2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO TERMOENERGÉTICA E ACÚSTICA DE TEATRO EM CONTÊINERES[1]

HAIDA, Fabiana Shizuka (1); FONSECA, Mateus Santos (2); GIGLIO, Thalita Gorban Ferreira (3); ATEM, Camila Gregório (4)

(1) Universidade Estadual de Londrina, fabianahaida@gmail.com
(2) Universidade Estadual de Londrina, matsfonseca@gmail.com
(3) Universidade Estadual de Londrina, thalita@uel.br
(4) Universidade Estadual de Londrina, camila.atem@uel.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho termoacústico de um teatro projetado com contêineres pelo OCAS-UEL para a Funcart/Londrina, propondo alterações eficientes e viáveis economicamente para sua posterior execução. Foram analisados o tempo de reverberação, a perda de transmissão sonora, pré-requisitos do RTQ-C e o consumo energético do sistema HVAC, simulado através do software EnergyPlus. Como resultado das análises, o tempo de reverberação e a perda por transmissão sonora da envoltória não foram aceitáveis para uso de um espaço misto, as transmitâncias térmicas da cobertura e das paredes do teatro estavam acima do limite máximo para uma classificação A, enquanto as absortâncias solares foram adequadas. A proposta de adequação modificou materiais de revestimento interno do teatro e da vedação, resultando em adequação eficiente acústica e energeticamente.

***Palavras-chave**: Eficiência energética. Tempo de reverberação. Teatro em contêiner. Simulação.*

ABSTRACT

This work's objective was to evaluate the thermoacoustic performance of a theater designed with containers by OCAS-UEL for Funcart/Londrina, proposing efficient and economically viable changes for its subsequent execution. The reverberation time, the loss of sound transmission, RTQ-C prerequisites and the energy consumption of the HVAC system, simulated using the EnergyPlus software, were analysed. As a result of the analysis, both the reverberation time and loss of sound transmission provided by the envelope were not acceptable for the mixed use space, , the thermal transmittance of the theater's roof and walls were above the upper limit for an A energy efficiency classification, while solar absorptances were considered appropriate for it. The suitability proposal modified the theater's internal lining materials and closure components, providing an acoustic adequate and energy efficient solution.

***Keywords**: Energy efficiency. Reverberation time. Container theater. Simulation.*

---

[1] HAIDA, Fabiana Shizuka; FONSECA, Mateus Santos; GIGLIO, Thalita Gorban Ferreira; ATEM, Camila Gregório. Proposta de adequação termoenergética e acústica de teatro em contêineres. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é a maior consumidora de recursos naturais de qualquer economia, utilizando de 14% a 50% dos recursos naturais, conforme Sjostrom (1996). Assim, a participação do setor no desenvolvimento sustentável é elementar, sendo a adequação ao bioclima e a utilização de materiais potencialmente recicláveis algumas das recomendações do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2019) para edificações mais sustentáveis.

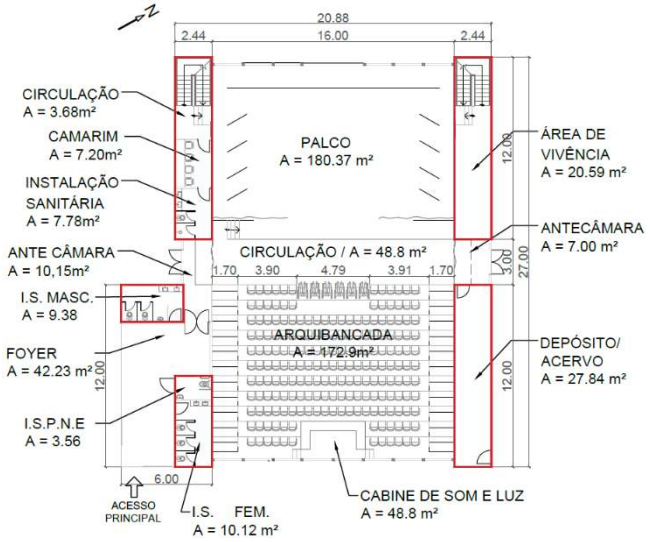
Um material com potencial sustentável que tem ganhado destaque nos últimos anos é o contêiner marítimo, adaptado para a construção civil após o fim de sua vida útil no transporte de mercadorias. Há, entretanto, a necessidade de se avaliar o bem-estar proporcionado ao usuário das edificações em contêineres, uma vez que sua estrutura básica é composta por um esqueleto metálico envolto nas laterais e teto por uma fina chapa metálica, que apresenta baixo potencial de isolamento térmico e acústico (AZEVEDO et al., 2016).

