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.v21i1.8292

Suporte à decisão em acústica arquitetônica: um sistema baseado em grafos para seleção de materiais

Decision support in architectural acoustics: a graph-based system for material selection

Bruno de Paiva y Raviolo
Universidade Christus | Fortaleza | Brasil | bruno.raviolo@unichristus.edu.br
Renan Cid Varela Leite
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza | Brasil | renancid@daud.ufc.br

Resumo

A escolha de materiais para a correção do tempo de reverberação de constitui etapa crucial da acústica arquitetônica. Apresenta-se um sistema de suporte à decisão baseado em grafos para apoiar o processo de projeto, avaliando a compatibilidade de sugestões de diferentes materiais em um estudo de caso. Os nós e arestas do grafo apresentam atributos baseados em similaridade vetorial considerando o espectro de 125 a 4.000 Hz. Operam-se buscas em largura para gerar recomendações de conjuntos de materiais e o perfil de ajuste requerido no tempo de reverberação. Análises de sensibilidade sobre os parâmetros do algoritmo de busca gulosa caracterizam o seu comportamento em diferentes situações. Os resultados incluem uma análise estatística sobre o grande volume de combinações, análises de medidas de centralidade de redes e a validade de suas recomendações.

Palavras-chave: Acústica. Processo de projeto. Grafos. Sistema de suporte à decisão. Tempo de Reverberação.

Abstract

Material selection for correcting reverberation time constitutes a crucial stage in architectural acoustics. A graph-based decision support system is presented to assist the design process, evaluating the compatibility of suggestions from different materials in a case study. The nodes and edges of the graph exhibit attributes based on vector similarity, considering the frequency spectrum from 125 to 4,000 Hz. Breadth-first searches are performed to generate recommendations for sets of materials and the required adjustment profile for reverberation time. Sensitivity analyses of the parameters of the greedy search algorithm characterize its behavior under different conditions. Results include a statistical analysis of the large volume of combinations, analyses of network centrality measures, and an assessment of the validity of the recommendations.

Keywords: Acoustics. Design process. Graphs. Decision support system. Reverberation time.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8292

INTRODUÇÃO

A acústica arquitetônica pode ser compreendida a partir de duas vertentes que se complementam: a necessária atenuação de ruídos indesejáveis provenientes de um ambiente para o outro e o condicionamento acústico de espaços internos. Definidas as características da envoltória determinantes para o isolamento acústico, o objetivo consiste, então, em promover uma distribuição sonora homogênea, evitando reflexões excessivas e muito próximas no tempo que possam comprometer a inteligibilidade dos sons.

Cessada a emissão de uma fonte sonora, ocorre um decaimento gradual na intensidade do som percebido. Tal redução depende da capacidade de absorção sonora dos materiais que revestem as superfícies deste espaço. Este fenômeno é chamado de reverberação do som e atua de forma a produzir um prolongamento em sua duração, constituindo um dos parâmetros objetivos mais relevantes na acústica arquitetônica, porém relacionado a fatores subjetivos ligados à qualidade ambiental [1][2][3][4].

O processo de projeto para correção acústica se baseia na escolha e associação de diferentes materiais em função do seu grau de adequação ao perfil do problema, bem como a ponderação entre suas áreas e eventualmente a conciliação com materiais pré-existentes, formando, para cada caso, uma alternativa de projeto potencialmente válida.

Modelos tradicionais para o cálculo do Tempo de Reverberação (TR), como Sabine ou Norris-Eyring, informam se um determinado conjunto de alternativas apresenta um TR próximo ao ideal para uma situação particular. Entretanto, estes modelos não são capazes de explorar de modo sistemático o vasto espaço de possibilidades projetuais formado pelas inúmeras combinações e eventuais restrições dos materiais.

Considerando que a exploração aprofundada deste espaço de alternativas pode levar ao aumento considerável do tempo e dos custos associados para o desenvolvimento da proposta arquitetônica, uma conhecida resposta por parte dos projetistas passa a ser a formulação de heurísticas projetuais, ou seja, a replicação de soluções típicas baseadas em restrições e validadas por experiências passadas que simplificam este processo [5]. Embora úteis enquanto atalhos projetuais, podem, por outro lado, empobrecer a etapa exploratória de concepção projetual.

Entende-se a definição de materiais e sistemas construtivos como um processo complexo, com múltiplas alternativas e critérios frequentemente conflitantes, [6] para o qual a aplicação de uma metodologia de apoio à decisão multicritério visando a seleção integrada de soluções construtivas é capaz de hierarquizar alternativas de forma sistemática, reduzindo a subjetividade do processo decisório. Ao considerar de forma simultânea o desempenho térmico, acústico e o impacto ambiental destas escolhas, é também capaz de evidenciar conflitos entre critérios de desempenho, contribuindo para o avanço de métodos analíticos aplicados ao projeto.

