

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

O Laboratório de Acústica das Comunicações (LAC-Unicamp)

Abreu, D. H. S.¹; Masiero, B. S.²

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil,

¹ douglashsabreu@gmail.com, ² masiero@unicamp.br

Resumo

O campo da captação e reprodução de áudio espacial tem apresentado constante evolução, mais recentemente motivado por aplicações em realidade virtual (VR, *Virtual Reality*) e realidade aumentada (AR, *Augmented Reality*). Com o intuito de contribuir com o desenvolvimento destas novas tecnologias de áudio no Brasil, o Laboratório de Acústica das Comunicações (LAC) está sendo instalado na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) com apoio da FAPESP. Para tanto, foram adquiridos sistemas modernos de captação e reprodução de áudio espacial, dispondo de um arranjo esférico rígido com 64 microfones e um manequim para captação binaural, que permitem a captura de cenas sonoras para serem utilizadas em pesquisa de áudio imersivo. A reprodução do áudio imersivo poderá ser feita através de um arranjo de alto-falantes composto por 16 monitores de alta-fidelidade sonora ou por fones-de-ouvido de referência equipados com rastreador de movimento de seis graus de liberdade. O arranjo de alto-falantes permite efetuar a síntese e reprodução de diversas técnicas de áudio espacial, desde as mais básicas como mono e estéreo, até técnicas como VBAP e Ambisonics de terceira ordem. Afora os equipamentos de captação e reprodução, também estão disponíveis sensores de referência como microfones e sonda de intensidade PU (capaz de medir simultaneamente a pressão sonora e a velocidade de partículas). Para abrigar estes sistemas, será construída uma sala de escuta crítica (SEC) de acordo com as recomendações internacionais ITU-R BS.1116-3 que irá permitir, além de pesquisa em VR/AR, novas pesquisas em psicoacústica, localização binaural, audiologia e outras áreas correlatas à acústica das comunicações. Este artigo tem como objetivo apresentar o projeto da SEC e os equipamentos e ferramentas que equipam o laboratório.

Palavras-chave: projeto, sala escuta crítica, equipamento multiusuário.

PACS: 43.55.Pe; 43.55.Fw; 43.60.Fg.

The Communication Acoustics Lab (LAC-Unicamp)

Abstract

The field of spatial audio recording and reproduction has been constantly evolving, more recently motivated by applications in virtual reality (VR) and augmented reality (AR). In order to contribute to the development of these new audio technologies in Brazil, the Communication Acoustics Laboratory (LAC) is being established at the State University of Campinas (Unicamp) with the support of FAPESP. To this end, modern audio capture and reproduction systems were acquired, namely a rigid spherical array with 64 microphones and a dummy head for binaural capture, both of which allowing the capture of sound scenes to be used in immersive audio research. Immersive audio can be reproduced through a loudspeaker array composed of 16 high fidelity sound monitors or by reference headphones equipped with a motion tracker with six degrees of freedom. This loudspeaker array allows for the synthesis and reproduction of various spatial audio techniques, from the most basic ones such as mono and stereo, to techniques such as VBAP and third-order Ambisonics. In addition to recording and reproduction equipment, reference sensors such as microphones and a PU intensity probe (capable of simultaneously measuring sound pressure and particle velocity) are also available. To house all these equipment, a critical listening room will be built in accordance with international recommendation ITU-R BS.1116-3, which will allow, in addition to VR/AR, research to be conducted in psychoacoustics, binaural localization, audiology and other areas related to communications acoustics. This article aims to present the project of the listening room and the equipment and tools that will equip the laboratory.

Keywords: design, listening room, collaborative equipment.



1. INTRODUÇÃO

A Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) é uma instituição com tradição consolidada de pesquisa e, na área de acústica, conta com grupos atuando em acústica de salas, conforto acústico, controle sonoro e de vibração e desenvolvimento de metamateriais. Em 2018, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) concedeu um auxílio Jovem Pesquisador com o objetivo de fomentar uma nova linha de pesquisa em “acústica das comunicações” dentro da Unicamp. Esta linha de pesquisa, conhecida em inglês por *Communication Acoustics*, foi descrita por um dos pioneiros desta área da seguinte maneira:

“Communication Acoustics deals with those areas of acoustics which relate to the modern communication and information sciences and technologies.”

Blauert, J., *Communication Acoustics*, 2005 [1]. Ou seja, a acústica das comunicações é uma sub-área da acústica com interface com áreas tipicamente pertencentes à Engenharia Elétrica (como as ciências da comunicação e informação, processamento de sinais e eletroacústica), portanto, bastante distinta das linhas de pesquisa relacionadas a acústica conduzidas na Unicamp até então.

No centro do desenvolvimento desta nova linha de pesquisa está a criação de um novo laboratório, denominado de **Laboratório de Acústica das Comunicações (LAC)**. O propósito inicial do LAC é permitir pesquisa sobre análise e síntese de cenas sonoras. Do lado da análise, o objetivo é identificar, localizar e separar os objetos sonoros que compõem a cena. Já do lado da síntese, o objetivo é recriar a cena audível, permitindo que objetos sonoros possam ser “misturados” de forma a compor, com diferentes graus de refinamento, a cena audível desejada.

Existem duas formas principais de reprodução de áudio imersivo: via arranjo de alto-falantes ou via fones-de-ouvido. E na reprodução por alto-falantes existem diversos paradigmas já consolidados para a determinação dos sinais enviados para cada elemento do arranjo [2]. Um dos objetivos do LAC é permitir avaliar o grau de imersão proporcionado por alguns destes sistemas. No entanto, para isso é necessário que a sala onde o arranjo esteja instalado tenha pouca influência sobre o som

irradiado pelos falantes. A *International Telecommunication Union* (ITU), traz recomendações para as chamadas **salas de escuta crítica** ou **salas de audição crítica** [3].

Portanto, além da aquisição de equipamentos de gravação e reprodução de áudio imersivo, o projeto do LAC também previa a viabilização de uma sala para abrigar um arranjo de alto-falantes. No decorrer deste artigo iremos apresentar os equipamentos adquiridos para equipar o novo laboratório, elencando suas características e discutindo possibilidades de pesquisa e desenvolvimento associados a eles. Em seguida, será apresentado o projeto da nova sala de escuta crítica que está sendo construída para permitir os mais variados testes em condição de baixo nível de ruído e reverberação.

2. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Um dos pontos mais importantes para um laboratório de pesquisa e desenvolvimentos de novas tecnologias é possuir equipamentos considerados como referência dentro de sua área de aplicação. Os principais equipamentos disponíveis no LAC podem ser divididos em três categorias: equipamentos para aquisição de sinais acústicos, equipamentos de reprodução sonora e equipamentos para processamento de sinais.

2.1 Aquisição de sinais acústicos

Para todas atividades que envolvem aquisição de sinais acústicos, sejam elas a gravação binaural, a gravação com arranjos ou a gravação com sondas de intensidade, é sempre importante poder comparar os resultados medidos com medições de referência. Estas medições de referência são feitas usando-se um microfone de referência, um microfone de alta precisão com resposta em frequência plana em praticamente toda a faixa de frequências de interesse.

O LAC possui dois microfones condensadores de referência, modelo *PCB PIEZOTRONICS 377B02*, que possuem uma faixa de frequência de 3,15 a 20000 Hz com variação máxima de ± 2 dB e de 5 a 10000 Hz com variação máxima de ± 1 dB.

Para garantir que o microfone de referência está mesmo fornecendo valores corretos de nível de

pressão sonora, é preciso calibrar o microfone. Para isso usa-se um *pistonfone*, ou calibrador de microfone, que fornece um valor de pressão sonora constante usado na calibração do microfone de referência. Para realizar a calibração o laboratório possui o calibrador Larson Davis CAL200, compatível com as normas ANSI S1.40, IEC 60942:2017 & IEC 60942:2003 *Class 1*. Este equipamento pode fornecer um nível de saída de 94 ou 114 dB (selecionável por chave) para a frequência de 1 kHz.

Diferente dos microfones tradicionais e de arranjos de microfones, o LAC também possui uma sonda de intensidade sonora tipo PU da fabricante Microflow. É a primeira sonda do mundo a medir fisicamente a pressão sonora e a velocidade das partículas no mesmo ponto [4]. Possui apenas um microfone acompanhado de um anemômetro que funciona como um sensor de velocidade de partícula, medindo, portanto, pressão sonora e velocidade das partículas no mesmo ponto de um campo sonoro. Este arranjo também permite a medição direta da intensidade acústica em uma dada direção, que pode ser usado como referência e auxílio para localização e separação de objetos sonoros.

Além dos microfones de referência, quatro microfones miniatura tipo MKE2 da Sennheiser também fazem parte do conjunto equipamentos do laboratório. Quando colocados na entrada do canal auditivo do usuário, estes microfones miniatura podem ser utilizados para a equalização individualizada de fones de ouvido e também para a medição da *Head-Related Transfer Function* (HRTF) individual.

A gravação de um som com um único microfone é equivalente a dizer que a onda sonora de interesse foi amostrada em um único ponto do espaço. Se quisermos ter mais informação sobre a distribuição espacial do som, se faz necessário amostrar o espaço em mais pontos, ou seja, usar mais microfones [5]. O LAC possui dois arranjos bastante distintos.

O primeiro é o manequim fabricado pela HEAD Acoustics, modelo HSU III.2 [6], que é uma cabeça artificial com microfones ICP para gravações binaurais com precisão auditiva. O HSU III.2 permite realizar gravações que incluem pistas mono-

e binaurais, responsáveis pela percepção espacial da audição humana.

Quando se trata de captura de cenas sonoras espaciais, sempre entra em foco os arranjos de microfones e o processamento baseado em harmônicos esféricos. O segundo arranjo disponível no LAC é um arranjo esférico rígido com 64 microfones, fabricado pela VisiSonics e capaz de capturar cenas sonoras complexas em formato Ambisonics até sétima ordem. O modelo em questão é uma versão do *5/64 Audio Visual Camera* contendo apenas os 64 microfones [7].

2.2 Reprodução sonora

Passamos agora da aquisição de sinais acústicos para o outro extremo da cadeia, a reprodução da cena audível no ambiente de escuta do usuário. Os objetos sonoros previamente gravados ou sintetizados devem agora ser “misturados” de forma a compor — com diferentes graus de refinamento — a cena audível original, garantindo assim a qualidade e o senso de imersão da reprodução.

Existem duas formas principais de reprodução de áudio imersivo: via arranjo de alto-falantes ou via fones-de-ouvido. E na reprodução por alto-falantes existem diversos paradigmas já consolidados para a determinação dos sinais enviados para cada elemento do arranjo [2].

Ao se tratar da reprodução via fones de ouvido, é esperado que os fones de reprodução binaural sejam abertos, assim minimizando os problemas de acoplamento do fone com o canal auditivo [8]. O laboratório possui 4 fones-de-ouvido de alta fidelidade da Sennheiser, modelo HD650, que permitem pesquisar sistemas dinâmicos de reprodução binaural, por meio da reprodução de sons auralizados por estes fones. Eles também podem ser acoplados a sistemas de rastreamento, que são uma ferramenta essencial para um sistema de conversão Ambisonics/Binaural em tempo real. E assim, foi adquirido pelo LAC um rastreador comercial Hillcrest BNO 080.

Outro objetivo do laboratório é pesquisar sistemas de reprodução espacial por arranjos de alto-falantes. Para atingir este objetivo, é necessário construir um arranjo para realização de testes. Este arranjo será montado na sala de escuta crítica (SEC) — descrita na Seção 3 — e será composto



Figura 1: Sala provisória onde foi instalado o arranjo de 16 alto-falantes, em conjunto com o arranjo de 64 microfones VisiSonics e a HSI III.2.

por 16 alto-falantes ativos tipo monitor de estúdio da marca Genelec, modelo 8020C.

Devido à demanda de tempo para a construção da SEC, o arranjo esférico de alto-falantes foi instalado em uma sala provisória, assim permitindo serem utilizados em experimentos e demonstrações de reprodução sonora espacial. A Figura 1 apresenta os monitores em conjunto com o arranjo esférico e o manequim previamente descritos.