O objetivo deste trabalho foi verificar as potencialidades e propor soluções termoenergéticas e acústicas para a utilização de contêineres na construção de um teatro. As soluções propostas foram norteadas por critérios econômicos e requisitos mínimos de conforto acústico e de eficiência energética da envoltória da edificação conforme o Regulamento Técnico do Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos- RTQ-C (INMETRO, 2010).

2 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo nesse trabalho foi o projeto de um teatro em sistema construtivo misto com contêineres, realizado pelo OCAS-UEL (Escritório Modelo de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina), a ser construído pela Funcart, uma instituição cultural privada, sem fins lucrativos. A edificação está localizada na cidade de Londrina (PR), na zona bioclimática 3 (ABNT, 2005).

Figura 1 – (a) Planta baixa do térreo com ênfase para os fechamentos laterais em contêineres (vermelho)/ (b) Características principais do teatro



Dimensões do Teatro	25,90x16,00m
Área do Teatro	414,40m²
Volume do Teatro	2.871,27m³.
Uso do Teatro	Misto (dança, música e teatro)
Cronograma de utilização	laboral: das 14h às 18h
	Fim/semana: das 14h às 22h
Ocupação máxima do Teatro	201 pessoas
Taxa de metabolismo	126W/pessoa
Carga de iluminação	15 W/m²

(a) (b)

Fonte: adaptado de OCAS-UEL (2019)

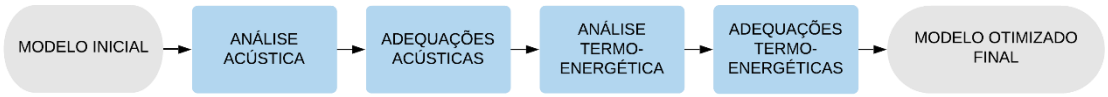
O edifício projetado possui dois pavimentos, com uma planta praticamente retangular, conforme Figura 1, e receberá atividades de ensino e apresentações. Um dos objetivos do projeto era obter um bom espaço para apresentações a um custo acessível, por isso a parceria com a universidade.

A área principal da edificação abriga o palco e arquibancada, com contêineres adjacentes às laterais nordeste/sudoeste, que funcionam como ambientes de apoio ao teatro. O contêiner é formado por chapa de aço corten amarela de 1mm de espessura. As laterais noroeste/sudeste e a cobertura apresentam fechamento em telhas termoacústicas, compostas por chapas de aço de 1mm e isolante em poliestireno expandido de 40mm.

3 METODOLOGIA

Para atender o objetivo deste estudo, realizou-se a sequência da Figura 2, priorizando a adequação acústica e posteriormente aplicando medidas de eficiência energética para redução do consumo de energia elétrica do ambiente principal.

Figura 2 – Sequência do método



Fonte: Os autores

3.1 Adequação acústica

Foi realizada a caracterização do entorno através de medições do ruído e tratamento de dados em concordância com a NBR 10.151 (ABNT, 2000).

O condicionamento sonoro proporcionado pelo projeto base foi analisado por meio da comparação do tempo de reverberação, calculado de acordo com Sabine (1922, apud Silva, 1971), com o valor ótimo para palavra e música, conforme Costa (2003). Adotou-se a ocupação de 134 pessoas, equivalente a 2/3 da ocupação máxima do teatro (Silva, 1971), e uma margem de tolerância de 10% para aceitação, conforme limite disposto na NBR 12.179 (ABNT, 1992). Em seguida foi calculada a perda de transmissão sonora pelas vedações do projeto base para a frequência de 500Hz e comparado o ruído resultante dentro do teatro com o limite estabelecido pela NBR 10.152 (ABNT, 1987) para salas de concertos e teatros. Por fim, foi realizada uma proposta de alterações no teatro para sua adequação para condicionamento e isolamento acústico.

3.2 Adequação termoenergética

O desempenho termoenergético foi analisado inicialmente com base nos pré-requisitos do RTQ-C para a envoltória, calculando-se a transmitância térmica da cobertura e paredes e a absortância solar das superfícies externas, de acordo com equações e valores da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005).