Em relação ao tempo de reverberação (TR) real para decaimento em 60 dB (TR60), comumente cada ambiente apresenta desvios em relação aos valores de referência normativos ao longo do espectro audível, entre 125 Hz e 4.000 Hz [6]. Tais desvios ocorrem por excesso ou insuficiência na capacidade de absorção do som por parte dos materiais. Assim, o problema não consiste apenas em aumentar ou reduzir a absorção sonora, mas em corrigir, de maneira seletiva, o perfil espectral do TR, de modo que o desvio em cada banda se aproxime de zero a partir da composição resultante de diferentes materiais e dispositivos.

Sob essa perspectiva, uma proposta de condicionamento acústico pode ser formulada enquanto um problema de correção espectral: dado um vetor que representa o desvio atual do TR60 por banda de frequência, busca-se associar materiais para formular um conjunto cuja resposta acústica atue prioritariamente nas faixas de frequência onde o erro é mais significativo. Tal formulação permite, portanto, tratar o problema de forma compatível com métodos matemáticos de similaridade baseada em cosseno de vetores, otimização e análise relacional.

OBJETIVO

Avaliar a aplicabilidade de um sistema de suporte à decisão baseado em grafos para definição dos materiais de revestimento acústicos e adequação ao tempo de reverberação a partir de uma lista de opções.

METODOLOGIA

Esta pesquisa adota o delineamento da *Design Science Research (*DSR), cujo objetivo é a criação e avaliação de artefatos para a resolução de problemas práticos relacionados ao campo de projeto. O artefato proposto consiste em um sistema de suporte à decisão baseado em teoria dos grafos para otimização da escolha de materiais em acústica arquitetônica, cujo desenvolvendo obedeceu a uma linha estruturada em quatro etapas principais:

- Diagnóstico do problema, com a identificação das limitações empíricas e metodológicas no processo de seleção e combinação de materiais para a correção do tempo de reverberação, fundamentada na experiência acumulada na prática profissional com projetos acústicos reais;
- Desenvolvimento do artefato, que abarca a modelagem matemática dos vetores de absorção e estruturação do grafo de similaridade e complementariedade;
- Implementação do algoritmo, desembocando na aplicação da heurística de busca gulosa para geração de combinações;
- Avaliação prática, que por fim é a condução de um estudo de caso experimental em um auditório acadêmico para validação das recomendações e análise de sensibilidade dos parâmetros.

Para guiar todo o desenvolvimento do artefato, adotou-se como objeto central dos testes um auditório situado em uma Instituição pública de Ensino Superior, habilitando assim a possibilidade de aplicação do sistema e retroalimentação do seu processo de informação e construção. O espaço apresenta 52,5 m² de área, volume de ar de 128 m³, aproximadamente, e 53 lugares. O ambiente possui esquadrias em alumínio e vidro protegidas por persianas, porta em madeira, piso em carpete a ser removido, paredes em reboco liso e forro em placas de gesso. As atividades ali desenvolvidas são palestras e seminários, tendo o tempo de reverberação ideal calculado em 0,45s. No entorno não foram identificadas fontes de ruído que comprometam o isolamento acústico da sala.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8292

Figura 1: Imagens internas do auditório



Nota: Fonte: os autores.

O procedimento padrão para diagnóstico da TR60 dos ambientes utiliza o modelo de Sabine [6]. Com a obtenção dos tempos discriminados pelas bandas acústicas de 125 a 4.000 Hz, é construído um vetor $TR60_{alvo}$ com seis componentes escalares.

$$\Delta TR_{60} = \left(\Delta TR_{60,125}, \Delta TR_{60,250}, \Delta TR_{60,500}, \Delta TR_{60,1000}, \Delta TR_{60,2000}, \Delta TR_{60,4000}\right)^T$$

Este vetor é formado pelo déficit no tempo requerido para a correção da TR nas seis bandas do espectro acústico de um dado ambiente.

CONSTRUÇÃO DO GRAFO

A partir de uma lista com diferentes materiais, compilada a partir de diversas fontes bibliográficas entre normas técnicas [6] publicações científicas [3], [7], [8] e [9] e informações de fabricantes, reuniu-se cerca de trezentas opções entre revestimentos para pisos, paredes, teto e mobiliário, com coeficientes de absorção entre 125 Hz e 4.000 Hz. Para cada material *m* é calculado um vetor $\alpha^{(m)}$, composto por seus coeficientes de absorção.

$$\alpha^{(m)} = (\alpha_{125}, \alpha_{250}, \alpha_{500}, \alpha_{1000}, \alpha_{2000}, \alpha_{4000})^T$$

com

$$\alpha^{(m)} \in [0,1]^6$$

Cada material dá origem a um nó ao qual é atribuída a propriedade de Adequação, uma medida de similaridade de cosseno entre o vetor $TR60_{alvo}$ e o vetor $\alpha^{(m)}$, no que segue na Equação 1, que afere a semelhança do perfil espectral que um dado material apresenta com aquela requerida pelo problema.

Equação 1: Similaridade de cosseno entre dois vetores

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}}$$

Analogamente, entende-se a semelhança como o alinhamento nas direções apontadas pelos vetores em um espaço de seis dimensões. Fisicamente, admite-se apenas um valor que varia entre 0, atribuído a vetores com direções completamente distintas e perfis espectrais dissimilares; até 1, para vetores perfeitamente alinhados. Para selecionar somente aqueles materiais que demonstram utilidade prática devido a uma

elevada absortância e assim excluir os demais, é incorporado um fator de ponderação *k* da intensidade do vetor, penalizando aqueles alinhados, mas pouco absorventes.