2.3 Processamento de sinais

Para trabalhar com sinais acústicos é demandado um grande poder de processamento. Assim, faz-se necessário o uso de interfaces de áudio robustas e computadores que apresentem grande poder de processamento.

O arranjo de 16 alto falantes permite a reprodução de cenas sonora em formato Ambisonics de até terceira ordem. E, caso seja desejável que o usuário interaja com o campo sonoro sendo reproduzido, faz-se necessário uma interface de processamento de áudio com baixa latência. Portanto a escolha foi pelo produto da Universal Audio, modelo Apollo x16, que possui comunicação Thunderbolt 3 com até 40 GBs de transmissão, o que permite um grande tráfego de dados em um espaço reduzido de tempo (baixa latência) e também a conexão simultânea de até 4 interfa-

ces iguais. Esta interface possui processamento *hexa-core* com seis *SHARC®DSP processors* [9].

Utilizada na maioria das pesquisas recentemente desenvolvidas no LAC como, por exemplo, uma solução de *beamforming* baseada em aprendizado de máquina com uso de redes neurais artificiais [10], as técnicas de aprendizado de máquina têm se tornado essenciais em diversas aplicações das mais variadas áreas do conhecimento. Geralmente, esses algoritmos demandam alto poder de processamento mas, por outro lado, são altamente paralelizáveis, tornando-se viável o uso de placas gráficas (GPU) para esta finalidade. O LAC conta com computadores equipados com GPUs da fabricante NVIDIA, modelos TITAN V e RTX 2080.

3. A SALA DE ESCUTA CRÍTICA

Conforme descrito na seção anterior, o LAC possui diversos equipamentos para aquisição, processamento e reprodução de sinais sonoros. No entanto, é essencial um ambiente adequado para uma utilização adequada destes equipamentos. Já durante o processo de avaliação da proposta do projeto Jovem Pesquisador, em uma entrevista na sede da FAPESP com três de seus conselheiros, foi levantada a necessidade de uma sala adequada para a instalação destes equipamentos.

Com o apoio da diretoria da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC) e de órgãos da Reitoria da Unicamp, por praticamente dois anos buscou-se em todo o campus da universidade por espaços adequados para a instalação de uma sala de escuta crítica. No entanto, não foi possível encontrar um espaço que estivesse livre e que permitisse atender às recomendações internacionais para uma sala de escuta crítica [3]. Por esta razão, foi solicitado à FAPESP financiamento para a construção de um novo prédio, anexo à FEEC, para abrigar uma sala de escuta crítica (SEC). O projeto desta sala foi doado pelo escritório de arquitetura Harmonia via o programa “Parceiros da Unicamp” [11].

A construção de uma sala de escuta crítica foi aprovada como a aquisição de um equipamento multiusuário pela FAPESP em fevereiro de 2021. Em seguida, os órgãos competentes da universidade autorizaram a construção da SEC dentro da quadra que abriga a FEEC, em uma área ao lado da cabine de força, na rua Josué de Castro. Após esta definição, foi necessário adequar o projeto à área de instalação. Também foi necessário readequar o orçamento do obra em função do aumento expressivo no custo da construção civil durante o ano de 2020, causada pela pandemia de COVID19. Após aprovação da FAPESP de uma nova solicitação de alteração de orçamento, a empresa com melhor proposta foi contratada e a obra finalmente teve início em 23 de novembro de 2021.

4. PROJETO ACÚSTICO

O prédio projetado para abrigar a SEC conta, além da própria sala de escuta crítica, cujo projeto será detalhado a seguir, com uma antessala e uma sala técnica, como mostrado na planta da Figura 2. A antessala deverá funcionar como uma zona de transição acústica (*buffer*) e também será usada para armazenar equipamentos. Já a sala técnica será o espaço onde serão instalados os equipamentos de controle dos experimentos da SEC, como computadores e interfaces de áudio. Esta sala também irá abrigar os pesquisadores durante os experimentos e funcionará como uma sala de espera para os voluntários antes do início dos experimentos. Note que a sala técnica não foi projetada com os mesmos requisitos acústicos que a sala de escuta crítica.

O prédio projetado tem dimensões externas de $12\text{ m} \times 7\text{ m} \times 6\text{ m}$. Internamente, a antessala tem dimensões de $3\text{ m} \times 2,4\text{ m} \times 2,7\text{ m}$, a sala técnica tem dimensões de $3\text{ m} \times 4,4\text{ m} \times 2,7\text{ m}$ e a SEC tem dimensões de $8\text{ m} \times 6,4\text{ m} \times 5,12\text{ m}$, o que resulta em um volume de 262 m^3 . As dimensões da SEC atendem ao critério de Bonello, que diz que em uma sala bem ajustada o número de modos por banda de frequência deve sempre crescer com o aumento da frequência, como mostrado na Figura 3. As dimensões projetadas para a SEC também estão dentro da área de Bolt, que apresenta um limite que incorpora as proporções de salas em paralelepípedo conhecidas por apresentarem um bom comportamento acústico, como mostra a Figura 4. Estas dimensões resultam em uma área de $51,2\text{ m}^2$ para a SEC, um valor intermediário dentro da faixa recomendada pela ITU, que vai de 30 a 70 m^2 [3].

4.1 Isolamento acústico

A ITU recomenda que o ruído residual dentro do ambiente da SEC deve necessariamente ser inferior ao critério NR-15 e, preferencialmente, inferior ao critério NR-10 [3]. A Figura 5 mostra as curvas NR-10 e NR-15 superpostas ao nível em bandas de oitava do ruído residual medido no local da construção em sete oportunidades ao longo de três meses, medido sempre em dias comerciais em horário próximo ao meio-dia. Verifica-se, portanto, que para garantir os níveis de ruído residual extremamente baixos recomendados pela ITU, na melhor situação, ou seja, em períodos calmos do dia, será necessário que as paredes da construção garantam uma perda de transmissão superior a 20 dB em praticamente todo o espectro audível. No entanto, para garantir que o ruído residual dentro da sala seja inferior ao critério NR-10 mesmo durante a passagem de veículos pesados ao longo da rua Josué de Castro, estima-se que a perda de transmissão deva ser superior a 40 dB, especialmente nas baixas frequências. Para garantir este nível de isolamento, a SEC foi projetada como um sistema *box-in-a-box*, isto é, a sala é composta de uma estrutura independente instalada dentro da estrutura principal do prédio e mecanicamente desacoplada desta estrutura por meio de elementos isoladores.

