XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8817

Prototipagem de elementos cinético-performáticos para acústica arquitetônica

Kinetic-performative elements prototyping for architectural acoustics

Bruno de Paiva y Raviolo
Universidade Christus | Fortaleza | Brasil | bruno.raviolo@unichristus.edu.br
Luciana Stahl Azevêdo
Universidade Christus | Fortaleza | Brasil | lucianastahlazevedo@gmail.com
Jefferson Freire Ribeiro
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza | Brasil | jeffersonfreire@arquitetura.ufc.br
Renan Cid Varela Leite
Universidade Federal do Ceará| Fortaleza | Brasil | renancid@daud.ufc.br

Resumo

O tempo de reverberação e a difusão do som em recintos fechados são fundamentais para a acústica arquitetônica. Soluções dinâmicas são capazes de alternar entre diferentes estados, modulando as características ambientais. Soluções baseadas na técnica de origami e tesselações apresentam potencial enquanto elementos acústicos dinâmicos. Seguindo uma abordagem orientada para performance e revisão do estado-da-arte, iterou-se sobre um ciclo de projeto, simulação e prototipação por fabricação digital de um módulo de origami associado a um ressoador como forma de avaliar a viabilidade construtiva e a capacidade de adaptação geométrica. Apresenta-se a primeira iteração completa deste processo. São discutidos parâmetros de natureza projetual que influenciaram na qualidade final do protótipo, bem como externalidades que afetam diretamente a construtibilidade do módulo.

Palavras-chave: Origami. Acústica. Fabricação digital. Modelagem paramétrica. Tempo de reverberação.

Abstract

Reverberation time and sound diffusion in enclosed spaces are fundamental aspects of architectural acoustics. Dynamic solutions are capable of switching between different states, thereby modulating environmental acoustic properties. Systems based on origami techniques and tessellations show potential as dynamic acoustic elements. Following a performance-oriented approach and a state-of-the-art review, an iterative cycle of design, simulation, and prototyping through digital fabrication was conducted for an origami module coupled with a resonator, aiming to assess its constructive feasibility and geometric adaptability. The first complete iteration of this process is presented. Design-related parameters that influenced the final quality of the prototype are discussed, as well as external factors that directly affect the constructability of the module.

Keywords: Origami. Acoustics. Digital fabrication. Parametric design. Reverberation time.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8817

INTRODUÇÃO

Considerando as expectativas funcionais dos espaços nos quais a fala humana é parte essencial, e a proporcionalidade observada entre a quantidade de pessoas e a intensidade sonora da comunicação vocal, há ambientes nos quais a expressiva variação da ocupação pode induzir condições acústicas subótimas, configurando uma limitação frente à crescente demanda por espaços arquitetônicos adaptáveis e versáteis [1]. Nestes locais, a voz é, comumente, a principal fonte de ruído de fundo, com implicações negativas como a queda na inteligibilidade da fala, desgaste, fadiga vocal e queda de atenção e produtividade.

É sabido que o desempenho acústico influencia diretamente o conforto dos ocupantes e a adequação funcional dos espaços às necessidades acústicas. A seriedade da questão levou ao estabelecimento de valores de referência nacionais para o nível de pressão sonora ponderado na escala A ($RLeq_A$) para ambientes internos [2] e ao tempo de reverberação (TR_{60}) [3].

O TR_{60} é parâmetro fundamental para a avaliação da qualidade acústica, pois suas implicações afetam direta e indiretamente os parâmetros secundários [4]. É definido como o intervalo necessário para que o nível de pressão sonora decaia 60 dB após a cessada a emissão pela fonte, sendo explicado fisicamente pela perda de energia provocada pelas sucessivas reflexões ao incidir sobre materiais, com a conversão parcial em calor via absorção direta. Durante a emissão contínua de sons em ambientes com TR excessivamente alto e especialmente naqueles com materiais de baixa absortância nas primeiras reflexões acústicas, há a intensificação do nível de ruído de fundo.

SOLUÇÕES DINÂMICAS

A correção do TR tem sido tradicionalmente baseada em soluções estáticas, como painéis absorventes, *baffles e* nuvens cujo comportamento permanece inalterado após a instalação. Embora eficazes, a metodologia para dimensionamento e especificação de tais soluções adotam cenários específicos de ocupação, desconsiderando a irregularidade da ocupação humana e as inerentes flutuações em sua densidade.

Em ambientes multifuncionais, versáteis e com alto nível de exigência, com limites superiores e inferiores para o TR_{60}, a arquitetura orientada ao desempenho emerge como um paradigma que articula forma e materialidade que fornece respostas aos desafios ambientais [5]. É nesse sentido que consiste na proposição de sistemas inteligentes, capazes de responder dinamicamente às condições de uso e operação dos espaços ao assumir diferentes estados [1].