Equação 2: Ponderação da Adequação

$$A\left(\alpha^{(m)}\right) = \cos(\theta) \cdot W\left(\left|\left|\alpha^{(m)}\right|\right|, k\right)$$

Arestas adirecionais são criadas para todos os pares de nós, às quais é atribuída a propriedade de Complementariedade, representando o ganho de similaridade do vetor resultante de um dado par de materiais em relação ao vetor ΔTR_{60}, ou seja, se a combinação dos materiais está mais bem alinhada com o perfil espectral necessário.

Para restringir o espaço de exploração das combinações a um subgrafo que reúna apenas os nós e as arestas mais significativas, sem prejuízo às potenciais combinações sinergéticas, dois procedimentos são aplicados: Excluem-se materiais que correspondem à parcela dos 25% menos adequados, definindo um valor mínimo de Adequação, e em seguida removem-se arestas cujo valor de Complementariedade esteja abaixo de um limiar, retirando combinações potencialmente pouco adequadas.

A representação em grafo proposta estabelece uma rede onde cada aresta codifica o potencial sinergético entre pares de materiais acústicos. Esta estrutura é sempre produto das características espectrais do problema de projeto. Nesta formulação, as arestas não representam apenas compatibilidade, mas traçam caminhos para sequências de materiais cujos perfis espectrais se complementam.

HEURÍSTICA DE BUSCA GULOSA

Para garantia de uma exploração sistemática do espaço de possibilidades projetuais, utiliza-se um algoritmo guloso para realizar uma busca em largura do grafo, cuja heurística consiste na busca a partir dos ***N*** nó raíz com maior Adequação ponderada por uma medida de centralidade a partir de um parâmetro λ, explorando recursivamente as ***L*** arestas de maior complementariedade disponíveis, até uma profundidade ***P***, e a cada nível ***k*** adicionando todas as alternativas exploradas como conjunto de materiais aptos, considerando o caminho percorrido desde os nós-folha no nível k até os nós raízes. O algoritmo pode retornar teoricamente uma quantidade de combinações no que segue a Equação 3:

Equação 3: Quantidade de combinações

$$\sum_{k=0}^{P-1} N \cdot C^k$$

MEDIDAS DE CENTRALIDADE

Medidas de centralidade revelam propriedades estruturais de redes que buscam quantificar a importância estratégica de cada material no contexto do problema [9] [10].

Grau: Mede diretamente a soma das Complementariedades das conexões de um material, determinando sua versatilidade apenas por efeitos de primeira ordem, ou seja, vizinhança imediata. Um material com alta centralidade de grau ponderada não só se combina com muitas opções, como também forma sinergias espectralmente fortes com elas.

Autovetor: Indica materiais fortemente complementares a outros materiais também fortemente complem'entares, que emergem como escolhas estratégicas na formação de conjuntos de materiais por estarem a uma curta distância de outros materiais estratégicos. Um material pode ter Adequação individual moderada, mas se está rodeado por vizinhos com altas Complementariedades mútuas, sua posição na rede o torna uma escolha catalisadora por abrir múltiplos c aminhos promissores.

VARREDURA E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Realizou-se uma varredura dos parâmetros conforme tabela abaixo, com posterior análise de sensibilidade por meio de um Random Forest. Para evitar vieses durante a comparação devido à desproporcionalidade entre o tamanho das amostras, um recorte foi estabelecido para os 200 primeiros melhores conjuntos formulados para cada instância da busca.

Tabela 1: Parâmetros da varredura da busca

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Resolução
N - Quantidade de nós raízes	10	100	10
L - Largura	1	5	1
P - Profundidade	1	5	1
λ - (Ponderação Adequação/Autovetor)	0,1	1	0,1

Fonte: os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão os resultados obtidos referentes ao auditório apresentado (Figura 1). O diagnóstico acústico verificou severa deficiência generalizada, especialmente nas baixas freqüências (Tabela 2).

Tabela 2: TR da situação

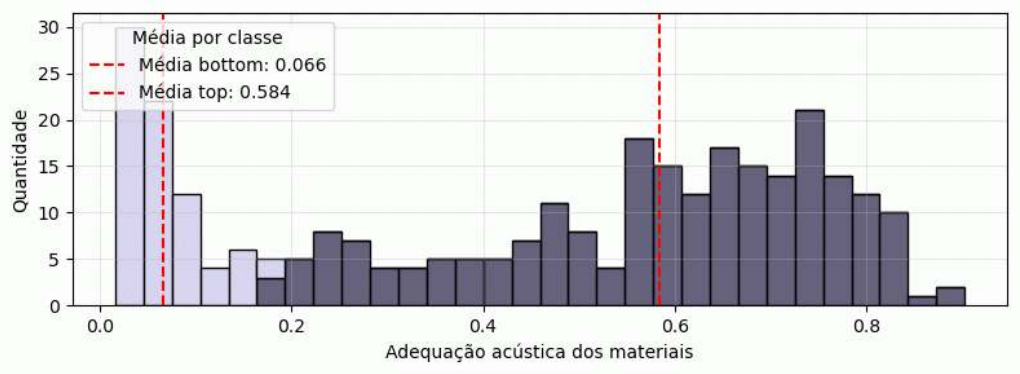
Banda de oitava (Hz)	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
TR_{60} Ideal (s)	0,675	0,5175	0,45	0,45	0,45	0,45
TR_{60} Diagnóstico (s)	1,712	1,191	0,740	0,595	0,517	0,504
Δ TR_{60} (s)	**1,037**	**0,673**	**0,290**	**0,145**	**0,067**	**0,054**

Fonte: os autores.