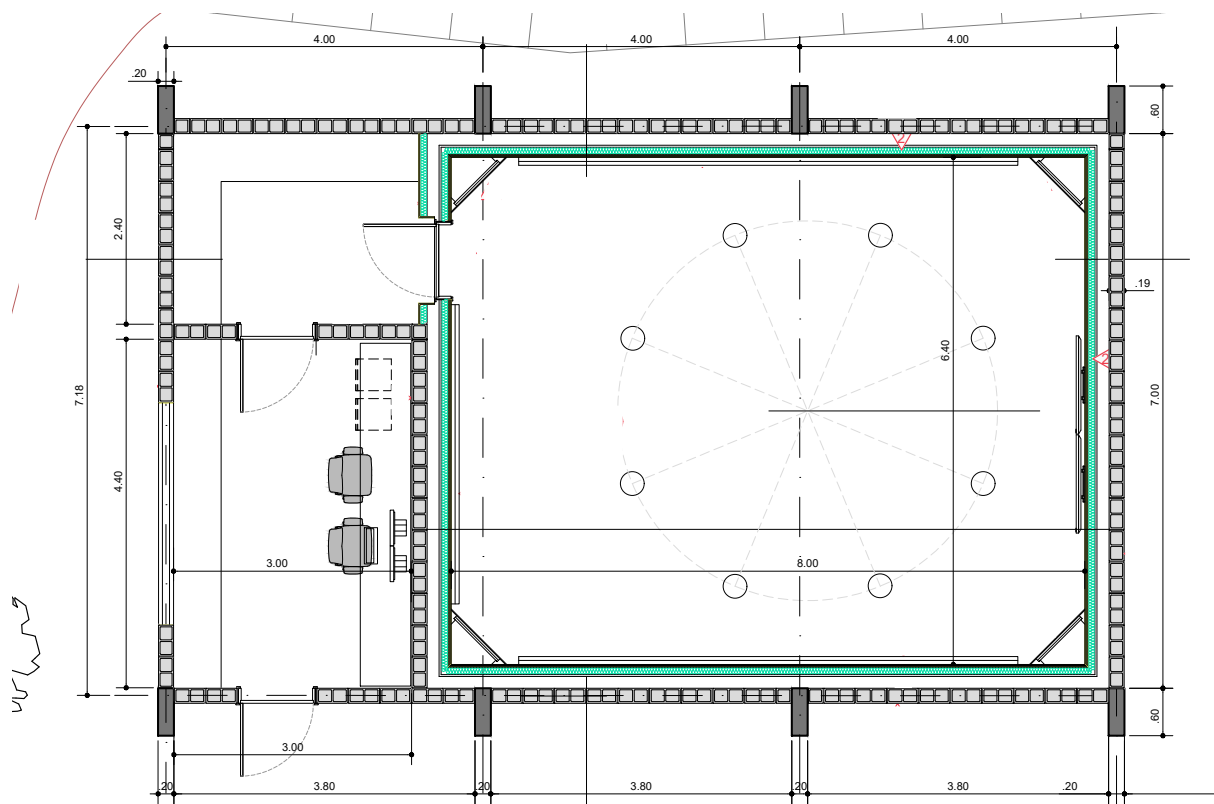


Figura 2: Planta mostrando a sala técnica, a antessala e a SEC. Em verde está a parede interna da SEC, que está fixada sobre um piso flutuante.

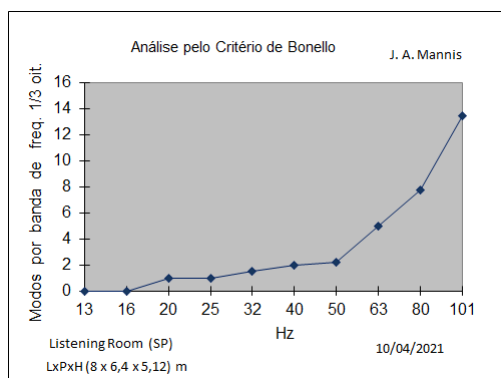


Figura 3: Diagrama de densidade modal para as dimensões da SEC.

4.1.1 Piso flutuante

Normalmente nos preocupamos com os sons que entram em uma sala por transmissão aérea, ou seja, através de portas e paredes abertas. No entanto, também devemos nos preocupar com o som que entra via vibração do solo ou da estrutura do edifício, o que é conhecido por transmissão por estrutura. Esta segunda via de transmissão sonora pode ser minimizada desacoplando-se mecanicamente a estrutura da sala interna da estrutura da sala externa. O projeto da SEC prevê o uso de um piso flutuante, que consiste de uma laje de

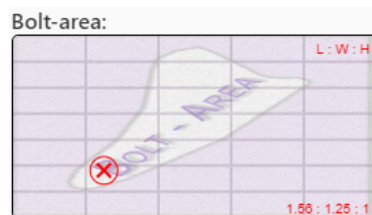


Figura 4: Área de Bolt, com as dimensões da SEC marcadas pelo "X" em vermelho.

concreto armado apoiada sobre amortecedores. O projeto e as peças do piso flutuante foram doados pela empresa Vibtech, também através do programa "Parceiros da Unicamp" [11].

