| Galpão de Lãs Piedras Altas | $y = -0,0145x^2 + 0,0015x + 5,5387$ | 1 |
| Galpão de Palenga | $y = -0,0099x^2 + 0,0006x + 3,5043$ | 1 |
| Galpão Ferrando | $y = -0,0128x^2 + 0,0015x + 2,3824$ | 1 |
| Galpão Frai Marcus | $y = -0,0236x^2 + 0,0059x + 3,2349$ | 1 |

No referencial teórico analisado, o pesquisador Bechthold (2008) denomina as seções transversais das abóbadas gaussianas de Dieste como “senóides”. Logo, procedeu-se para outra experimentação para aferir esta afirmação a partir da modelagem paramétrica. O software utilizado neste experimento foi o Rhinoceros 3d associado a seu plug-in Grasshopper 3d, de modo a viabilizar a modelagem paramétrica das geometrias em análise. O experimento foi iniciado a partir dos polinômios de 3º grau obtidos para a seção transversal chave dos estudos de caso nas experimentações anteriores, foram inseridos na definição de tal sorte a constituir uma seção transversal para cada estudo de caso (Figura 10, vermelho). Também foi gerada uma seção de senóide utilizando-se a mesma lógica, tendo sido arbitrados o comprimento de 6,00 m e 15 coordenadas longitudinais devido à predominância destes valores dentre os estudos de caso. A função de senóide escolhida foi $y = -\sin(x) - 1$. O sinal negativo no seno fez com que a função fosse espelhada no eixo Y, ao passo que a adição do “-1” fez com que a função fosse nivelada com as demais seções transversais dos estudos de caso no eixo X. O resultado do algoritmo da Figura 10 demonstra que a sobreposição das seções transversais chave das abóbadas gaussianas dos estudos de caso (indicadas em vermelho) diverge da curva senóide arbitrada (verde).

Findadas as experimentações referentes à constituição geométrica das seções das abóbadas gaussianas descontínuas de Eladio Dieste, procedeu-se para a análise de suas superfícies. Para tanto, foi necessário desenvolver um algoritmo que gerasse superfícies que concatenassem os polinômios das sessões transversais e longitudinais (Figura 11). A dupla curvatura resultante desta geometria foi o fator determinante para a continuidade da utilização plug-in Grasshopper 3d para o software Rhinoceros. No primeiro agrupamento da definição (Figura 11, à esquerda), denominado “definições das seções”, foram modeladas as seções transversais e longitudinais chaves a partir da interpolação de seus respectivos polinômios obtidos via experimentação anterior desta pesquisa, utilizando a mesma lógica do algoritmo da Figura 10. O segundo agrupamento do modelo, denominado “construção do modelo”, é focado em operações de manipulação das seções com base na interpretação dos desenhos originais das obras, criando gabaritos como as “guias verticais” para ajustar a altura das seções transversais. O agrupamento mais à direita, denominado “geração de superfícies”, tem como objetivo a geração do módulo unitário da superfície assim como da cobertura como um todo. Na imagem do módulo resultante, no canto inferior direito da Figura 11, fica registrado como o polinômio de segundo grau que constitui a catenária da seção longitudinal chave se concatena com polinômio de terceiro grau que conforma a seção transversal chave, constituindo uma superfície de dupla curvatura de difícil apreensão.

As superfícies resultantes para cada um dos nove estudos de caso constituem meio módulo da cobertura estruturada em abóbada gaussiana de cada estudo de caso. Estas superfícies foram exportadas para o Rhinoceros 3d através da operação “bake”, isto é onde se materializa a geometria contida no algoritmo contida dentro do Grasshopper dentro do Rhinoceros, e espelhadas de modo a completarem o módulo estrutural da cobertura de cada estudo de caso. Ainda no Rhinoceros 3d, as ferramentas de “curvature analysis” de superfície foram aplicadas a cada módulo de cobertura de estudo de caso, com a função de mapear cromaticamente a distribuição dos valores de curvatura gaussiana (k) e curvatura média (H) (Figura 12). A Figura 13 ilustra a aplicação desta metodologia para o Galpão de Palenga. Para a compreensão desta experimentação é importante entender que o conceito de curvatura gaussiana k é o produto das principais curvaturas de uma superfície, k_1 e k_2 , logo $k = k_1 \cdot k_2$. O conceito de curvatura média (H) diz respeito à média matemática das curvaturas principais da superfície, isto é, $H = (k_1 + k_2) / 2$ (Pottmann *et al.*, 2007). De acordo com Pottmann *et al.* (2007), a principal linha de curvatura de uma superfície pode ser definida como uma “[...] curva em uma superfície cujas tangentes estão em uma direção principal. Ainda, através de cada ponto de uma superfície, existem duas linhas de curvatura principais que se interseccionam em um ângulo reto e tocam as direções principais [...]” (p. 500, tradução nossa).