CONSTRUÇÃO DO GRAFO

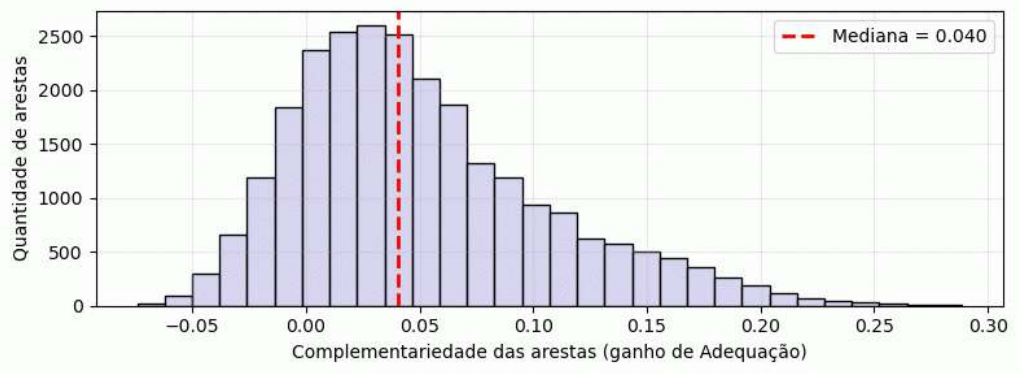
Com os procedimentos adotados houve redução das 25.561 arestas à 8.148 (31,7%) e permanência dos 277 nós (FIguras 2, 3, e 4).

Figura 2: Histograma do valor de Adequação dos nós pertencentes ao grafo completo



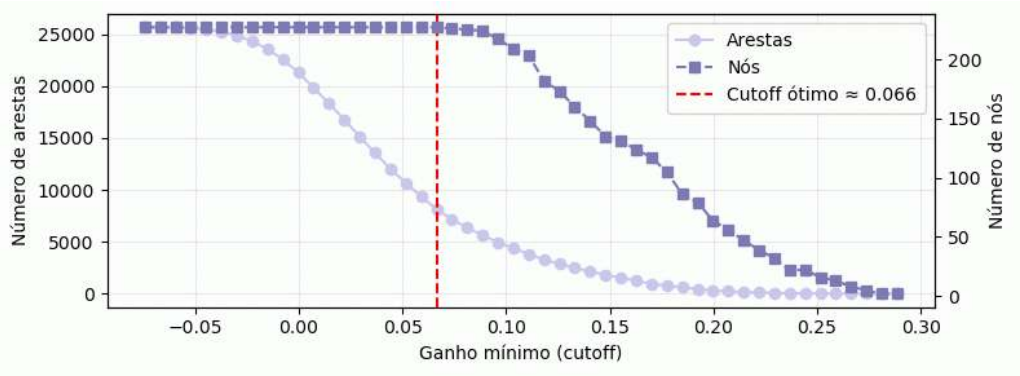
Nota: Categorização em função da separação em 1º quartil (25%) e demais nós restantes. Fonte: os autores.

Figura 3: Histograma do valor de Complementariedade das arestas pertencentes ao grafo completo



Fonte: os autores.

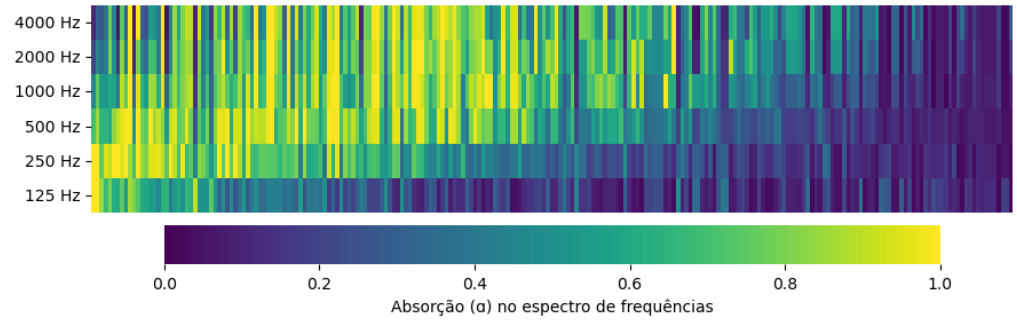
Figura 4: Análise do valor de *cutoff* ideal



Fonte: os autores.