Paralelamente, os avanços nas tecnologias de projeto computacional e fabricação digital têm ampliado as possibilidades de concepção e materialização de geometrias

complexas. A modelagem paramétrica, processos de otimização baseados em heurísticas e as simulações computacionais, associadas a processos como corte a laser, usinagem CNC e impressão 3D, viabilizam produtos mais precisos, exibindo elevado grau de controle geométrico e numérico [6].

Neste contexto, a técnica de dobradura inspirada na arte japonesa do origami assume releituras enquanto estruturas transformáveis, capazes de alterar sua configuração espacial e funcional a partir de mecanismos cinéticos controlados [7]; [8]. A difusividade acústica proporcionada pelas faces não-paralelas tem potencial para neutralizar ecos reverberantes, ofuscamentos acústicos e outros fenômenos perniciosos derivados de reflexões especulares, contribuindo para a melhoria da ambiência acústica [4].

Os experimentos de transposição dos origamis para a acústica arquitetônica têm explorado superfícies microperfuradas associados a materiais porosos para elevação da absorção sonora, como observado em estudos recentes [9]. Apesar do desempenho satisfatório de atenuação em faixas de frequências médias e altas, estas soluções possuem eficácia reduzida na faixa de baixas frequências [4].

Absorvedores do tipo ressoadores, por sua vez, possuem elevada absorção para redução de ruído em frequência de ressonância projetadas, embora apresentem a desvantagem de uma largura de banda operacional estreita em torno da frequência especificada [4]. Ressonadores de Helmholtz são sistemas de absorvedores em forma de garrafa, cujo ar em seu interior se comporta como mola, sendo comprimido pela pressão sonora e absorvido pelo atrito com as paredes do gargalo, parede frontal do ressonador e em suas bordas, além de dissipação devido à cavidade de ressonância. A frequência onde ocorre a absorção máxima coincide com a frequência de ressonância da garrafa [10]; [11].

Sua aplicação é ampla para questões da acústica arquitetônica como forma de mitigar problemas em baixas frequências, onde absorvedores porosos convencionais costumam falhar devido aos longos comprimentos de onda. O comportamento de ressonadores com múltiplos pescoços demonstra que a frequência de ressonância pode ser ajustada de forma incremental ao abrir ou fechar pescoços adicionais, ampliando a versatilidade desses dispositivos nas baixas frequências [12]. Os autores concluem que a posição relativa dos pescoços influencia a distribuição da pressão acústica interna, validando o uso de simulações como ferramenta essencial para o design de ressoadores complexos e sistemas acústicos adaptáveis.

De acordo com [13], a distribuição não-uniforme de materiais absorventes e a presença de objetos difusores são capazes de alterar significativamente o campo sonoro. Segundo os autores, a inclusão de móveis e difusores de parede não apenas reduz o tempo de reverberação e a intensidade sonora, como também eleva a claridade da fala, especialmente quando os difusores são instalados com orientação vertical, redirecionando a energia sonora lateral em direção ao teto absorvente. A combinação estratégica de tratamento absorvente com elementos difusores permite um controle independente e preciso dos parâmetros acústicos, otimizando a qualidade da comunicação em ambientes educacionais.

PROBLEMA DE PESQUISA

A integração entre formas dobráveis e ressonadores indica elevado potencial para formular um elemento cinético de alto desempenho acústico, pautado pela elevada difusividade sonora, alta absorção de espectro amplo, e capacidade de assumir diferentes estados de abertura, do estendido ao contraído e vice-versa. Tal elemento modularia importantes variáveis ambientais acústicas de recintos fechados, prevenindo distorções, tais como reverberação excessiva e deslocamentos da imagem sonora resultantes de reflexões intensas.

A concepção guiada pela modelagem computacional e técnicas de fabricação digital podem viabilizar um projeto otimizado para a execução de detalhes construtivos por meio da fabricação digital. Contudo, a produção do elemento cinético ainda enfrenta riscos e incertezas inerentes a um processo inovador, e que devem ser esclarecidos mediante execução de protótipo funcional.

OBJETIVOS

Conceber, desenvolver e validar experimentalmente um protótipo de elemento acústico baseado na técnica de origami e ressonadores acústicos, demonstrando capacidades de adaptação geométrica controlável ao integrar diferentes técnicas de fabricação digital.

FUNDAMENTAÇÃO

A voz humana apresenta, em tons normais de conversação, uma intensidade sonora cerca de ~54 dB(A), e, à medida em que a intensidade da voz aumenta para gritos, pode alcançar até ~84 dB. Nesta transição, o pico de intensidade sonora se desloca de 500 Hz para 1.000 Hz [14]. O déficit entre o nível de intensidade sonora admissível e o ruído de fundo pode provocar queda da inteligibilidade da fala de modo proporcional à distância entre os interlocutores, afetando negativamente a qualidade espacial e até mesmo impactando o layout do mobiliário [14].

ORIGAMIS APLICADOS À ACÚSTICA ARQUITETÔNICA

O origami, técnica tradicional japonesa baseada na arte de dobrar papel, mostra-se relevante como ferramenta na prática projetual dado o grau de abstração de potenciais elementos construtivos [8]; [15], sendo investigado em aplicações estruturais e arquitetônicas por apresentar características que os tornam particularmente adequados ao problema de correção acústica da TR.