Figura 9 -Regressão polinomial das seções transversais (a) e longitudinais (b)

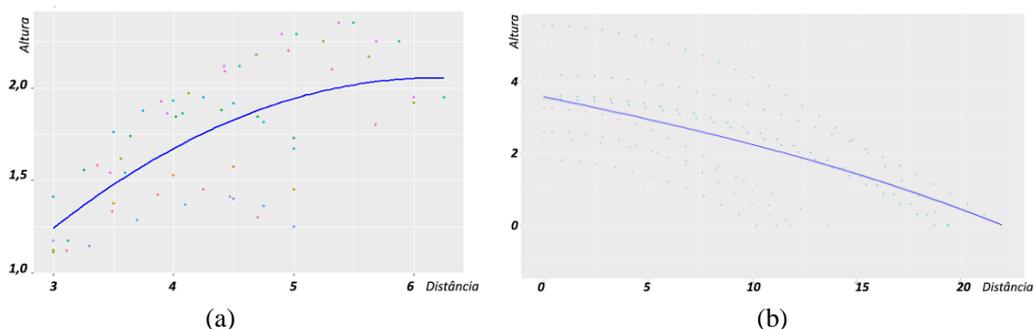


Figura 10 - Sobreposição das seções transversais dos estudos de caso (em vermelho) e de senóide (verde)

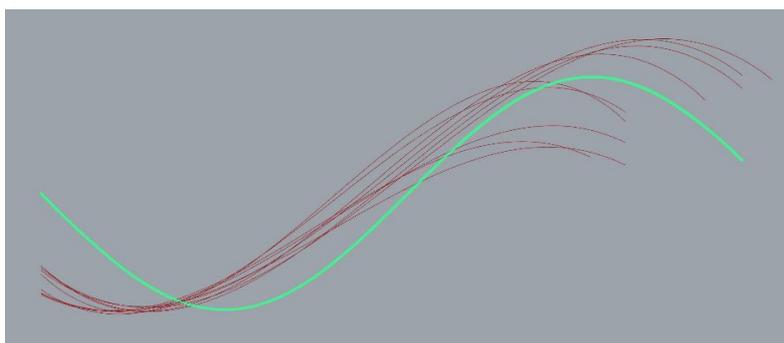
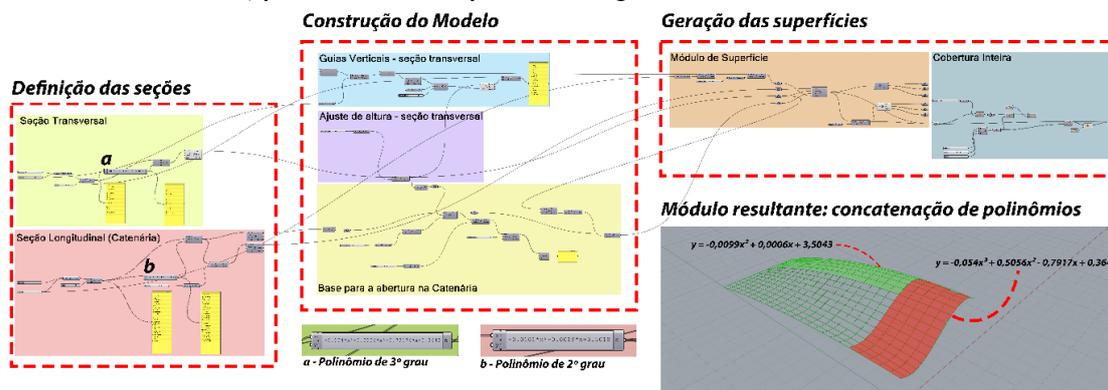


Figura 11 - Exemplo de algoritmo para a modelagem da geometria das coberturas das abóbadas gaussianas descontínuas, para o caso do Galpão de Palenga



Valores de curvatura gaussiana (k) positivas implicam em superfícies sinclásticas, ao passo que valores de curvatura gaussiana (k) negativos implicam em superfícies anticlásticas, e superfícies com valor de curvatura gaussiana (k) igual a zero são superfícies desdobráveis (Bechthold, 2008). Já superfícies com curvatura média (H) tendendo a zero são denominadas superfícies mínimas, exemplos de maximização de área de superfície (Pottmann *et al.*, 2007) como as experimentações com filmes de sabão de Frei Otto (Melachos, 2020).