Por meio de simulação termoenergética obteve-se o consumo de energia elétrica para a climatização artificial do teatro, parâmetro de comparação de eficiência energética entre o projeto base e as demais opções de otimização. O edifício foi modelado através do programa SketchUp Pro 2017 e a extensão Euclid 0.9.3, com base no projeto arquitetônico do edifício. As simulações termoenergéticas foram

realizadas com o uso do programa EnergyPlus V8-7-0, para o período de um ano, com ocupação máxima do teatro. Utilizou-se o input *HVAC Unitary* como um sistema de resfriamento a ar auto dimensionado pelo EnergyPlus, considerando-se o termostato entre 18 °C e 25,5°C, conforme a NBR 16.401 (2008) e um sistema de ar com eficiência A.

Adotou-se que os contêineres, não condicionados, teriam suas janelas abertas em caso de temperaturas interiores maiores que 20°C e maiores que as exteriores, durante os períodos de uso do teatro. A variável de saída da simulação foi o consumo de energia elétrica anual previsto para o sistema de HVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado). Para o sistema de iluminação artificial, adotou-se densidade de potência instalada igual a 15W/m², com lâmpadas de palco acesas em períodos de uso do teatro e da plateia durante período de entrada e saída de pessoas.

Foram realizadas 11 simulações para obter a solução mais eficiente e otimizada. Por fim, foi apresentada uma compatibilização com as soluções propostas para conforto acústico e desempenho termoenergético.

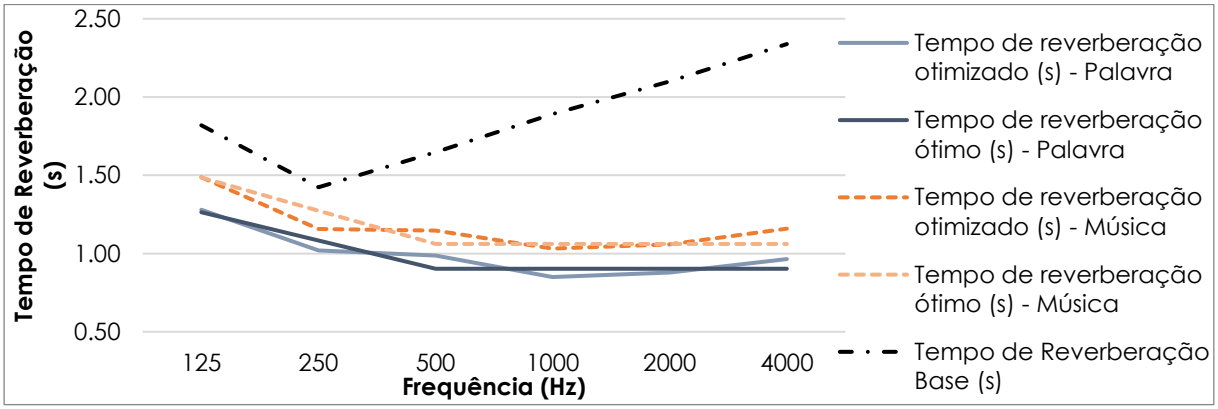
4 RESULTADOS

4.1 Condicionamento Acústico

Observou-se que a geometria do projeto base proporciona adequada distribuição sonora, sem a formação de pontos focais. A distribuição das ondas sonoras estava adequada devido à declividade da arquibancada (15%) e à elevação do palco (70 cm), conforme o recomendado por Egan (1988[2] apud SOLER, 2004). Assim, essas configurações foram mantidas nas propostas realizadas.

O palco e arquibancada de madeira e a plateia apresentam maior índice de absorção sonora, reduzindo o tempo de reverberação nas frequências mais baixas. Por outro lado, as superfícies internas do ambiente são predominantemente constituídas por componentes que apresentam baixo índice de absorção sonora, como o aço nas paredes e cobertura e o piso cimentado. Desta forma, o tempo de reverberação calculado para o projeto base foi caracterizado como inadequado ao uso para música e palavra, na maioria das frequências, conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 – Tempo de reverberação do projeto base e otimizado: música e palavra



Fonte: Os autores

[2] EGAN, M. D. **Architectural acoustics.** New York: McGraw-Hill, 1988. 411p.

Assim, buscou-se soluções que reduzissem o tempo de reverberação, focando em custo acessível e na flexibilidade para atender a ambos os usos, integrando também o isolamento acústico e térmico.

