



Compósito Termo-Acústico de Resíduo da Indústria de Celulose

Igor Labre dos Santos^{1*}
Lutembergue Barbosa Sobrinho²
André Luis de Oliveira Cavaignac³
George Santos Marinho⁴
André Salgado de Andrade Sandim¹

¹Doutorando na Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro-UTAD-Portugal, Quinta de Prados, Vila Real.

²Universidade Ceuma-Campus Imperatriz-MA, Rua Barão do Rio Branco, q. 12, nº 100, Maranhão Novo - IMPERATRIZ MA – 65903093

³Universidade Ceuma-Campus Imperatriz-MA, Universidade Federal do Maranhão-Campus Imperatriz-MA, Faculdade Vale do Aço-Campus Açailândia, Rua Barão do Rio Branco, q. 12, nº 100, Maranhão Novo - IMPERATRIZ MA – 65903093

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Salgado Filho, 3000 – Campus Universitário – NATAL RN - 59078970.

*igorlabres@gmail.com

(Recebido em 04/09/2019; revisado em 17/02/2020; aceito em 13/04/2020)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Rejeitos de uma indústria de celulose foram utilizados para produzir placas termo acústicas. Dois tipos de aglutinantes serviram para agregar o material celulósico. Um analisador térmico (Decagon Devices – KD2 Pro / Sonda SH-1) e um decibelímetro marca Homis H304-001 foram empregados respectivamente para medições de propriedades térmicas e acústicas, respectivamente. Uma câmara de isolamento térmica acondicionou corpos de prova cilíndricos submetidos às análises de propriedades térmicas. Um emissor de onda sonora foi montado no interior de uma caixa com isolamento acústica para realização dos ensaios com os corpos de prova em forma de placas. Os resultados obtidos foram comparados aos dados de propriedades térmicas e acústicas do EPS e do gesso. Constatou-se que o compósito desenvolvido apresentou desempenho semelhante ao de materiais convencionais, podendo vir a ser empregado na construção civil com a vantagem de reduzir o passivo ambiental associado ao EPS e ao gesso.

Palavras-chave: Rejeito de celulose, Sustentabilidade, Construção civil, Placa termo acústica.

Abstract:

Waste from a pulp industry was used to produce thermo-acoustic plates. Two types of binders served to aggregate the cellulosic material. A thermal analyzer (Decagon Devices - KD2 Pro / Probe SH-1) and a decibelmeter brand Homis H304-001 were used respectively for measurements of thermal and acoustic properties, respectively. A thermal insulation chamber packed cylindrical specimens submitted to the thermal analysis properties. A sound wave emitter was mounted inside an acoustic-insulated box to carry out tests with specimens in the form of plates. The results obtained were compared to the data on thermal and acoustic properties of EPS and plaster. It was found that the composite developed presented a performance similar to that of conventional materials and may be used in civil construction with the advantage of reducing the environmental liabilities associated with EPS and plaster.

Keywords: Cellulose reject, Sustainability, Construction, Thermo acoustic plate.

1. Introdução

A construção civil é classificada entre as atividades humanas que mais causam impacto ambiental. Entretanto, ela também consta como uma das que possuem maior potencial para aproveitamento de rejeitos da indústria. No Maranhão, rejeitos produzidos pela indústria de celulose na cidade de Imperatriz são majoritariamente descartados em aterros sanitários. Trata-se de material com significativo potencial econômico. Como matéria prima da indústria de

celulose, a madeira é um recurso biodegradável e renovável, podendo ser produzida em fazendas com manejo ecológico, i. e., replantio de espécimes. Contudo, as sobras provenientes do processamento da celulose, em geral, são descartadas diretamente na natureza.

O descarte do resíduo da indústria de celulose em aterros sanitários traz problemas ambientais devido à ocupação de espaço físico. O reaproveitamento é limitado à questão econômica associada aos gastos com coleta e transporte. Em indústrias onde as sobras de produção não implicam em risco ambiental, a

reutilização pode representar significativa economia de matéria prima, especialmente quando o resíduo pode ser diretamente reinserido no processo produtivo. Há ainda categorias de resíduos que podem ser reaproveitados em outros setores.