A técnica de tesselação consiste na aplicação de dobras em uma folha única, sem cortes ou colagens, produzindo padrões geométricos repetíveis que conferem uma característica modular ao origami. As dobras também proporcionam a transformação do deste em um sistema adaptativo, que se ajusta às flutuações das condições acústicas do ambiente local (Figura 1), com potencial para robotização por meio da incorporação de atuadores mecânicos e sensores sonoros [9].

Figura 1: Câmara Ressonante em origami rígido aplicada ao condicionamento acústico, exemplificando o potencial de sistemas adaptativos. Vista geral (à esquerda), detalhe do elemento (à direita).



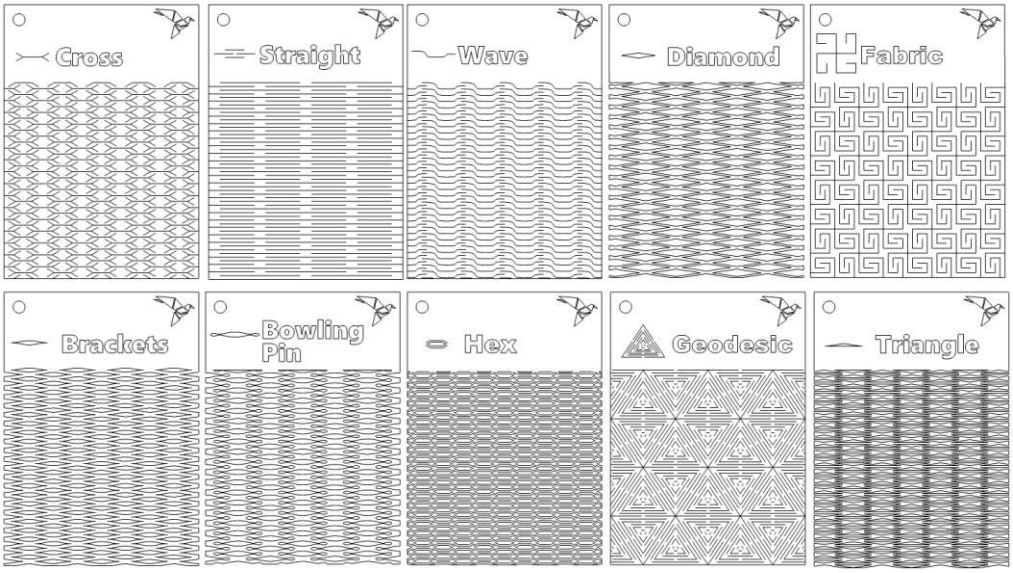
Fonte: Peter Smith (s.d) (à esquerda); rvtr (s.d) (à direita). Disponível em: <https://www.archdaily.com/227233/resonant-chamber-rvtr >. Acesso em: 03 maio 2026.

PADRÕES DE DOBRADIÇAS

As dobras requerem uma materialidade que seja resistente e durável, mas suficientemente flexível, características que variam conforme a aplicação do elemento acústico. As *living hinges*, em tradução literal dobradiças vivas ou flexíveis, configuram uma alternativa a ser investigada. Elas se caracterizam por consistirem em finas tiras do próprio material, geralmente produzidas por cortes a laser, que, ao serem aplicadas nas arestas da dobradura, conferem flexibilidade ao conjunto.

Os padrões geométricos são diversos (Figura 2) e sua escolha influencia diretamente as propriedades de flexão e consequentemente deformação do material. Dentre critérios fundamentais de desempenho estão a curvatura em uma ou duas direções, bem como a distinção entre padrões mais rígidos [17].

Figura 2: Padrões de living hinges aplicados em superfícies planas, demonstrando padrões geométricos e comportamento flexível do material.



Fonte: OBRARY (s.d.). Disponível em: <https://obrary.com/products/living-hinge-swatches>. Acesso em: 03 maio 2026.

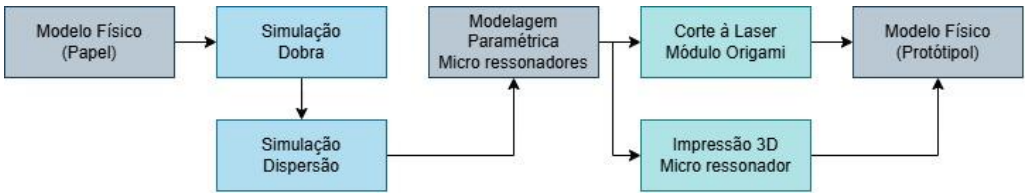
Descontinuidades geométricas que interrompam a continuidade do material, como furos e entalhes, geram concentrações de tensão, redistribuindo os esforços internos. Geometrias que apresentam transições suaves, como filetes ou curvas contínuas, tendem a reduzir a concentração de tensões, promovendo uma distribuição mais uniforme [19].