A ordenação dos materiais em função de sua similaridade ao vetor do problema acústico (Figura 5) demonstrou o predomínio de soluções industrializadas que enfatizaram absorção nas baixas freqüências, e, portanto, se mostram mais adequadas (Tabela 3).

Figura 5: Heatmap dos materiais acústicos ordenados



Nota: Materiais com similaridade máxima à esquerda, e mínima à direita. Fonte: os autores.

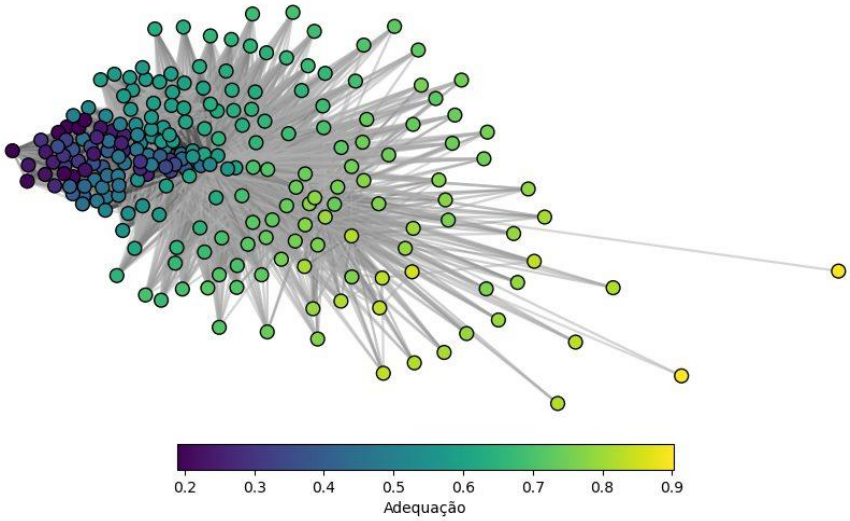
Tabela 3: Materiais mais similares à forma espectral

Material	cos(θ)
FORRO/REVESTIMENTO NEXACUSTIC DOT 1616 PLENUM 200mm + lã 50mm	0.9024
FORRO/REVESTIMENTO NEXACUSTIC LINES PLENUM 200mm + LÃ 50mm	0.8941
FORRO/REVESTIMENTO NEXACUSTIC SQUARE PLENUM 200mm + LÃ 50mm	0.8527
PAINEL NEXACUSTIC 40 PLENUM 200mm + MANTA LÃ 50mm	0.8378
PLACA DE FIBRA MAD. HERADESIGN MACRO KNAUF 25mm C/ BASE ACÚSTICA	0.8358

Fonte: os autores.

No grafo constituído é visível que poucos materiais apresentam alta Adequação (~0,9) e que pela consequente baixa Complementariedade com os demais, estabelecem poucas relações significativas (Figura 6).

Figura 6: Subgrafo de Adequação



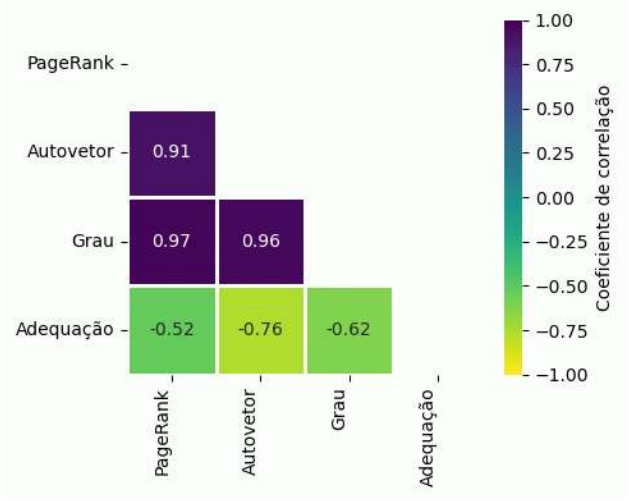
Fonte: os autores.

MEDIDAS DE CENTRALIDADE

A matriz da Figura 7 apresenta a correlação entre Adequação e medidas de centralidade utilizando o coeficiente de Pearson, constatando neste estudo que, para Grau, é estabelecida uma forte correlação negativa (–0,62), uma vez que materiais já muito adequados tendem apresentar arestas com pouco ganho de Complementariedade, sendo estas removidas. A centralidade autovetor, por sua vez,

apresenta forte correlação positiva com o Grau dos nós (0,96) e forte correlação negativa em relação à Adequação (–0,76), explicada, também, pela quantidade de arestas reduzidas de materiais que já apresentam alta Adequação.