Para os nove estudos de caso, a análise gaussiana das superfícies dos módulos das coberturas modeladas pôde ser dividida em três macrorregiões: uma pequena região azul (de k majoritariamente negativo), uma grande região verde (de k majoritariamente nulo), e uma pequena região vermelha (de k majoritariamente positivo) (Figura 13). A pequena região azul de k majoritariamente negativo está no centro do módulo em região de ondulação baixa, bem no início da seção transversal (Figura 13, a esquerda). Seu valor de k indica que se trata de uma porção de superfície anticlástica e de superfície numericamente classificada como freeform. Todavia seu valor de k muito próximo a 0 torna esta porção de superfície aproximadamente desdobrável.

Figura 12 - Análise de curvatura gaussiana (k) e curvatura média (H) para todos os nove estudos de caso

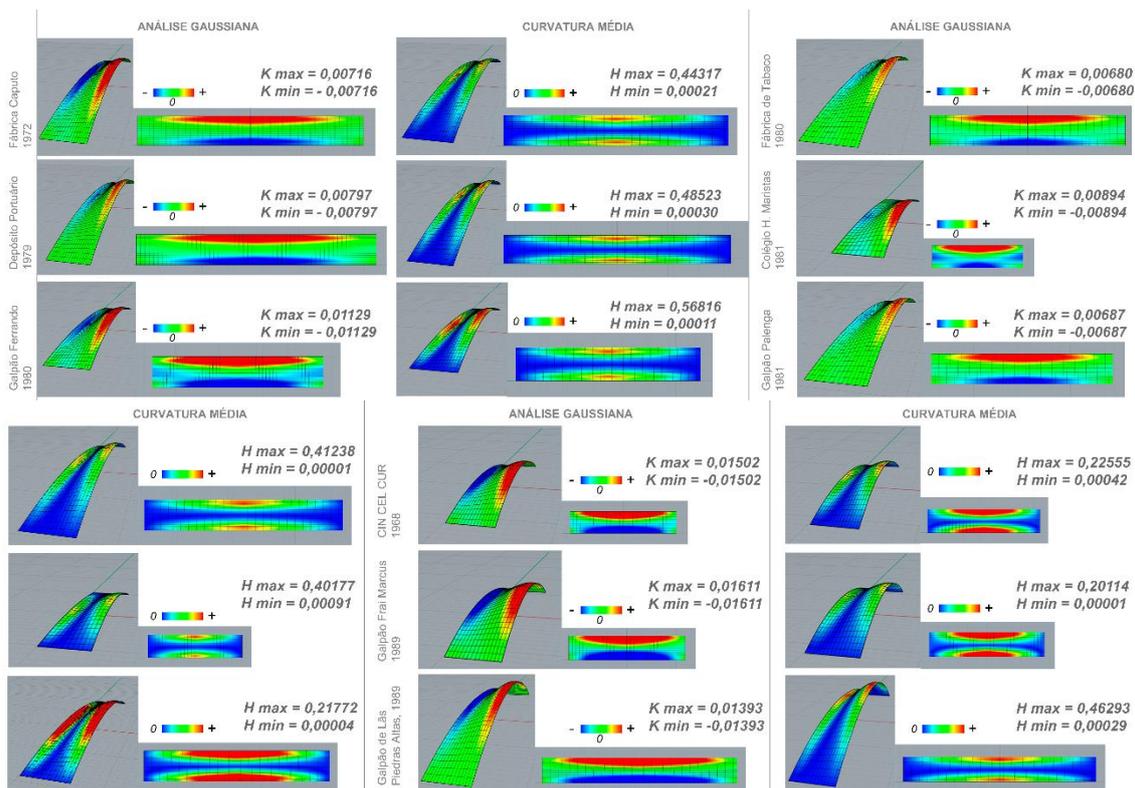
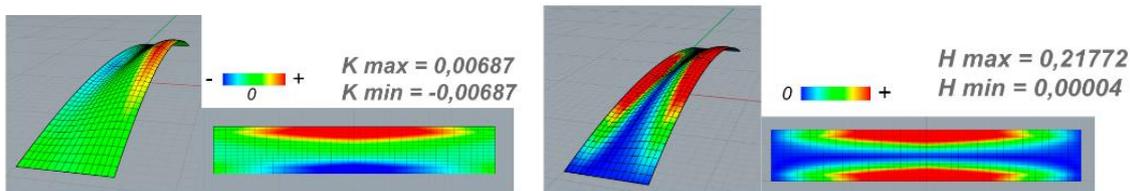