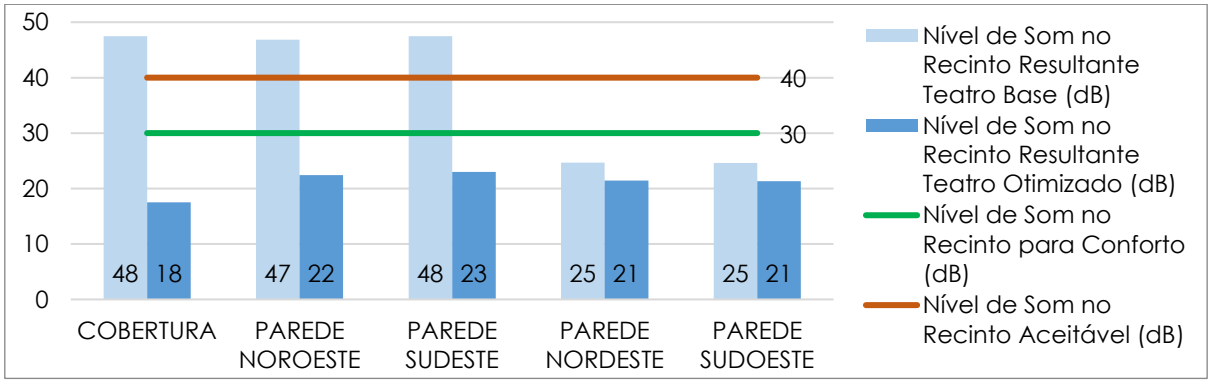
A área sob a arquibancada, que era vazada, foi fechada com chapas de madeira, o que reduziu a área de piso cimentado e o volume total do teatro, aumentando a absorção sonora. Como soluções flexíveis de acordo com o uso, adotou-se cortinas com tratamento antichamas de espessura leve e média nas paredes de fundo, palco e laterais, a fim de reduzir o efeito de reflexão sonora, podendo ser estendidas em caso de uso para palavra e retraídas em caso de uso para música. Os painéis do palco são giratórios com a intenção de permitir, dependendo da face voltada para a plateia, maior ou menor absorção sonora. As soluções propostas resultam em tempo de reverberação dentro do critério de aceitação para todas as frequências, conforme Gráfico 1.

4.2 Isolamento Acústico

Foi calculada a perda de transmissão sonora equivalente de cada vedação da área principal e observou-se que tanto a cobertura quanto as paredes noroeste/sudeste não atendem aos limites propostos pela NBR 10152 (ABNT, 1987). Já as paredes nordeste/sudoeste, cujos contêineres correspondem a 89% da área de vedação, apresentam adequada impedância acústica.

O Gráfico 2 mostra os níveis de som proporcionados pela perda de transmissão sonora equivalente de cada vedação para o teatro base e para o teatro com alterações, bem como o limite aceitável e o limite para conforto.

Gráfico 2 – Níveis de som resultante, aceitável e de conforto no teatro



Fonte: Os autores

Como alterações propostas para a otimização do isolamento acústico considerou-se o forro adotado como parte telha termoacústica e parte gesso, que em composição com a cobertura resultou em atenuação de 46dB e 50dB, respectivamente. Além disso, as portas de PVC foram trocadas por portas de madeira. A fim de melhorar o desempenho acústico das paredes noroeste/sudeste, adotou-se uma partição composta de duas camadas de telha sanduiche com vão de 7 cm entre elas e enchimento de lã de vidro, o que garantiria uma perda de transmissão sonora calculada de 45dB.

4.3 Análise Termoenergética - Pré-requisitos do RTQ-C

A Tabela 1 apresenta a classificação geral de cada pré-requisito, obtidos a partir da

ponderação por área para o projeto base e com alterações acústicas. Nota-se que, mesmo com os valores de absortância solar e de transmitância térmica da cobertura do teatro dentro dos limites aceitáveis para uma classificação A, os valores de transmitância térmica das paredes externas e cobertura dos contêineres atribuem ao projeto uma classificação E, mesmo após as alterações acústicas.

Tabela 1 - Avaliação dos pré-requisitos do projeto base e alterado para acústica

Pré-Requisito	Base		Alterado com adequações acústicas	
	Valor	Classi.	Valor	Classi.
Transmitância térmica da cobertura dos contêineres (Não condicionada) (W/m².K)	4,76	E	4,76	E
Transmitância térmica da cobertura do teatro (Condicionada) (W/m².K)	1,04	B	0,70	A
Transmitância térmica média ponderada das paredes externas (W/m².K)	4,22	E	3,97	E
Absortância solar média da vedação externo	0,27	A	0,27	A
Absortância solar média da cobertura	0,26	A	0,26	A

Fonte: Os autores

4.4 Consumo Energético

O consumo total anual de energia elétrica obtido para o projeto base através da simulação foi de 11.228,33 kWh, sendo 5% para aquecimento, 41,48% para refrigeração e 4,86% para ventiladores e o restante 49,24% para iluminação.