No presente trabalho considerou-se a possibilidade de reaproveitamento do resíduo da indústria de celulose para produzir um compósito termo acústico visando aplicações na construção civil, possivelmente na produção de placas para moldagem de vigas e colunas ou fabricação de divisórias, portas e janelas de habitações, através de testes de isolamento acústico e térmico, uma vez que, divisórias internas não requisitam função estrutural.

2. Referencial teórico

Agopyan e John [1] consideram que o desafio da sustentabilidade está na procura de equilíbrio entre a proteção ambiental, justiça social e viabilidade econômica, onde todos envolvidos na cadeia produtiva devem buscar formas de diminuir o impacto ambiental e promover a legitimidade social dentro do orçamento disponível.

Ferreira [2] afirma que a sustentabilidade engloba diversos aspectos sociais, econômicos e ambientais de forma contínua, sendo necessário valorizar o estudo de impacto para que, dessa forma, as empresas possam reduzir os riscos ambientais, identificando-os e gerenciando-os de maneira a atingir um desenvolvimento sustentável.

Conforme estabelecido nos itens I, IV e VI do Artigo 7º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituído pela Lei nº 12.305, de 2010, a indústria deve buscar:

I – a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;

IV – adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;

VI – incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

Para instituir um sistema de gestão ambiental, uma empresa deve conhecer profundamente o caminho da matéria prima utilizada no processo produtivo, desde a extração até o retorno à natureza. Em seguida, é necessário adotar normas, planos de ação, garantias de cumprimento dos objetivos, processos de avaliação e revisão do sistema de gestão.

A adoção de um sistema de gestão ambiental fundamentado em normas internacionais reduz custos e riscos e, conseqüentemente, aumenta a competitividade da empresa [3]. Porém, antes disso, é necessário atender às normas vigentes no país onde a empresa se encontra

estabelecida. Obviamente, há vantagens quando normas locais e internacionais estão em conformidade.

No Brasil, as normas de gestão ambiental são elaboradas pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, em conformidade com a ISO – *International Organization for Standardization*, Norma nº 14001[4], que estabelece responsabilidades, procedimentos, práticas, processos e recursos que devem constar no sistema de gestão ambiental a ser adotado pela empresa [5].

Na NBR ISO 14001 [4], em seu Artigo 5.2, Itens a, b, c, d, e, recomenda-se a política ambiental a ser adotada por uma empresa:

- a) *seja apropriada ao propósito e ao contexto da organização, incluindo a natureza, escala e impactos ambientais das suas atividades, produtos e serviços;*
- b) *proveja uma estrutura para o estabelecimento dos objetivos ambientais;*
- c) *inclua um comprometimento com a proteção do meio ambiente, incluindo a prevenção da poluição e outro(s) compromisso(s) específico(s) pertinente(s) para o contexto da organização;*
- d) *inclua um comprometimento em atender os seus requisitos legais e outros requisitos;*
- e) *inclua um comprometimento com a melhoria contínua do sistema de gestão ambiental para aumentar o desempenho ambiental.*

Para Andrade e Medeiros [6], quando reutilizáveis, os rejeitos podem proporcionar benefícios diretos à sociedade, permitindo concomitância entre a redução do descarte e a geração de matéria-prima para atender à cadeia produtiva.

Na construção civil, é possível reutilizar materiais pós-consumo para reduzir custos e impacto ambiental. Nos casos onde não pode ser reaproveitado pela própria indústria geradora do resíduo, é possível diversificar o leque de empreendimentos da empresa, destinando suas sobras a outros setores produtivos.

2.1 A Indústria de Papel e Celulose

De acordo com a IBÁ [7], a indústria de papel e celulose se destaca no cenário nacional por ser um dos ramos mais produtivos. A vasta disponibilidade de terras para plantio, o clima apropriado e o baixo custo da mão de obra contribuíram para que, em 2012, o Brasil se tornasse o terceiro maior produtor mundial de celulose [8].

Fonte renovável de matéria prima, a madeira pode ser encontrada em abundância na natureza, tendo como principais aplicações o uso energético, a produção de papéis e a construção civil. Para produção de celulose e papel, a polpa da madeira passa pelo processo de branqueamento mediante cozimento. É ao fim desse

processo que são gerados expressivos volumes de resíduos [9].