METODOLOGIA

A pesquisa possui caráter aplicado, experimental e exploratória, adotando uma abordagem predominantemente qualitativa e indutiva do ponto de vista lógico, uma vez que é baseada na geração de dados primários por meio do experimento de prototipação para compreensão dos riscos inerentes a este processo.

São compreendidas etapas de seleção e análise de padrões de origami com potencial acústico, cinemático e plástico; modelagem paramétrica com controle de variáveis geométricas; simulação computacional do efeito de dispersão dos raios acústicos; prototipagem física de módulo construtivo com técnicas de fabricação digital em escala real (Figura 3).

Figura 3: Procedimentos metodológicos da pesquisa



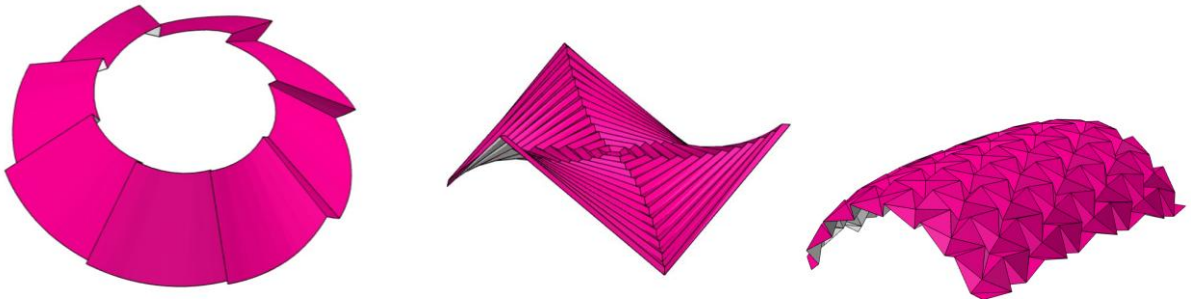
Fonte: Os autores

Desenvolvendo o experimento orientado à lógica da fabricação digital, o módulo é composto por uma fina placa a servir de corpo para o origami, recebendo padrões geométricos de dobradiças e servindo de substrato para a instalação de um micro ressonador a ser impresso em 3D em uma de suas faces.

ORIGAMI

Diferentes modelos de origami foram levantados em [8] e [20]. Três tipos foram pré-selecionados e transpostos para o ambiente de simulação física virtual, visualizando assim os estados de contração das dobraduras [20] (figura 4).

Figura 4: Seleção de modelos de origamis que foram fabricados digitalmente. São classificados como: Básico Rotativo (à esquerda), Hypar 6 pontos (ao centro) e Tesselação Triangular de Resch (à direita).

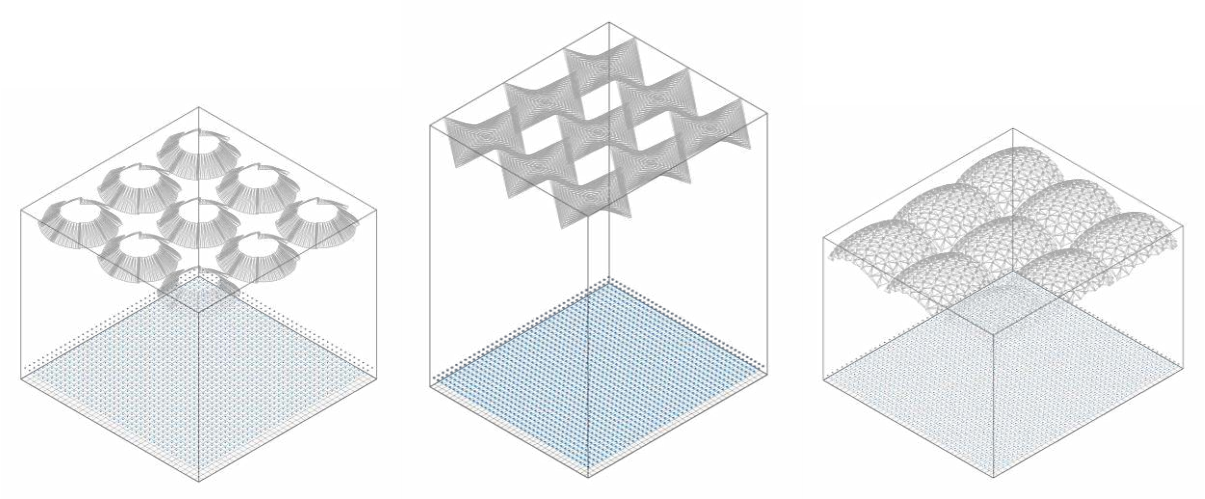


Fonte: os autores.

MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A simulação de dispersão de raios acústicos por *raytracing* foi avaliada em um ambiente digital em formato cúbico e uma matriz de 3 × 3 de módulos de painéis, com altura total de 3 metros, como na Figura 5. Neste método uma fonte emite milhares de raios sonoros que rebatem pelas superfícies do modelo de acordo com o número de reflexões solicitado nas configurações, obtendo-se o caminho detalhado percorrido por cada raio, visualizando o comportamento sonoro e as direções de espalhamento causadas pela geometria [21].