O projeto previu uma área total do piso flutuante de $6,76 \text{ m} \times 8,37 \text{ m} = 56,58 \text{ m}^2$, considerando um vão de 12 cm entre as paredes e o piso. O piso foi projetado com uma espessura de 10 cm. Assumindo um concreto com densidade de 2.400 kg/m^3 , a massa do piso será de 13.579 kg. Considerou-se também uma carga acidental de 150 kg/m^2 ou 8.487 kg. As paredes e forro da sala interna serão fixados diretamente ao piso flutuante. Para tanto, considerou-se uma massa de 11.669 kg distribuída ao longo do perímetro da sala. A carga máxima total a suspender

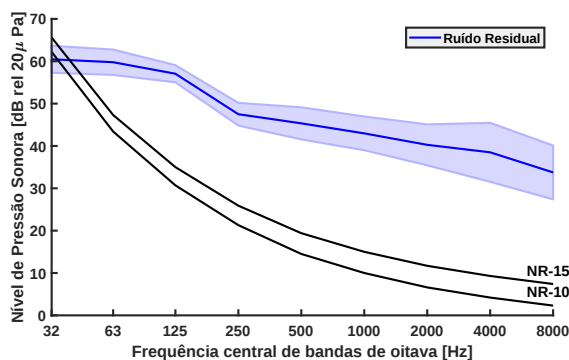


Figura 5: Ruído residual e respectivo desvio padrão medido no local da construção e curvas de classificação de ruído (NR-10 e NR-15) com limites para o nível de ruído de fundo por banda de oitava de acordo com a norma ISO 1996.

foi calculada em 33.735 kg.

O projeto da empresa Vibtech prevê o uso de 63 peças isoladoras com carga máxima de 230 kg no interior do piso e 36 peças isoladoras com carga máxima de 675 kg no perímetro do piso, para auxiliar a suportar a carga da parede. Este projeto garante uma carga máxima suportada de 38.790 kg. Ou seja, ainda existe uma margem de segurança para a instalação do revestimento interno da sala, que ainda não foi projetado.

A Figura 6 mostra a curva da atenuação da vibração por frequência, calculada para diferentes configurações de carga. A “Massa 1” é composta pela massa do piso e carga da parede. A “Massa 2” é composta pela “Massa 1” acrescida da carga accidental. E a “Massa 3” corresponde à “Massa 2” acrescida de uma massa de 3.072 kg, estimada para o revestimento interno. Os isoladores foram especificados para que a condição “Massa 2” apresente uma frequência natural na faixa de 7 a 8 Hz. Note que a ausência da carga accidental eleva a frequência natural do sistema massa-mola reduzindo, portanto, a atenuação observada. Já o aumento de massa causado pela adição do revestimento interno reduz a frequência natural, aumentando assim a atenuação do sistema.

Para a instalação do piso flutuante será primeiro posicionada uma espuma no perímetro da sala para garantir o distanciamento do piso flutuante da estrutura da sala externa. Em seguida, uma manta de material flexível é distribuída sobre o piso da sala externa. Esta manta é então cortada nos pontos onde serão posicionados os isoladores,

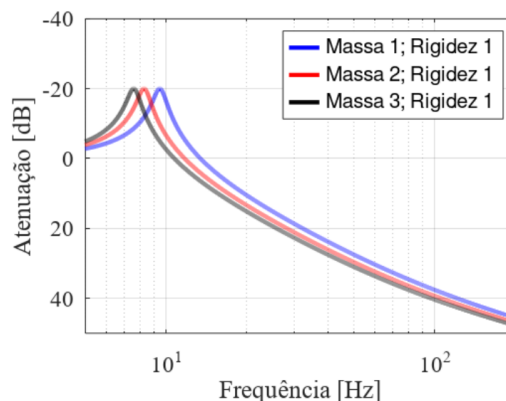


Figura 6: Atenuação projetada para o piso flutuante usando um modelo de um grau de liberdade (massa-mola).

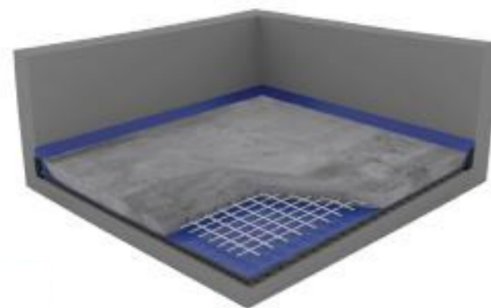


Figura 7: Exemplo de montagem de um piso flutuante com laje de concreto armado (em cinza) posicionada sobre uma manta com isoladores de vibração (em preto) revestida por um filme impermeável (em azul).

criando uma manta híbrida, que deve ser revestida por um filme impermeável para evitar a perda de água do concreto durante a cura. Por fim, deve ser montada a armação e aplicado o concreto. Este processo está exemplificado na Figura 7.

4.1.2 Parede dupla

Seguindo o conceito de construção *box-in-a-box*, as paredes e forro da sala interior também precisam estar desacoplados mecanicamente da estrutura externa. No projeto da SEC escolhemos construir as paredes e o teto de gesso acartonado fixados em estrutura metálica leve, ou *light steel frame* (LSF). Esta estrutura autoportante de LSF será fixada diretamente sobre o piso flutuante.

Para entender a vantagem deste sistema de paredes duplas, vamos primeiro entender o comportamento de uma parede simples. A perda de transmissão sonora em uma parede simples e pesada pode ser calculada de acordo com a “Lei da

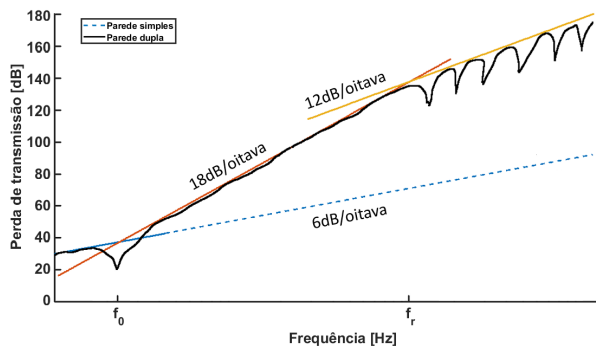


Figura 8: Perda de transmissão estimada para a parede dupla de alvenaria, espaço de ar e placa tripla de gesso acartonado (linha preta). A linha tracejada indica a perda de transmissão para uma parede simples de alvenaria, de acordo com a Lei das Massas.

Massa” [12], dada por

$$R_A \approx 10 \log_{10} \left(\frac{\omega m'}{2Z_0} \right)^2, \quad (1)$$

em que m' é a densidade superficial da parede e Z_0 a impedância característica do ar.