Figura 13 - (À esquerda, análise de curvatura gaussiana (k). À direita, curvatura média (H) para o Galpão de Palenga



A segunda porção da superfície tem o valor de k majoritariamente igual a 0, indicada como verde na Figura 13 (à esquerda). Esta parte da superfície ocupa boa parte da extensão do módulo estrutural, ocupando toda a borda do módulo estrutural e chegando à região central da seção transversal chave. Seu valor de k indica que se trata de uma porção de superfície desdobrável, caracterizando a parte predominante da superfície do objeto de estudo.

A terceira região tem o valor de k majoritariamente positivo, sendo representada na cor vermelha na Figura 13 (à esquerda). Esta região ocupa a extremidade longitudinal oposta à parte azul (de k majoritariamente negativo), somente mais ao centro do módulo estrutural, na região de ondulação mais alta, ou final da seção transversal. Seu valor de k indica que se trata de uma porção de superfície sinclástica e de superfície numericamente classificada como freeform. Todavia seu valor de k muito próximo a 0 torna esta porção de superfície aproximadamente desdobrável.

Os índices de curvatura média (H) dos estudos de caso apresentados foram similares ao longo dos estudos de caso analisados, mas não apresentaram a característica especial de curvatura média constante. Existe uma porção significativa das superfícies dos estudos de caso que tenderam a curvatura média (H) mínima com valores muito próximos a zero (áreas azuis, com valores entre 0,00001 e 0,00091) (Figura 13, à direita). Em função de seu valor H próximo a zero, pode-se afirmar que estas porções das superfícies dos modelos das abóbadas gaussianas descontínuas de Eladio Dieste são quasi-mínimas. Esta porção de superfície quasi-mínima se estende por quase toda a extensão do módulo estrutural, ocupando toda a borda do módulo estrutural e chegando a sua região central da seção transversal chave. As regiões centrais dos módulos estruturais, onde ocorrem as curvaturas mais acentuadas nas seções transversais são marcadas por valores de H mais elevados

(mapeados em verde e vermelho). Logo, atesta-se que considerável parte das superfícies dos modelos de Abóbadas Gaussianas descontínuas são quasi-mínimas.

A discussão a seguir constitui a contribuição original desta pesquisa.

Discussão

Os resultados obtidos e análises realizadas indicam que, de fato há um conjunto de relações geométricas, até então desconhecidas, nas coberturas estruturadas como abóbadas gaussianas descontínuas, projetadas e construídas em cerâmica armada por Eladio Dieste, que vai além de uma mera semelhança geométrica. Estas relações supracitadas se manifestam tanto nas seções transversais, quanto longitudinais e superfície do objeto de estudo.

No que diz respeito às seções transversais do objeto de estudo, o estado-da-arte fica limitado às observações de cunho superficial e formal acerca de sua geometria. Anderson (2004), por exemplo, alcunha estas curvas simplesmente como seção em “S” em função de seu caráter ondulado. Com relação à equiparação das seções transversais das abóbadas gaussianas a uma senóide por Bechthold (2008), é importante lembrar que o seno é uma função trigonométrica e não um polinômio, assim tais seções são passíveis de serem aproximadas para funções polinomiais através da Série de Taylor (Barbeau, 2003). Os resultados desta pesquisa demonstraram que as seções transversais das abóbadas gaussianas descontínuas não são senóides, mas sim polinômios de 3º grau. Assim, infere-se que ambas as afirmações de Anderson (2004) e Bechthold (2008) se dão em uma mera alusão em relação à curvatura das seções transversais do objeto de estudo.

Com relação às seções longitudinais do objeto de estudo, as pesquisas anteriores apontaram, como consolidada a sua constituição por arcos de catenária (Dieste, 1978; Carbonell, 1987; Torrecillas; Pérez, 1996a, 1996b; Anderson, 2004; Bechthold, 2008; Ochsendorf, 2004; Pedreschi; Larrambebere, 2004; Pedreschi, Theodossopoulos, 2006). A presente pesquisa se posiciona de maneira análoga a estas definições, mas acrescenta novos conhecimentos: que a geometria de sua curvatura é constituída por polinômios de 2º grau.