Figura 5: Volume gerado para as simulações de *Ray tracing.* Painel 01 (à esquerda), Painel 02 (ao centro) e Painel 03 (à direita).



Fonte: os autores.

Mede-se o comportamento de espalhamento do som por duas métricas complementares: a Entropia Espacial H e a Variância Circular V. A Entropia avalia a uniformidade e o caos direcional, checando se o som se distribui por igual nas diferentes zonas espaciais, o que gera uma alta entropia, em vez de focar em ângulos específicos como numa reflexão uniforme como um espelho [22]. O cálculo da métrica H usa a probabilidade dos raios aparecem em cada zona espacial, com a seguinte fórmula:

$$H = -\sum pi \cdot \ln(pi)$$

Já a Variância Circular analisa a dispersão dos raios refletidos. Considera-se um conjunto de n raios modelados incidindo sobre uma superfície, resultando em vetores unitários de saída v1, v2, ..., vn. A soma vetorial desses raios define a resultante espacial S [23], dada por:

$$S = \Sigma(i=1 \rightarrow n)\ v_i$$

A partir dessa resultante, calcula-se o comprimento do vetor médio R, que representa o grau de concentração direcional dos raios [23]:

$$R = ||S|| / n$$

Por fim, a Variância Circular V, que expressa o nível de dispersão angular dos raios refletidos [23] é determinada por:

$$V = 1.0 - R$$

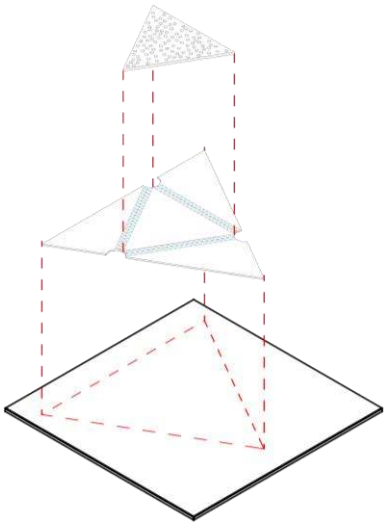
Um bom desempenho acústico apresenta tanto a Variância Circular quanto a Entropia com valor próximo a 1, demonstrando uma distribuição uniforme energética dos raios pelo espaço, evitando reflexões muito concentradas.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8817

PROTOTIPAGEM

Conduz-se a materialização do modelo selecionado para caracterizar a complexidade de fabricação, montagem e transposição formal para o domínio arquitetônico, com módulos planificados em escala real com técnicas de fabricação digital.

Figura 6: Esquema de construção do painel



Fonte: Os autores

Para atender aos critérios de propriedades mecânicas e de natureza pragmática, como disponibilidade, custo e leveza, utiliza-se o MDF de 3mm de espessura como material preferencial para corte à laser [6].

As arestas das figuras planificadas recebem padrões de dobradiças-materiais (*living hinges*) com cortes do tipo ondulado devido a sua notável flexibilidade unidirecional (Figura 7) e alto grau de integridade estrutural. Almeja-se atingir as características demonstradas na Figura 6.

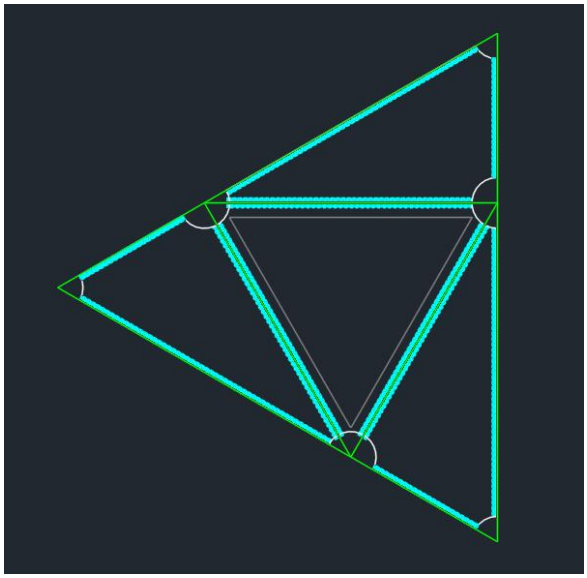
Figura 7: Padrão de living hinge com corte do tipo ondulado.



Fonte: Os autores

Considerando a unidirecionalidade do padrão de dobradiça e a impossibilidade geométrica de cruzamento entre arestas, o módulo recebeu cortes circulares nos em todos os vértices da figura planificada (Figura 8).