As soluções propostas para desempenho termoenergético priorizaram o mínimo de alteração possível na forma e materiais adotados em projeto, compatíveis com as soluções acústicas propostas, resultando nos onze modelos de casos de otimização simulados para a análise do impacto das soluções no consumo energético anual, apresentados na Tabela 2. Nela, B representa o caso base, A casos com alterações acústicas e E casos com alterações acústicas e térmicas.

Tabela 2 – Descrição dos casos de simulação

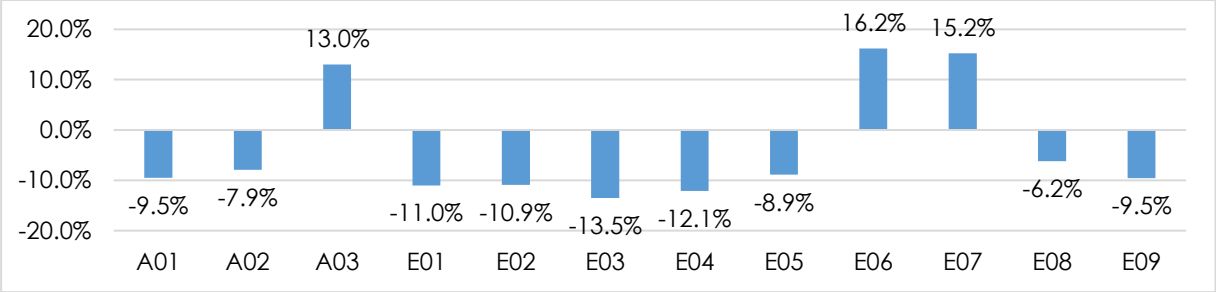
Caso	Descrição
B01	Configuração base, sem alterações.
A01	Criação do forro de telha termoacústica e de gesso no teatro; Paredes noroeste e sudeste duplas de telha termoacústica com enchimento de lã de vidro.
A02	A01 + Inserção de porta entre o teatro e antecâmara.
A03	A01 + Parede de interface entre teatro e contêineres em duas camadas de aço corten com câmara de ar confinado entre elas.
E01	A01 + Inserção de EPS e outra camada de aço na cobertura dos contêineres.
E02	A01 + Inserção de EPS, outra camada de aço e forro (criando câmara de ar).
E03	A01 + Pintura de cobertura de contêineres de branco
E04	E01 + Pintura de cobertura de contêineres de branco
E05	A01 + Aumento da espessura do piso dos contêineres para 5cm.
E06	A01 + Parede de interface entre teatro e contêineres em telha termoacústica.
E07	A01 + Todas as paredes dos contêineres em telha termoacústica.
E08	A01 + Paredes externas dos contêineres em telha termoacústica.

Fonte: Os autores

Dada a elevada carga térmica interna gerada pela ocupação do teatro, houve soluções que, ao aumentar a resistência térmica das interfaces do teatro com os contêineres, elevaram o consumo de energia elétrica, como os casos A03, E06 e E07.

Apesar das diferentes soluções apresentarem variação no consumo em relação ao projeto base, essa diferença varia apenas entre uma redução de 13,5% e um acréscimo de 16,2%, como observado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Variação no consumo de energia elétrica em relação ao caso base