A estrutura principal do prédio, ou seja, a sala externa, foi projetada em alvenaria estrutural utilizando blocos de concreto com resistência de 4,5 MPa (classe B). Para aumentar a massa da parede, e consequentemente a sua perda de transmissão, os blocos foram preenchidos com concreto ou areia, resultando em uma parede com densidade superficial (ou massa específica) de aproximadamente¹ 300 kg/m². Para a cobertura da sala externa foi construída uma laje de concreto maciço com 15 cm de espessura, que resulta em uma densidade superficial de aproximadamente² 360 kg/m². A Figura 8 mostra a perda de transmissão estimada para esta parede. Note que R_A cresce 6 dB por oitava.

Para aumentar o isolamento da sala, é necessário aumentar a perda de transmissão da parede, o que pode ser obtido de maneira eficiente com uma parede dupla, construída incluindo-se uma segunda

¹Cada bloco tem dimensões de 19 cm × 19 cm × 39 cm e massa de 12,5 kg. Assumindo que as cavidades representem 50% do volume do bloco e que o volume seja preenchido com areia, com densidade média de 1500 kg/m³, o preenchimento irá pesar 0,016 m³ × 1.500 kg/m³ = 12 kg. Uma parede de 1 m² terá 12,5 blocos, resultando em uma massa de aproximadamente 300 kg.

²O concreto possui uma densidade de aproximadamente 2.400 kg/m³. Logo, uma laje de 1 m² e espessura de 15 cm tem uma massa de 1 m² × 0,15 m × 2.400 kg/m³ = 360 kg.

parede menos densa separada da primeira por um volume de ar. Este volume de ar enclausurado entre as paredes atua como uma mola, resultando em um sistema massa-mola, que pode ser interpretado como um filtro passa-baixas acústico, com frequência de ressonância dada por [12]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{cZ_0}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}, \quad (2)$$

em que c é a velocidade do som, d é a distância entre as paredes e m_1 e m_2 a massa específica (densidade superficial) das paredes.

As paredes internas da SEC foram projetadas com 3 placas de gesso acartonado, que possuem uma densidade superficial total de 39 kg/m² e uma distância entre as paredes de 25 cm, o que resulta em uma frequência de ressonância

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{344 \times 414}{0,25} \left(\frac{1}{39} + \frac{1}{300} \right)} \approx 20,4 \text{ Hz}, \quad (3)$$

ou seja, exatamente no limite inferior da faixa de frequência audível.

A Figura 8 mostra a perda de transmissão calculada de acordo com [12] para a parede dupla projetada. Vê-se que abaixo da frequência de ressonância (f_0) a parede dupla se comporta como uma parede simples, mas acima da ressonância a perda de transmissão triplica, i.e., cresce com 18 dB por oitava!

Ainda de acordo com [12], acima da frequência

$$f_r = \frac{c}{2d}, \quad (4)$$

quando o comprimento de onda é da mesma ordem de grandeza que a distância entre as paredes, o sistema de parede dupla passa a se comportar como um guia de onda e a perda de transmissão passa a apresentar ressonâncias e a crescer com 12 dB por oitava, como esboçado na Figura 8. Para os valores de projeto da SEC, $f_r \approx 688$ Hz.

A perda de transmissão pode ser melhorada incluindo-se uma camada de material fonoabsorvente junto à parede mais leve. O projeto da SEC prevê a inclusão de painéis de lã mineral de 100 mm encaixados nos montantes da parede interna.

A mesma argumentação de projeto de paredes duplas vale também para as portas. Para este projeto foi previsto o uso de duas portas acústica de abrir com índice de redução acústica $R_W \geq 40$ dB. Para tanto, a porta deve ser construída com chapa dupla revestida por lã mineral, deve ter vedação perimétrica em gaxetas de borracha e selo acústico de soleira.

4.2 Condicionamento acústico

O uso de uma estrutura *box-in-a-box* foi pensado para garantir que o nível de ruído residual dentro da SEC atenda ao critério NR-10. Mas a ITU também recomenda que a sala de escuta deve ter um tempo de reverberação reduzido [3], dado por

$$T_R = 0,25(V/100)^{1/3}, \quad (5)$$

em que V é o volume da sala de escuta crítica. Para o volume projetado da SEC de 262 m^3 temos que o tempo de reverberação recomendado é de $0,34 \pm 0,05$ s. Usando a equação de Eyring

$$T_{\text{Eyring}} = 0,161 \sqrt{\frac{V}{\sum_i (-S_i \log(1 - \alpha_i))}}, \quad (6)$$

em que S_i é a área de cada parede e α_i o coeficiente de absorção da respectiva parede, podemos estimar o tempo de reverberação da SEC sem revestimento. Considerando um valor médio para o coeficiente de absorção da placa de gesso acartonado de 0,05, temos que $T_{\text{Eyring}} \approx 2,28$ s, ou seja, muito superior ao valor recomendado pela ITU.

Para reduzir o tempo de reverberação o projeto prevê que as paredes da SEC deverão ser revestidas por painéis de lã mineral com densidade mínima de 40 kg/m^3 , espessura de 5 cm e posicionados a uma distância de 5 cm da parede. A quantidade exata e a posição destes painéis na sala serão definidos apenas após a conclusão da construção, de posse de valores medidos do tempo de reverberação da sala.

4.2.1 Acústica variável

Em uma segunda etapa, está planejada a alteração do projeto do revestimento interno para permitir que a SEC tenha acústica variável, ou seja, que o tempo de reverberação da sala possa ser alterado. Isso permitirá o uso da SEC para avaliar sistemas ou criar bancos de dados de áudio com diferentes

valores de tempo de reverberação, mas mantendo todas as demais condições acústicas do ambiente.

Uma solução para uma sala com acústica variável seria revestir as paredes com painéis móveis, sendo que em um dos seus lados o painel é revestido com material fono-absorvente (como lã mineral) e no outro lado com um material refletor (como madeira). Um contato com um colega de uma universidade alemã que possui uma câmara variecoica com este sistema instalado³ indicou que esta solução garante uma variação do tempo de reverberação de 0,2 s a 2 s numa faixa de frequência de 500 Hz a 4 kHz. Para o controle das baixas frequências uma solução seria o uso de painéis de membrana microperfurada, como os painéis Evoke⁴ da empresa Flex Acoustics [13].