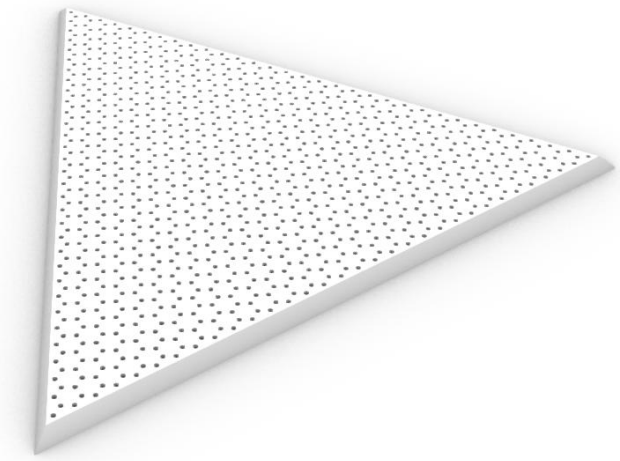
Figura 8: Padrão de living hinge com corte do tipo ondulado.



Fonte: Os autores

O microressonador fori modelado parametricamente, permitindo o controle de variáveis como profundidade das cavidades, taxa de porosidade, diâmetro dos furos, de forma a se aproximar do perfil espectral da fala humana.

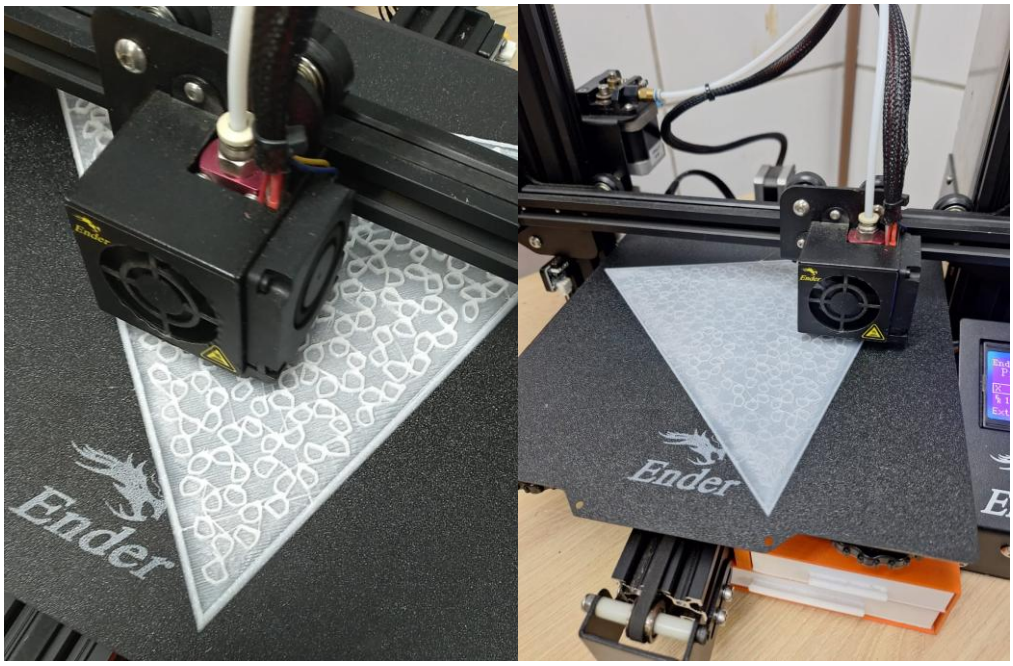
Figura 9: Modelo de ressonador de helmholtz



Fonte: Os autores

A prototipagem do módulo de micro ressonador de Helmholtz foi realizada via impressão 3D aditiva. Nesta etapa, priorizou-se a sua execução como forma de avaliar aspectos como o tempo de fabricação, a possibilidade de fixação no origami, qualidade geral da impressão e outros aspectos técnicos.

Figura 10: Impressão 3D aditiva dos ressonadores de Helmholtz



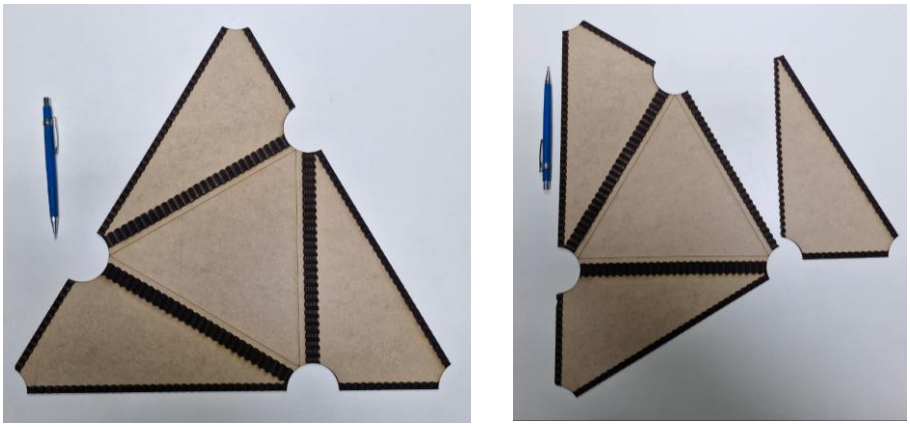
Fonte: Os autores

Avaliação multicritério da viabilidade técnico-construtiva de módulos e/ou partes do origami, considerando a cinemática das dobras por meio de padrões de dobradiças vivas, encaixe com módulos impressos 3D e da integridade estrutural do sistema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo de prototipagem visando a integração entre ressoador e origami foi necessário reduzir o tamanho deste último devido à limitação do equipamento utilizado para impressão 3d. Consequentemente, constatou-se que a dimensão reduzida da técnica *living hinge* impediu a dobradura do origami numa primeira tentativa, resultando em sua ruptura, como demonstrado na figura 11, a seguir.