Em outra fase do processamento da madeira, rejeitos de nós e palitos constituem parcela não cozida durante a fabricação da celulose. Contendo álcali ativo com pH e teor de sódio elevados, esse resíduo não proporciona pega ou impregnação adequadas à produção de celulose, sendo separado da polpa celulósica e descartado [10].

No Brasil, em 2016, foram produzidos 18,8 milhões de toneladas de resíduos provenientes do processo de extração da polpa celulósica [7]. Já em 2018 o Brasil produziu 21,1 milhões de toneladas de resíduos provenientes do processo de extração da polpa celulósica. As alternativas utilizadas para diminuir os resíduos provenientes deste material, são o uso como fonte energética, a reutilização no processo de extração de celulose na caldeira e pôr fim a destinação nos aterros sanitários [11]. Rejeitos de nós e palitos representam entre 0,4 e 1% da massa de polpa celulósica seca produzida [10]. Percebe-se, portanto, o montante do passivo ambiental associado à atividade, assim como seu potencial econômico.

2.2 Painéis Arquitetônicos

Painéis de drywall são placas compostas internamente por gesso e externamente por material impermeável à água. Graças às características de leveza, resistência, propriedades termo acústicas e, principalmente, baixo custo, possuem ampla e crescente aplicação na construção civil em substituição à alvenaria convencional [12].

Painéis arquitetônicos são amplamente utilizados na construção civil e podem ser produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos. Dependendo do processo de produção, podem apresentar alta resistência à compressão [13]. Resíduo lignocelulósico da fibra de bananeira foi utilizado na produção de painéis arquitetônicos, tendo sido aprovado em testados de verificação da capacidade de isolamento acústica e inflamabilidade [14].

Gerado em quantidades expressivas no Brasil, a casca do arroz é um resíduo agrícola com grande potencial para uso na produção de painéis destinados à construção civil. Seu elevado teor de dióxido de silício proporciona alta resistência à biodegradação [13].

2.3 Isolação Acústica

A espessura e o fator peso / área determinam o grau de isolamento acústico dos elementos de separação, como paredes, placas drywall ou pisos [15,16]. Na Norma ABNT NBR 10151 são estabelecidos os métodos de medição do ruído em função do nível de pressão sonora equivalente, em decibel – dB(A), e estabelecidos os requisitos para verificação do ruído independente de fatores externos, como reclamações [16].

Os níveis de ruídos são estimados através da Equação 1 [6]:

$$L_{AEq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

L_{AEq} – nível de pressão sonora equivalente, em dB (A)

L_i – nível de pressão sonora, em dB (A), identificado em resposta rápida (5s), durante o procedimento de medição de ruído

n – número de leituras realizadas.

Níveis de ruído adequados ao conforto acústico em função do tipo de ambiente estão estabelecidos na NBR 10152 [17]. Nela, ainda se define que a pressão sonora ponderada deve ser determinada por meio do circuito ponderado A, para melhor aferição de desempenho quanto a verificação do ruído, conforme especificações do *International Electrotechnical Commission* (IEC) 651. Com base nessas especificações, na NBR 10152 [17] o nível de pressão sonora ponderado L_{PA} , pode ser definido pela Equação 2:

$$L_{PA=10} \log_{10} \left(\frac{P_A}{P_0} \right)^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

L_{PA} – nível de pressão sonora ponderado (db)

P_A – pressão ponderada em (Pa)

P_0 – pressão sonora de referência

2.4 Propriedades Térmicas

Entre as propriedades que permitem analisar a eficiência de isolamento térmica de materiais, algumas são básicas, como: resistividade, capacidade calorífica, condutividade e difusividade. É importante enfatizar que essas constituem apenas uma pequena fração do conjunto de variáveis que determina a escolha do material adequado a uma dada aplicação. Evidentemente, em se tratando da construção civil, o fator econômico é preponderante.