5. PROJETO ELÉTRICO

Na seção anterior foram apresentados todos os cuidados de projeto para garantir o adequado comportamento acústico da SEC. No entanto, não podemos nos esquecer que os testes de audição que serão realizados na SEC utilizarão equipamento eletroacústicos, especificamente microfones e alto-falantes, que podem sofrer de interferência eletromagnética o que pode resultar, por exemplo, em zumbido emitido pelos alto-falantes, o que inviabilizaria estes testes. Além disso, toda a instrumentação usada para gerar, condicionar e amplificar os sinais de áudio são também sensíveis a interferência eletromagnética e a variações na rede elétrica. Por esta razão, foram tomados diversos cuidados no projeto elétrico da SEC para mitigar estas interferências.

Um dos principais cuidados que tomamos no projeto elétrico foi garantir que os cabos elétricos passem por um caminho separado dos cabos de sinal/áudio, evitando que possíveis ruídos da rede elétrica entrem nos cabos de sinal. Outro cuidado foi alimentar as tomadas e lâmpadas da SEC com uma fase exclusiva, usando as outras duas fases para alimentar as outras duas salas e o ar condicionado⁵. Além disso, cada bloco de tomadas

³https://youtu.be/_wPZ2112C-o

⁴<https://vimeo.com/manage/videos/681861347>

⁵O acionamento do motor do compressor do ar condicionado resulta em um pico de tensão que pode se propagar até os equipamentos eletroacústicos se estes estiverem instalados na mesma fase.



da SEC será alimentado por um circuito independente, eliminando diversas tomadas em paralelo em um único circuito, o que pode ser uma porta de entrada para ruídos eletromagnéticos.

O projeto prevê uma malha de aterramento composta por seis hastes de aço carbono cobreadas enterradas no entorno do edifício e conectadas por cordoalha de aço cobreado. Este anel de aterramento deverá ser usado para aterrar a estrutura metálica e tela da sala interna, para aterrar todos os quadros de distribuição e as tomadas de energia elétrica e para aterrar o sistema de proteção de descargas atmosféricas (SPDA). Além disso, para reduzir ainda mais a interferência eletromagnética, a instalação elétrica será feita usando eletrodutos de aço galvanizado (aparentes e fixados no revestimento da parede).

6. PROJETO DE CLIMATIZAÇÃO

Como discutido previamente, para atender aos requisitos acústicos, a SEC foi projetada como uma sala completamente fechada. Mas, apesar de o enclausuramento da sala ser vantajoso para o isolamento sonoro da sala, esta forma de construção pode resultar em um problema de conforto térmico para os usuários da sala, o que pode ser contornado com um sistema de climatização da sala. E a climatização desse espaço, garantindo os níveis de ruídos prescritos pela ITU [3], se mostrou um grande desafio.

Foram levantadas duas possíveis soluções para a climatização da sala atendendo a estes requisitos de ruído. A solução ideal seria o uso de um sistema de ar condicionado central ligado à SEC por dutos. A redução do ruído do sistema é obtida com a instalação de silenciadores ao longo dos dutos e o uso de dutos grandes para garantir um insuflamento de ar em baixas velocidades. A outra opção seria o uso de um sistema de ar condicionado do tipo *hi-wall*, frequentemente encontrado nas residências brasileiras, que deveria ser desligado enquanto um experimento estiver sendo realizado. Note que tanto o sistema dutado como o sistema convencional usam máquinas do tipo *split*, ou seja, com uma máquina condensadora no exterior do edifício e uma máquina evaporadora no interior. A diferença está no fato de que no sistema convencional a evaporadora está instalada dentro de cada sala a ser climatizada, enquanto

que no sistema central ou dutado a evaporadora está instalada em um único ponto do edifício, possivelmente em uma sala de máquinas, e o ar refrigerado é levado aos diversos cômodos por um sistema de dutos.

Como a sala é vedada do exterior, também é necessário considerar a renovação de ar na sala. E ambas as soluções precisam de um sistema auxiliar para este fim. A diferença é que o sistema dutado requer a construção de uma sala de máquinas onde é instalada a condensadora. A sala de máquinas deve ter uma tomada de ar externo, além de ser conectada com a sala principal por dutos de insuflamento e de exaustão, aumentando assim a complexidade da obra. Já para o sistema convencional deve ser instalado um ventilador que insufla o ar externo diretamente no ambiente interno. Neste caso deve-se também considerar um duto para exaustão passiva.

O orçamento feito para a solução com ar condicionado central custava cerca de cinco vezes mais caro que a solução convencional, ainda desconsiderando o custo da construção da sala de máquinas. Portanto, foi decidido continuar com a opção por um sistema de ar condicionado convencional, tomando o cuidado de selecionar um equipamento com baixo nível de emissão de ruído, idealmente com nível de ruído inferior a 29 dBA, o que equivale à curva NR-15 de ruído. Uma empresa foi contratada para realizar o dimensionamento e projeto de instalação do sistema de climatização escolhido.

7. PROJETO CIVIL

Apesar da SEC ser um equipamento para medições acústicas, requerendo, portanto, um grande cuidado no seu projeto acústico e elétrico, ele não deixa de ser um edifício, cujo projeto requer atenção a diversos outros aspectos.

7.1 Combate a incêndio

De acordo com a Instrução Técnica nº 14/2011 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, a sala pode ser classificada como D-1 (“Estúdio de rádio ou de televisão ou de fotografia”). Ademais, de acordo com o Regulamento de Segurança Contra Incêndios (Decreto Nº 63.911 de 10/12/18 da Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo), como a área total da edificação é inferior a 750 m²

e a altura inferior a 12 m, as medidas de segurança contra incêndio necessárias para esta edificação são:

- saída de emergência,
- sinalização de emergência, e
- extintores.

Apesar de não ser obrigatório, dado que se trata de uma sala sem janelas, decidiu-se também pela instalação de um sistema de detecção de fumaça.