Figura 11: Protótipo do módulo em 1:1



Fonte: Os autores

Paralelamente ao observado em relação ao dimensionamento, constatou-se que a potência do laser utilizado para corte exerceu forte influência no resultado. Ao queimar demasiadamente o MDF, a capacidade efetiva de dobra foi criticamente comprometida (Figura 12). Realizou-se outro corte em novo teste aumentando o espaçamento da técnica sem, contudo, melhorar a capacidade de dobra.

Figura 12: Detalhe do dimensionamento do *living hinge*



Fonte: Os autores

Concluiu-se, assim, que a melhoria na capacidade de dobra corresponde, principalmente, ao padrão geométrico da *living hinges*, cabendo maior exploração em etapas futuras devido à criticidade do parâmetro ante a absortividade do origami.

PROJETO E SIMULAÇÃO

Quadro 1: Índices de Concentração Direcional e Entropia Espacial calculados para os três modelos arquitetônicos sob diferentes ordens de reflexão.

Métrica	Modelo	2500 raios			10000 raios		
		1 Reflexão	2 Reflexão	5 Reflexão	1 Reflexão	2 Reflexão	5 Reflexão
Variância Circular	1	0,36	0,59	0,47	0,49	0,8	0,47
	2	0,48	0,92	0,79	0,56	0,97	0,84
	3	0,48	0,97	0,84	0,74	0,82	0,97
Entropia	1	0,36	0,55	0,61	0,45	0,52	0,6
	2	0,6	0,71	0,74	0,67	0,69	0,74
	3	0,59	0,89	0,92	0,89	0,88	0,94

Fonte: Os autores

Os dados do quadro 1 mostram o desempenho acústico dos três modelos de painéis em diferentes condições de simulação, considerando cenários com 2.500 e 10.000 raios e após 1, 2 e 5 reflexões. A análise foi feita a partir de dois parâmetros: a Variância Circular, que indica o quanto o som perde sua direção original, e a Entropia de

Shannon, que mostra o nível de uniformidade na distribuição da energia sonora no espaço.

Entre os modelos, o Modelo 3 apresentou o melhor desempenho, alcançando valores elevados em ambos os parâmetros (até 0,97 de Variância Circular e 0,94 de Entropia), indicando boa dispersão e distribuição do som. Já o Modelo 1 teve os piores resultados, com baixa dispersão e maior concentração de energia, caracterizando um comportamento mais próximo da reflexão direta. O Modelo 2 apresentou desempenho intermediário, com boa dispersão direcional, mas menor uniformidade na distribuição da energia quando comparado ao Modelo 3.

Importante notar que a limitação em relação às dimensões disponíveis para impressão tridimensional do ressoador são capitais para aumentar a sua capacidade de atuação frente às frequências de interesse. Ao mesmo tempo, note-se que um possível aumento na área de impressão traz consigo uma redução da área considerada não útil destinada à absorção sonora no modelo.

CONCLUSÃO

A possibilidade de integração de dobradiças vivas (*living hinges*) em sistemas de origami a um microressonador aqui investigada demonstra potencial para o controle acústico de ambientes da forma dinâmica pretendida.

A revisão da literatura associada aos primeiros passos empreendidos na prototipagem do modelo e a simulação computacional sugerem que, ao contrário dos painéis acústicos estáticos convencionais, os sistemas baseados em origami oferecem uma resposta adaptativa capaz de mitigar flutuações no tempo de reverberação e no ruído de fundo. Portanto, o desenvolvimento de tais elementos pode constituir um caminho ou alternativas para a criação de dispositivos de acústica programáveis, onde a forma e a função convergem para otimizar a experiência sonora de maneira eficiente e sustentável.

PASSOS FUTUROS

Como desdobramentos futuros desta pesquisa pretende-se avaliar os protótipos a partir de ensaios em ambiente real como forma de avaliar aspectos como a sua durabilidade e resistência de instalação e, principalmente, a eficácia acústica do sistema. O foco residirá na verificação da resposta de frequência dos ressonadores acoplados ao origami sob condições variáveis e, mais especificamente, na modificação do TR sob diferentes configurações formais do conjunto.

Para tanto, é imprescindível a realização de ajustes em relação à execução dos protótipos, que envolvem o dimensionamento da técnica do *living hinges* e a potência do laser.