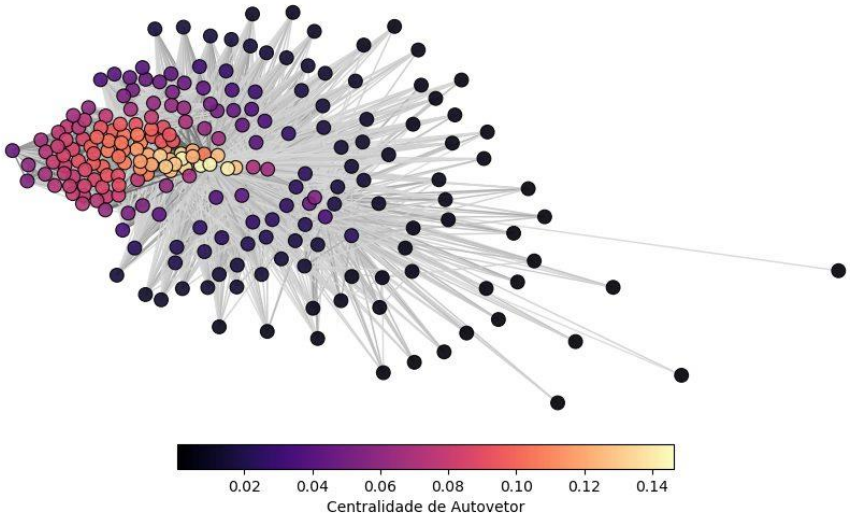
Figura 7: Matriz de medidas de centralidade



Fonte: os autores.

A ponderação equilibrada entre Adequação (Figura 6) e Autovetor (Figura 8) determinará materiais que tenham valores reduzido da primeira, mas mais bem conectados com os demais, favorecendo a diversidade e qualidade de combinações possíveis, deslocando os nós raízes para regiões mais adensadas do subgrafo.

Figura 8: Subgrafo da centralidade de Autovetor



Fonte: os autores.

VARREDURA E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Os resultados da varredura a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 1 revelam que, para o grafo encontrado com maior adequação média apresentada (0.8611), os respectivos valores das medianas e modas para os parâmetros são os que seguem na

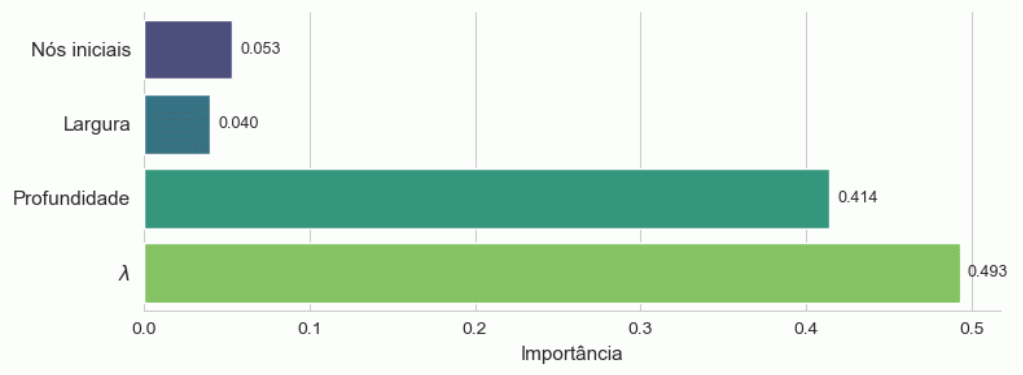
Tabela 4. A análise de sensibilidade conduzida indica a importância de λ e da profundidade de busca (P) como principais parâmetros (Figura 9).

Tabela 4: Medidas de tendencia central para o grupo com maior similaridade média

	N	L	P	λ
Mediana	70	3	4	0,6
Moda	100	5	5	1,0

Fonte: os autores.

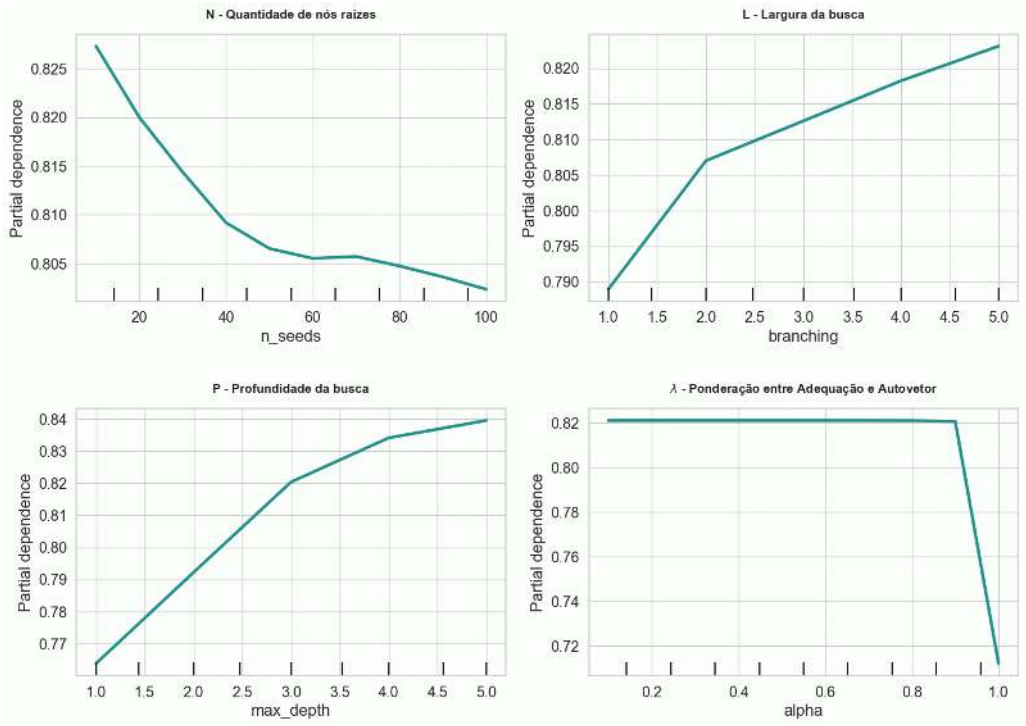
Figura 9: Análise de sensibilidade das variáveis dependentes por meio do Random Forest



Fonte: os autores.