As descobertas da presente pesquisa apresentam divergências com relação às pesquisas anteriores, particularmente no que diz respeito às proporções da geometria das seções chave longitudinais do objeto de estudo. Pedreschi e Theodossopoulos (2006) afirmaram que as seções longitudinais das abóbadas gaussianas apresentavam relação flecha – vão entre 1:8 e 1:10, sendo 1:10 a proporção mais encontrada. Na presente pesquisa, o redesenho das fontes primárias (Figura 5) e a sistematização das informações obtidas (Figura 6) revelaram que a relação flecha – vão das seções longitudinais do objeto de estudo ficam entre 1:8 e 1:11. Todavia, estas constatações corroboram com Pedreschi e Theodossopoulos (2006) no sentido que 1:10 seria a proporção dominante na relação supracitada. Este mesmo procedimento metodológico também revelou que os vãos longitudinais do objeto de estudo não são uniformes, variando de 20,40 m até os 50,00 m de extensão. Da mesma maneira, ficou consolidado que, nas seções transversais chave, sua flecha é variável e diretamente proporcional ao vão transversal.

No que diz respeito ao processo de projeto e construção das abóbadas gaussianas descontínuas, Carvalho (2004) apresentou a única pesquisa detectada onde aspira-se compreender a transição das geometrias do objeto de estudo da prancheta para o canteiro de obras. Trata-se de uma leitura de cortes esquemáticos de módulos de coberturas de abóbadas gaussianas, denominados “costelas”, que contam com distancias acumuladas e cotas com variação de alturas, assim como uma tabela de coordenadas. Todavia, embora as representações de Carvalho (2004) se assemelhem às seções e tabelas em cada “prancha de geometria da abóbada” obtidas no levantamento de fontes primárias, estas não são mencionadas por Carvalho (2004). Diferentemente das “costelas” de Carvalho (2004), cada “prancha de geometria da abóbada” possui somente os desenhos da seção transversal chave e seção longitudinal chave, além de desenhos técnicos das aberturas zenitais nas coberturas. A pesquisa realizada pelos autores deste artigo concluiu que a “prancha de geometria da abóbada”, por se tratar de um desenho técnico visando a construção elaborado pelo próprio Eladio Dieste, constitui a ferramenta de traslado da geometria do objeto de estudo do desenho para o canteiro de obras. Assim sendo, uma das principais contribuições desta pesquisa reside no registro da sistematização da interpretação das “pranchas de geometria da abóbada” no âmbito do processo projetual e construtivo do objeto de estudo.

Já com relação à superfície do objeto de estudo, Allen (2004) sugeriu que a superfície do objeto de estudo seria essencialmente cilíndrica, mas não o demonstrou. Por outro lado, Leithold (1994) definiu cilindros como superfícies geradas pelo movimento de uma reta móvel (geratriz) ao longo de uma curva plana (diretriz) dada, “[...] de tal forma que [a superfície] se mantenha paralela a uma reta fixa não pertencente ao plano da curva dada [...]” (Leithold, 1994, p. 884). Nesta pesquisa tal afirmação é refutada, pois durante o processo de modelagem paramétrica dos módulos de superfície do objeto de estudo foi demonstrado que as bases da

superfície foram constituídas por seções transversais oriundas de polinômios de 3º grau, transladados ao longo dos arcos de catenária, que constituem as seções longitudinais da superfície. Assim sendo, a geratriz da superfície do objeto de estudo não é uma reta móvel, assim como sua diretriz não é uma curva plana, de modo que sua superfície não é um cilindro.

Ainda no que diz respeito à superfície das abóbadas gaussianas, a presente pesquisa se ladeia parcialmente com a definição de abóbadas gaussianas de Pedreschi e Larrambebere (2004), de que sua geometria seria constituída por uma casca ondulada, composta por seções de catenária transladadas horizontalmente, mas com flecha gradualmente variável. Esta se trata da definição mais precisa encontrada nas pesquisas anteriores (no estado-da-arte), mas os achados da pesquisa indicam que se faz necessário sua complementação discutindo a presença ou ausência das aberturas na superfície do objeto de estudo. Além disso, no dito estado-da-arte não há diferenciação taxonômica entre as abóbadas gaussianas contínuas e descontínuas, com a exceção do próprio Eladio Dieste (Carbonell, 1987; Torrecillas; Pérez, 1996a, 1996b).