A pesquisa pretende, assim, evidenciar de forma quantitativa que a capacidade de reconfiguração geométrica permite não apenas a sintonização precisa de frequências

de absorção, mas também a adaptação morfológica às exigências estéticas, funcionais, espaciais e de ocupação de espaços arquitetônicos.

DECLARAÇÃO

Os autores declaram que não utilizaram IA generativa nem tecnologias assistidas por IA no processo de preparação do manuscrito.

REFERÊNCIAS

[1] HENSEL, Michael. **Performance-Oriented Architecture:** Rethinking Architectural Design and the Built Environment. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.

[2] ABNT. NBR ISO 3382-2: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns. Rio de Janeiro, 2017.

[3] ABNT. NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados: Procedimento. Rio de Janeiro, abr. 1992.

[4] BRANDÃO, Eric. **Acústica de Salas**: Projeto e Modelagem. São Paulo: Blücher, 2016.

[5] KOLAREVIC, Branko; MALKAWI, Ali (Ed.). **Performative Architecture:** Beyond Instrumentality. New York: Spoon Press, 2005.

[6] DUNN, Nick. **Digital fabrication in architecture.** London: Laurence King Publishing, 2012. ISBN 978-1-85669- 891-7.

[7] LANG, Robert J. **Twists, Tilings, and Tessellations:** Mathematical Methods for Geometric Origami. Boca Raton: CRC Press, 2017. 704 p. ISBN 978-1-4987-3643-4

[8] JACKSON, Paul. **Técnicas de plegado para diseñadores y arquitectos.** Tradução: Jesús De Cos Pinto. Barcelona: Promopress, 2011. 224 p. ISBN 978-84-92810-21-5.

[9] YANG, Xuyou. **Adaptive acoustic origami.** 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Melbourne School of Design, The University of Melbourne, Melbourne, 2017.

[10] BISTAFA, S. R. (2006). **Acústica aplicada ao controle do ruído.** 2ed. São Paulo: Blucher, 2011.

[11] KOMKIN, A.; Mironov, M.; Bykov, A. **Sound absorption by a Helmholtz resonator.** Acoustical Physics. 2017, 63, 385–392.

[12] PAPADAKIS, Nikolaos M.; STAVROULAKIS, Georgios E. **Tunable Helmholtz Resonators Using Multiple Necks.** Micromachines, v. 14, n. 10, p. 1932, 15 out. 2023.

[13] ARVIDSSON, E., NILSSON, E., HAGBERG, D. B., & KARLSSON, O. J. I. (2020). **The Effect on Room Acoustical Parameters Using a Combination of Absorbers and Diffusers—An Experimental Study in a Classroom.** *Acoustics*, *2*(3), 505–523.

[14] RINDEL, Jens Holger. ***Restaurant acoustics*** – *Verbal communication in eating establishments*. **Acoustics in Practice**, v. 7, n. 1, jan. 2019. International e-Journal of the European Acoustics Association (EAA).

[15] DEMAINE, Erik D.; O'ROURKE, Joseph. **Geometric folding algorithms:** linkages, origami, polyhedra. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-85757-4.

[16] SMITH, Peter; RVTR. *Resonant chamber*. Disponível em: <https://www.archdaily.com/227233/resonant-chamber-rvtr>. Acesso em: 03 maio 2026.

[17] JENSEN, Matilde Bisballe; BLINDHEIM, Jørgen; STEINERT, Martin. **Prototyping shape-changing interfaces: an evaluation of living hinges' abilities to resemble organic, shape-changing interfaces.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN

(ICED17), 21., 2017, Vancouver. Proceedings... Vancouver: The University of British Columbia, 2017.

[18] OBRARY. *Living hinge swatches*. Disponível em: <https://obrary.com/products/living-hinge-swatches>. Acesso em: 03 maio 2026.

[19] BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON JR., E. Russell; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Mechanics of Materials.** 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

[20] GHASSAEI, Amanda; DEMAINE, Erik D.; GERSHENFELD, Neil. **Origami Simulator:** simulação interativa de dobraduras de papel. Disponível em: https://origamisimulator.org/ Acesso em: 23 jan. 2026. Baseado em: Amanda Ghassaei, Erik D. Demaine, Neil Gershenfeld. Fast, Interactive Origami Simulation using GPU Computation. In: Origami^{7}: Proceedings of the 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education (OSME 2018), Oxford, Inglaterra, 2018, v. 4, p. 1151–1166.

[21] **Open Research in Acoustical Science and Education**. Disponível em: <https://github.com/PachydermAcoustic>. Acesso em: 1 maio. 2026.

[22] RESTI, Luca *et al.* Spherical Acoustic Spatial Entropy: Predicting Acoustic Scene Complexity in Virtual Environments. **IEEE Open Journal of Signal Processing**, v. 7, p. 144–153, 2026.

[23] ROHATGI, Akshika; BAKULIN, Andrey; FOMEL, Sergey. Data-driven analysis of seismic phase using circular statistics. **The Leading Edge**, v. 44, n. 9, p. 683–691, 1 set. 2025.