Estudos de influência marginal (Figura 10) demonstram o colapso da Adequação média quando o autovetor não é incorporado na busca gulosa (λ = 1). Também influenciam negativamente a quantidade crescente de nós-raízes (n → 100). Largura (L) e Profundidade (P) apresentam correlação positiva não-monotônica, com desaceleração do incremento de adequação, o que indica que os maiores ganhos de Adequação se concentram nos valores intermediários destes parâmetros.

Figura 10: Análise de dependência dos parâmetros por meio do Random Forest

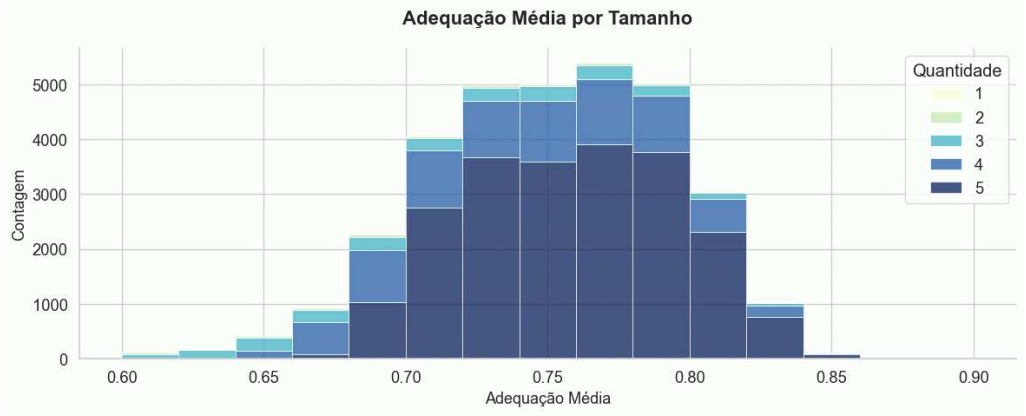


Fonte: os autores.

PRODUÇÃO DOS CONJUNTOS DE MATERIAIS

Os parâmetros da busca seguiram as medianas apresentadas previamente na Tabela 3, produzindo uma lista contendo 32.745 combinações únicas, com o histograma de Adequação destas (Figura 11).

Figura 11: Histograma de adequação das composições



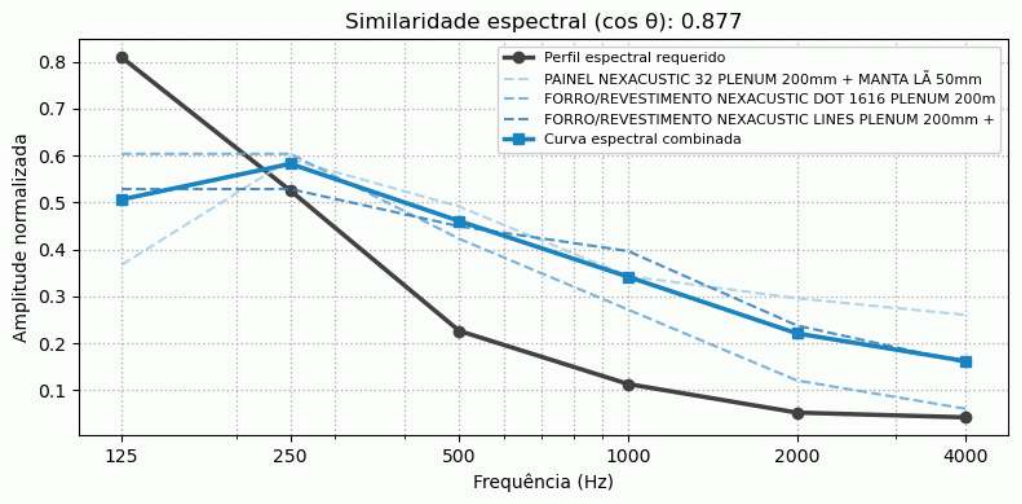
Fonte: os autores.

A correlação entre quantidade de materiais e adequação média é moderadamente positiva (Pearson 0,377 e Spearman 0,242), denotando que a quantidade de materiais que integram os conjuntos é um fator a ser considerado na obtenção de um perfil espectral próximo ao requisito de projeto, ao lado dos seus valores de Adequação.

As composições são avaliadas com os perfils de absorção de cada material componente, o perfil resultante, e a comparação com o ajuste requerido no tempo de reverberação do ambiente diagnosticado previamente (Figura 12).

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8292

Figura 12: Exemplo de composição



Fonte: os autores.