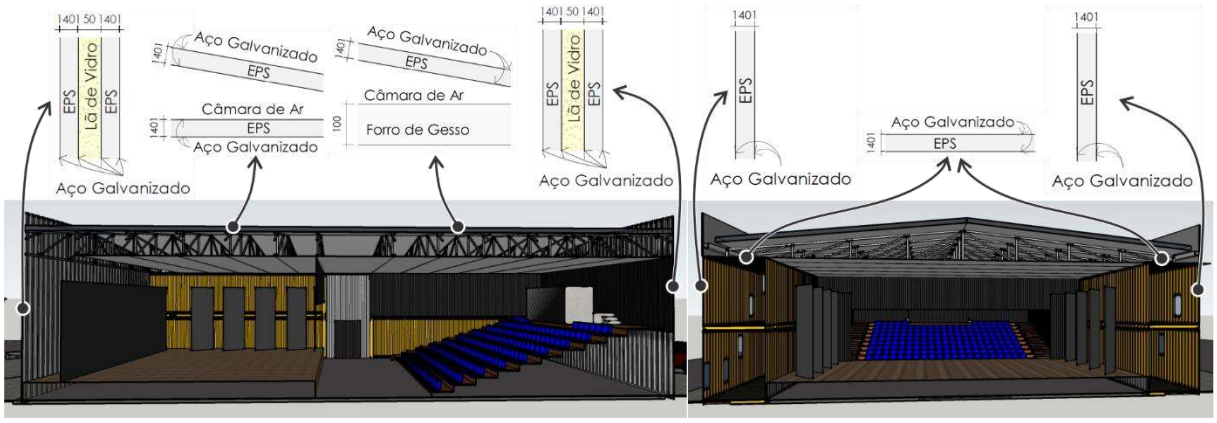


Fonte: Os autores

Dos casos propostos, o caso E03 apresentou a maior redução de consumo energético, mas a transmitância térmica de suas paredes e cobertura ultrapassam os limites requeridos. As seguintes maiores reduções se deram pelos casos E04 e E01, que tiveram transmitância térmica superior à limite somente nas paredes.

Por isso, optou-se por propor o caso E09, que acrescenta o isolamento das paredes externas dos contêineres com telha termoacústica ao caso E04 para reduzir a transmitância térmica das paredes externas, como representa o corte esquemático da Figura 3. Com isso, o caso E09 proporcionou menor redução do consumo de energia que outros casos, conforme a análise energética realizada nesta pesquisa, mas atendeu aos pré-requisitos da classificação A da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C.

Figura 3 – Corte esquemático do teatro com alterações do caso E09



Fonte: Os autores

5 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou o desempenho termoenergético e acústico da área principal do teatro da Funcart, construído com contêineres. Ao se avaliar as soluções propostas para a otimização dos desempenhos acústico e termoenergético do

teatro, foi possível observar soluções convergentes e conflitantes.

Configurações propostas para favorecer o tempo de reverberação no interior do teatro foram também positivas para o isolamento acústico e térmico. Além disso, as paredes noroeste e sudeste com lã de vidro entre telhas termoacústicas, não só otimizaram o isolamento acústico como também contribuíram para a redução da transmitância térmica. A adoção da parede dupla de chapa de aço galvanizado com vão entre os contêineres e o teatro, por sua vez, apesar de garantir isolamento acústico adequado, resultaria no aumento do consumo do sistema HVAC devido à elevada carga térmica interna.

Desta forma, destaca-se que a adoção de cobertura leve e refletora, com forro e sem isolantes, combinada com paredes externas isoladas foi uma solução adequada, do ponto de vista termoacústico, para ambientes com elevada carga térmica interna. Por fim, observa-se que o uso de contêineres para a construção de um teatro é possível desde que sejam adotadas medidas sugeridas para sua implementação.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.151:** Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000. 4 p.

_____. **NBR 10.152:** Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 1987. 4 p.

_____. **NBR 12.179:** Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro, 1992. 9 p.

_____. **NBR 15220-2:** desempenho térmico das edificações – parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005

_____. **NBR 15220-3:** desempenho térmico das edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de janeiro, 2005.

_____. **NBR 16.401-2:** Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008. 11 p.

AZEVEDO, V. S. ; COSTA, R. A.; ROCHA; R. C. **Edificações Sustentáveis Compostas por Sistemas Construtivos Modulares em Aço** - Utilização de Contêineres para Construção de Polos Educacionais Universitários. In: Construmetal 2016 , São Paulo, SP, Brasil.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE **Construção Sustentável**. Disponível em: https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/planejamento-ambiental-e-territorial-urbano/urbanismo-sustentavel/item/8059.html. Acesso em: 10 de junho de 2019.

COSTA, Ennio Cruz da. **Acústica Técnica**. 1ªed. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 2003. 127p.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, P. **Acústica Arquitetônica**. Belo Horizonte: Edições Engenharia e Arquitetura, 1971.

SJOSTROM, E. Service life of the building. In: **Application of the performance concept in building**. CIB: Tel Aviv, 1996, v.2, p.6-1;6-11.

SOLER, Carolina. **Contribuição ao Processo de Projeto de Auditórios**: Avaliação e Proposta de Procedimento. 2004. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.