A questão da natureza e classificação da curvatura das superfícies do objeto de estudo não foi observada nas pesquisas anteriores (Dieste, 1978; Carbonell, 1987; Torrecillas; Pérez, 1996a; Allen, 2004; Anderson, 2004; Bechthold, 2008; Pedreschi; Theodossopoulos, 2006; Pedreschi; Larrambebere, 2004), com exceção do termo “dupla-curvatura”. Assim sendo, os resultados da presente pesquisa indicam que a superfície do objeto de estudo é dividida em três partes: a. Anticlástica, numericamente freeform, mas aproximadamente desdobrável (parte minoritária); b. Sinclástica, numericamente freeform, mas aproximadamente desdobrável (parte minoritária); e c. Desdobrável (parte maioritária). Logo, pode-se inferir que a superfície do objeto de estudo é numericamente freeform, mas aproximadamente desdobrável. Da mesma maneira, os resultados das experimentações conduzidas indicaram que a maior parte

Da superfície dos objetos de estudo se provou quasi-mínimas. Estas descobertas científicas incorporam importantes propriedades para a superfície do objeto de estudo, capacitando-a para o melhor aproveitamento de materiais na concepção formal-estrutural na arquitetura, atestando a competência técnica do engenheiro uruguaio em escritos como Melachos e Florio (2018) e Ochsendorf (2004), onde Dieste é tratado como um “artista estrutural”. Embora muito relevantes para o comportamento estrutural das cascas objeto de estudo desta pesquisa, é importante ressaltar que o escopo deste trabalho se detém a analisar as relações geométricas subjacentes no objeto de estudo, e não nas relações de curvatura gaussiana (k) e curvatura média (h) e os esforços de membrana ou o próprio comportamento estrutural das cascas propriamente ditas.

Considerações finais

A revisão bibliográfica da presente pesquisa revelou um desconhecimento das arquiteturas modernas latino-americanas além de exemplares icônicos de Brasil e México na literatura do Atlântico Norte. Consequentemente, as publicações acadêmicas relacionadas ao engenheiro uruguaio Eladio Dieste, não obstante suas importantes contribuições técnico-construtivas, em bases acadêmicas indexadas se provaram escassas. Do mesmo modo, as principais publicações detectadas referentes à obra de Eladio Dieste não têm como enfoque suas tipologias estruturais e respectiva conformação geométrica, assim como a inter-relação destas formas resultantes para com seu processo de projeto e processo construtivo.

Em síntese, os resultados das experimentações desta pesquisa indicam que existe um conjunto de relações geométricas até então ocultas, que vai além de uma mera semelhança geométrica, nas coberturas estruturadas como abóbadas gaussianas descontínuas, projetadas e construídas em cerâmica armada por Eladio Dieste. Estas relações supracitadas se manifestam tanto nas seções transversais, quanto longitudinais e superfície do objeto de estudo. Estes achados foram obtidos por meio de aproximações sucessivas oriundas do redesenho das seções transversais e longitudinais do objeto de estudo, a análise de suas pranchas de desenhos técnicos originais, a regressão polinomial dos dados obtidos destas pranchas, assim como a modelagem paramétrica de suas seções transversais, longitudinais e superfícies no Rhinoceros 3d em associação com o Grasshopper 3d.

Em suma, fica constatado que as seções transversais das abóbadas gaussianas descontínuas de Eladio Dieste são curvas constituídas por polinômios de 3º grau, não por uma senóide, que possuem flecha variável e diretamente proporcional ao vão podendo ser sintetizadas por um único polinômio de 3º grau com alto grau de precisão. Já com relação a suas seções longitudinais, ficou constatado que estas são constituídas por polinômios de 2º grau e arcos de catenária visando maximizar os esforços de compressão, não passíveis de serem sintetizadas em um único polinômio de 2º grau devido a sua baixa precisão. A geometria de ambas as seções era representada pela demarcação de alturas e distâncias acumuladas nas “pranchas de geometria da abóbada”. No âmbito de sua superfície, é importante ressaltar que fica consolidado que as abóbadas gaussianas descontínuas de Eladio Dieste provaram ser essencialmente numericamente *freeform*, mas aproximadamente

desdobráveis, assim como em sua maior parte *quasi-mínimas*, mas sem curvatura-média (H) constante. Trata-se de importantes características para a consolidação da eficiência projetual e construtiva destas proposições tipológicas inovadoras de Eladio Dieste. Embora se reconheçam muito valorosos neste artigo, espera-se que pesquisas futuras possam vislumbrar a relação entre as características geométricas estudadas nesta pesquisa com seu método construtivo de alvenaria cerâmica armada, incluindo as inovações de canteiro propostas por Dieste e patenteadas por outros construtores mundialmente reconhecidos posteriormente (Anderson, 2004), assim como o comportamento estrutural das cascas e esforços de membrana vigentes. Estes elementos não fizeram parte desta pesquisa justamente em função do recorte associado à geometria arquitetônica e aos preceitos metodológicos através dos quais esta pesquisa foi embasada.