7.2 Saída de emergência

De acordo com a Instrução Técnica nº 11/2018 do Corpo de Bombeiros de SP, a SEC, por ter uma área de total de 84 m^2 , deve ter considerada uma população de $84/7 = 12$ pessoas. Lembrando que ela é uma edificação classificada como D-1, o número de saídas de emergência necessárias é definido por $N = \text{População}/(\text{Capacidade da unidade de passagem}) = 12/100$, ou seja, $N = 1$. A SEC deve ter, portanto, uma única unidade de passagem, com largura mínima de 0,55 m. Por termos ocupação menor que 100 pessoas, não é obrigatória a instalação de barra antipânico nas portas de saídas de emergência.

Dessa forma, as portas acústicas de acesso à SEC serão também as portas de emergência. Por esta razão, todas as portas foram projetadas para abrir no sentido do fluxo de saída.

7.3 Projeto estrutural e executivo

Foi feita uma sondagem no local e o solo se mostrou bastante compactado, sendo intransponível a partir de 7,45 m de profundidade. Foi contratado um projeto estrutural/executivo que, em função do laudo de sondagem, definiu o uso de estacas do tipo escavada mecânica, seguidas de blocos de fundação e viga baldrame. Na parte externa ficou definido a construção das paredes em alvenaria estrutural.

7.4 Cobertura e águas pluviais

Próximo ao local de construção da SEC existe uma árvore nativa de grande porte (*Luehea divaricata*). O acúmulo de suas folhas e frutos sobre a cobertura do edifício da SEC poderia causar transtornos em dias de chuvas. Para minimizar danos causados pela chuva, assim como a necessidade de manutenção, o projeto da SEC considerou um telhado de duas águas com laterais aparentes. As

laterais menores serão fechadas por uma platibanda. Este telhado será construído com estrutura metálica posicionada sobre a laje de concreto e será revestido por telhas metálicas, que serão conectadas ao sistema de SPDA.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de pesquisa sobre Acústica das Comunicações ainda não é uma área difundida dentro das universidades brasileiras. Porém, grandes empresas de tecnologia têm despendido grandes quantidades de recursos para pesquisas na área, com o intuito de desenvolver uma nova geração de sistemas de áudio para serem usadas, por exemplo, na nova versão do sistema de televisão digital, ou em aplicações de realidade virtual e aumentada. E todo este desenvolvimento tecnológico trás a reboque uma série de questões científicas que precisam ser respondidas.

O LAC foi criado para atuar em diversas frentes associadas à comunicação sonora. As principais pesquisas em desenvolvimento no momento são: avaliação de algoritmos promotores de esparsidade para localização de fontes com arranjo esférico de microfones, separação de objetos sonoros baseada no princípio da esparsidade, filtragem espacial de sinais de fala utilizando aprendizado de máquina profundo, desreserveberação através de aprendizado profundo, avaliação da espacialidade sonora percebida pelo processamento auditivo central utilizando medição eletrofisiológica, monitoramento de máquinas por sensores acústicos e aprendizado de máquina.

Espera-se que o Laboratório de Acústica das Comunicações, com os equipamentos disponíveis e contando com a infraestrutura de uma Sala de Escuta Crítica, venha a ser considerado uma das referência na área áudio, acústica e processamento de sinais de áudio dentro do território brasileiro.

9. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por financiar este projeto através do auxílio Jovem Pesquisador número [2017/08120-6](#) e do auxílio Equipamento Multiusuário número [2021/07475-0](#). Também agradecemos à NVIDIA pela doação da placa de processamento gráfico Titan V.



O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Agradecemos a todos os colegas que nos auxiliaram nas diversas etapas deste projeto, em especial aos professores Tiago Zenker Gireli da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU), que auxiliou nas questões de acessibilidade e prevenção de incêndio, Gustavo Henrique Siqueira (FECFAU), que auxiliou no projeto estrutural do prédio, José Augusto Mannis (IA) que realizou o dimensionamento da sala e José Pissolato Filho e Fabiano Fruett (FEEC) que auxiliaram no projeto elétrico e de compatibilidade eletromagnética.

REFERÊNCIAS

- [1] Blauert, Jens, editor. *Communication Acoustics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. ISBN 978-3-540-22162-3. doi: [10.1007/b139075](https://doi.org/10.1007/b139075).
- [2] Masiero, Bruno Sanches. Qual o futuro do MP3? Audio espacial e codificação orientada a objetos. Em *14o Congresso de Engenharia de Áudio*, São Paulo, Brazil, 2016.
- [3] ITU-R BS.1116-3. Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems. Recommendation, International Telecommunication Union, Fevereiro 2015.
- [4] Technologies, Microflown. PU regular. Disponível em: <https://www.microflown.com/products/standard-probes/pu-regular>. Acessado em 14/06/2022.
- [5] Nelson, Philip Arthur e Elliott, Stephen J. *Active Control of Sound*. 3rd^a ed. San Diego, CA: Academic Press, 1992.
- [6] HEAD Acoustics. HSU – artificial head series for binaural sound recordings. Disponível em: <https://www.head-acoustics.com/products/artificial-head-binaural-recording/hsu-iii>. Acessado em 14/06/2022.
- [7] Visisonics. 5/64 audio visual camera. Disponível em: <https://visisonics.com/acoustic-measurement-visualization/5-64-audio-visual-camera/>. Acessado em 14/06/2022.
- [8] Møller, Henrik. Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, 36(3-4):171–218, 1992. ISSN 0003682X. doi: [10.1016/0003-682X\(92\)90046-U](https://doi.org/10.1016/0003-682X(92)90046-U).
- [9] Universal Audio. Apollo X16. Disponível em: <https://www.uaudio.com/audio-interfaces/apollo-x16.html>. Acessado em 14/06/2022.
- [10] Kuno, Yugo M; Masiero, Bruno e Madhu, Nilesh. A neural network approach to broadband beamforming. Em *23rd International Congress on Acoustics (ICA 2019)*, págs. 6961–6968. Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2019.
- [11] Universidade Estadual de Campinas. Programa Parceiros da Unicamp. Disponível em: https://www.dea.unicamp.br/programa_parceiros_unicamp. Acessado em 14/06/2022.
- [12] Kuttruff, Heinrich. *Acoustics: An Introduction*. first^a ed. New York, USA: Taylor & Francis, 2007. ISBN 9780203970898.
- [13] Flexacoustics. Evoke. Disponível em: <https://flexac.com/en/products/evoke/>. Acessado em 14/06/2022.