A busca também é capaz de informar os materiais com maior ocorrência nas soluções mais bem colocadas (Tabela 5).

Tabela 5: Materiais mais populares na busca

Material	Quntd.
FORRO/REVESTIMENTO NEXACUSTIC DOT 1616 PLENUM 200mm + lã 50mm	172
FORRO/REVESTIMENTO NEXACUSTIC LINES PLENUM 200mm + LÃ 50mm	130
FORRO/REVESTIMENTO NEXACUSTIC DOT 3232 PLENUM 200mm + lã 50mm	108
FIBRA DE VIDRO, DE 100 mm, SOBRE PAREDE	102
FORRO/REVESTIMENTO NEXACUSTIC SQUARE PLENUM 200mm + LÃ 50mm	90

Fonte: os autores.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir de estudos de sensibilidade e de correlação entre o índice de Adequação e diferentes medidas de centralidade, foi possível identificar conjuntos de materiais a partir da relevância estrutural dos materiais dentro do grafo. Ainda, a interpretação destes resultados sugere para um importante, embora pequeno, conjunto de materiais com elevado autovetor e moderada adequação que são excluídos dos nós raízes, especialmente quando estes são pouco numerosos. Essa lista mais reduzida reúne materiais que expressaram grande potencial para a formação de conjuntos de alta adequação e, portanto, interessantes para resolver o problema.

Materiais com adequação média de 0,8611, ou seja, com desempenho significativamente superior, os torna especialmente indicados para aplicação nas superfícies do teto e parede, sendo, então, avaliados como possíveis elementos a serem especificados. Para o estudo de caso, observou-se que há predominância de soluções industrializadas isoladas para absorção em baixa freqüência, que é justificado na literatura pela maior dificuldade de se prover soluções artesanais.

Identificou-se pares de materiais que apresentam alto valor de Complementariedade, apontando para combinações de materiais relevantes ao projeto, mesmo com baixo grau de industrialização e menor valor de Adequação individual. Tais pares podem

constituir alternativas viáveis ao projeto considerando contextos de execução de sistemas acústicos artesanais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se a capacidade do sistema baseado em grafos de constituir um instrumento de apoio eficaz para a seleção mais assertiva de materiais de revestimento, auxiliando o projetista na definição do tempo de reverberação adequado a ambientes, com clara capacidade de integração à etapa de síntese projetual.

Ao organizar e hierarquizar as alternativas em função da capacidade de absorção sonora, contribuindo para adequação do tempo de reverberação a valores de referência, o método permitiu identificar, de forma rápida, os materiais com maior capacidade de atendimento às exigências acústicas específicas ao perfil espectral do auditório utilizado como estudo de caso, reduzindo a complexidade do processo decisório e expandido o repertório técnico do projetista.

As implicações para o processo de projeto abarcam a ampliação do repertório de materiais, enfatizando o papel como curador de um subconjunto mais restrito e direcionado de soluções técnicas com maior capacidade de resposta ao problema acústico. Colateralmente, a economia de tempo pode ser convertida em uma maior dedicação a aspectos compositivos, com exploração do espaço de possibiliddes projetuais.

PASSOS FUTUROS

Propõe-se adaptação do método a grafos tripartites, com tipos de nós referentes a pisos, paredes e tetos, dado o maior controle sobre a formulação das combinações. A relação de Complementariedade passará a ser uma medida de similaridade para redução da redundância espectral baseada no coeficiente de similaridade Kendall-tau e Spearman ponderados por bandas acústicas ordenadas. Investigação aprofundada sobre demais medidas de centralidade nas distribuições de adequação das combinações geradas, em particular comparando Autovetor a PageRank, com aplicação de medidas de similaridades entre listas. Emprego da técnica de Programação Linear para obtenção das proporções ótimas entre os materiais os conjuntos sugeridos, aumentando a Adequação final ao passo em que a determinação proporção também ocorrerá em função da minimização de custos a serem atribuídos a cada componente material.

DECLARAÇÃO

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

REFERÊNCIAS

[1] VALLE, S. **Manual Prático de Acústica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2009.

[2] CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica.** Brasília: Thesaurus, 2010.

[3] BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

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

[5] LAWSON, Bryan. **How designers think:** the design process demystified. 4. ed. London: Routledge, 2005.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179:** Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992.

[7] SANTOS, P. C.; ALUCCI, M. P. **BD Acústica v. 1.2.** São Paulo: LABAUT/FAU/USP, 2003. Disponível em: http://www.usp.br/fau/pesquisa_sn/laboratorios/labaut/conforto/conforto.html. Acesso em: 10 abr. 2026.

[8] ERMANN, M. A. **Architectural Acoustics Illustrated.** Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015. ISBN 978-1-118-56849-1

[9] NEWMAN, Mark. **Networks:** an introduction. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 2010. 784 p. ISBN 978-0-19-920665-0.

[10] BONDI, J. A.; MURTY, U. S. R. **Graph theory.** London: Springer, 2008. (Graduate Texts in Mathematics, v. 244). ISBN 978-1-84628-969-9. DOI: 10.1007/978-1-84628-970-5