Espera-se em futuras pesquisas contrastar as propriedades geométricas dos desenhos com suas obras construídas propriamente ditas, através de ferramentas de escaneamento 3d. Assim seria possível comparar o modelo paramétrico desenvolvido com a obra construída, e aferir e identificar decisões e dificuldades técnicas que eventualmente distanciaram a geometria de projeto e obra.

O domínio deste ferramental também pode ser benéfico para a atualização do corpo docente de universidades públicas nacionais e estaduais, e consequente formação de melhores quadros profissionais. Seu escopo de aplicação transcende a geometria arquitetônica, podendo ser aplicado no âmbito do conforto ambiental, fluxos programáticos e projetuais e análises de pós-ocupação. Afinal, os investimentos das universidades públicas em ferramental desta natureza poderiam ser potencializados pela capacitação de seu pessoal. Sua disseminação constitui um impacto educacional, ao fomentar novas metodologias de ensino de projeto arquitetônico e concepção estrutural associadas a novas ferramentas de desenho digital.

Referências

- ALLEN, E. Guastavino, Dieste, and the two revolutions in masonry vaulting. In: ANDERSON, S. (org.). **Eladio Dieste: innovation in structural art**. New York: Princeton Architectural Press, 2004.
- ANDERSON, S. (org.). **Eladio Dieste: innovation in structural art**. New York: Princeton Architectural Press, 2004.
- BARBEAU, E. **Polynomials**. New York: Springer, 2003.
- BECHTHOD, M. Ceramic prototypes: design, computation, and digital fabrication. **Informes de la Construcción**, v. 68, n. 544, p. 1-11, 2016.
- BECHTHOLD, M. **Innovative surface structures: technologies and applications**. New York: Taylor & Francis, 2008.
- CARBONELL, G. (org.). **Eladio Dieste: la estructura ceramica**. Bogotá: Escala, 1987.
- CARVALHO, M. C. R. **Caracterização da tecnologia construtiva de Eladio Dieste: contribuições para a inovação do projeto arquitetônico e da construção em alvenaria estrutural**. Florianópolis, 2004. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- CLEVELAND, R.B. *et al.* STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. **Journal of Official Statistics**, v. 6, n. 1, p. 3-33, 1990.
- CLEVELAND, W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. **Journal of the American Statistical Association**, v. 74, p. 829-836, 1979.
- COMAS, C. E.; CANEZ, A. P.; BOHRER, G. V. **Arquiteturas Cisplatinas: Roman Fresnedo Siri e Eladio Dieste em Porto Alegre**. Porto Alegre: UniRitter, Centro Universitário Ritter dos Reis, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2004.
- CUSTÓDIO, R.; ANDRADE, J. C. de; AUGUSTO, F. O Ajuste de funções matemáticas a dados experimentais. **Química Nova**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. 219-225, abr. 1997.
- DAGUM, E. B.; LUATI, A. Global and local statistical properties of fixed-length nonparametric smoothers. **Journal of the Italian Statistical Society**, v. 11, oct., p. 313-333, 2002.
- DATTA, S.; SHARMAN, M.; CHANG, T. W. Computation, and fabrication of scaled prototypes. **Automation in Construction**, v. 72, p. 26-32, 2016.
- DIESTE, E. **Pandeo de laminas de doble curvatura**. Montevideu: Ediciones de la banda oriental, 1978.

- DIESTE & MONTAÑEZ. **Geometria de la Boveda**. 1981. 1 prancha de desenho técnico.
- FINOTTI, L. **Architectural photographer**. Disponível em: <http://www.leonardofinotti.com/projects/industrial-structure/image/49510-160130-004d>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- GARCIA DEL CASTILLO Y LÓPEZ, J. L. *et al.* Janus Printing. In: ACADIA 19: UBIQUITY AND AUTONOMY, 39., Austin, 2019. **Proceedings [...]** Austin, 2019.
- KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age: design and manufacturing**. Londres: Taylor & Francis, 2003.
- LEITHOLD, L. **O cálculo com geometria analítica**. 3. ed. São Paulo: Harbra, 1994. v. 2.
- MARQUES, S. **FAM**. Porto Alegre: ADFAUPA, 2016.
- MARQUES, S. **Fayet, Araujo & Moojen: arquitetura moderna brasileira no Sul 1950/1970**. Porto Alegre, 2012. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- MELACHOS, F. C. **Análise paramétrica das abóbadas gaussianas de Eladio Dieste**. São Paulo, Ferrara, 2020. 426 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo; Urbanismo, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, 2020.
- MELACHOS, F. C. *et al.* Investigations on the design process of Eladio Dieste: 3D parametric modelling of modern Latin American architectural heritage. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Hannover, v. 42, n. 15, p. 775-782, 2019a.
- MELACHOS, F. C. *et al.* Parametrical analysis and digital fabrication of thin shell structures: the impact of construction technique on the resulting geometry of the Gaussian Vaults of Eladio Dieste. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Hannover, v. 42, n. 9, p.479-485, 2019b.
- MELACHOS, F. C. *et al.* The architectural geometry of the church of Cristo Obrero y Nuestra Señora de Lourdes. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 43, Hannover, n. 2, p.1059-1066, 2023.
- MELACHOS, F. C.; FLORIO, W. Eladio Dieste, un artista strutturale dell’America latina: contributi originali sul processo di progettazione delle superfici strutturale. **Paesaggio Urbano**, v.1, p. 110-121, 2018.
- MENDENHALL, W.; BEAVER, R.; BEAVER, B. **Introduction to probability and statistics**. Belmont: Duxbury, 2006.
- OCHSENDORF, J. A. Eladio Dieste as structural artist. In: ANDERSON, S. (org.). **Eladio Dieste: innovation in structural art**. New York: Princeton Architectural Press, 2004.
- PABLO BONTA, J. **Eladio Dieste**. Buenos Aires: Instituto de Arte Americano de Investigaciones Estéticas, 1963.
- PEDRESCHI, R. **The engineer’s contribution to contemporary architecture**. London: Telford, 2000.
- PEDRESCHI, R.; LARRAMBEHERE, G. Technology and Innovation in the work of Eladio Dieste. In: STANFORD, A. **Eladio Dieste: innovation in structural art**. New York: Princeton Architectural Press, 2004.
- PEDRESCHI, R.; THEODOSSOPOULOS, D. The double-curvature masonry vaults of Eladio Dieste. **Structures & Buildings**, Londres, v. 160, p. 3-11, fev. 2006.
- POTTMANN, H. *et al.* **Architectural geometry**. Exton: Bentley Institute Press, 2007.
- SASS, L. **Reconstructing Palladio’s Villas: an analysis of villa design and construction process**. Cambridge, 2000. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2000.
- SCHODEK, D.; BECHTHOLD, M. **Structures**. Harlow: Pearson Education, 2014.
- SCHUMACHER, P. Parametricism: a new global style for architecture and urban design. **AD Architectural Design – Digital Cities**, London, v. 79, n. 4, jul./aug. 2009.
- TORECILLAS, A. J.; PEREZ, M. P. R. (org.). **Eladio Dieste 1943-1996**. Sevilla: Junta de Andalucía, 1996a.

TORECILLAS, A. J.; PEREZ, M. P. R. (org.). **Eladio Dieste 1943-1996: métodos de cálculo / calculation methods**. Sevilla: Junta de Andalucía, 1996b.

UGARTE-URZÚA, J. P. *et al.* Extruded tessellations: a novel structural ceramic system at the intersection of industrial ceramic extrusion and CNC fabrication. In: SIGRADi, 24., Medellín, 2020. **Anais [...]** Medellín, 2020.

VEIGA, B. **Oscar Niemeyer**: modelagem paramétrica e fabricação digital de edifícios curvilíneos do Parque Ibirapuera e do Memorial da América Latina. São Paulo, 2016. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

WAISMAN, M. **O interior da História**: historiografia arquitetônica para uso de Latino-americanos. São Paulo: Perspectiva, 2013.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O presente trabalho também foi realizado com o apoio do Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAPEX) da Universidade Estadual de Campinas.

Felipe Corres Melachos

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design e apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura e Construção | Universidade Estadual de Campinas | Rua Saturnino de Brito, 224 | Campinas - SP - Brasil | CEP13083-889 | Tel.: (19) 3521-2307 | E-mail: melachos@unicamp.br

Wilson Florio

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design e apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade Presbiteriana Mackenzie | Rua da Consolação, 930 | São Paulo - SP - Brasil | CEP 01302-907 | Tel.: (11) 2114-8383 | E-mail: wilsonflorio@gmail.com

Editora: **Luciana Inês Gomes Miron**

Editoras de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.