A taxa de transferência de calor por condução térmica através de uma superfície é obtida por meio da relação de Fourier – Biot, a partir da Equação 3:

$$\dot{Q}_k = -\kappa A \left(\frac{dT}{dx} \right)_x \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

\dot{Q}_k – taxa de transferência de calor (W)

κ – coeficiente de condutividade térmica (W/m.K)

A – área da superfície transversal ao fluxo de calor (m^2)

$\left(\frac{dT}{dx} \right)_x$ – gradiente de temperatura perpendicular à superfície ($^{\circ}C/m$)

O coeficiente de condutividade térmica (κ) pode ser obtido a partir de da Equação 3, sendo dado pela Equação 4:

$$\kappa = q_{\kappa} \left(\frac{dx}{dT} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo “ q_k ” ($= Q/A$) o *fluxo de calor* através da superfície (W/m^2). O *coeficiente de resistividade térmica* (r , em $m.K/W$) é definido como o recíproco da condutividade térmica, ou seja, como demonstrado na Equação 5:

$$r = \frac{1}{\kappa} \quad (\text{Eq. 5})$$

Substituindo-se a Equação 4 na Equação 5, resulta na Equação 6:

$$r = \frac{1}{q} \left(\frac{dT}{dx} \right)_x \quad (\text{Eq. 6})$$

A partir da Equação 6, define-se a propriedade resistividade térmica (R_T), que traduz a capacidade do material em transferir calor em função da diferença de temperatura entre suas faces quando sujeito a um fluxo de calor perpendicular à superfície, sendo matematicamente expresso pela Equação 7:

$$R_T = r \left(\frac{L}{A} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo L (m) a espessura do material.

A capacidade calorífica (C , em J/K) é o parâmetro que permite quantificar a energia necessária para produzir uma diferença de temperatura de $1^\circ C$ em 1 kg de um dado material quando este é exposto a uma fonte de calor constante. É expresso matematicamente pela Equação 8:

$$C = m \cdot c_p \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo c_p ($J/kg.K$) o calor específico a pressão constante. A partir da definição de massa específica de uma substância (ρ , em kg/m^3), a partir de (8) obtêm-se a expressão do parâmetro definido como capacidade calorífica volumétrica ($\rho \cdot c_p$, em $J/m^3.K$), expresso pela Equação 9:

$$\rho \cdot c_p = \frac{C}{V} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo V (m^3) o volume da amostra do material.

Considere-se uma amostra de material inicialmente a $100^\circ C$. Se uma das faces da amostra for colocada em contato com um meio a $0^\circ C$, o tempo necessário para que seu ponto central atinja $50^\circ C$ permite quantificar o parâmetro denominado difusividade térmica (α , em cm^2/s), de acordo com Ozisik [18], sendo expresso pela Equação 10:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho \cdot c_p} \quad (\text{Eq. 10})$$

Segundo Rouver [19], essa propriedade traduz a relação entre as capacidades de transferência e

armazenagem de energia pelo material. Assim, quanto maior a difusividade térmica, mais rápida é a variação de temperatura do material.

3. Material e procedimentos

Os testes de desempenho termo acústico do compósito celulósico foram realizados utilizando-se infraestrutura disponível em laboratórios de instituições de ensino superior – Universidade CEUMA / Campus Imperatriz – MA, e Universidade Federal do Rio Grande do Norte / Campus Natal – RN.

3.1 Fabricação dos Corpos de Prova

O rejeito celulósico de nós e palitos, proveniente do cozimento da polpa celulósica, foi obtido em indústria localizada em Imperatriz – MA. O resíduo foi separado homogeneamente utilizando-se peneira granulométrica com mesh ABNT 1.4. Foram utilizados dois tipos de aglutinantes: cola branca e farinha de trigo; com proporção de 30 % da massa da amostra. Após o processo de aglutinação, o material foi prensado com carga simples e deixado para curar durante 24 horas dentro do cilindro metálico, que após esse tempo foi retirado a umidade em uma estufa de secagem a $50^\circ C$. Foram produzidas 1 placa retangular de compósito celulósico e 1 placa de EPS, ambas com dimensões $17,0$ cm e $27,0$ cm de lado e 2 cm de espessura.

Uma prensa hidráulica foi utilizada para moldagem dos corpos de prova cilíndricos, destinados às medições de propriedades térmicas. Foram produzidos 8 cilindros, com $5,0$ cm de diâmetro de $5,0$ cm de altura (Figura 1). Uma forma com dimensões $60,0$ cm, $40,0$ cm e 2 cm de espessura foi utilizada para moldagem dos corpos de prova em formato de placa, para análise de propriedades acústicas. As moldagens foram realizadas no Laboratório Rad Segurança e Medicina do Trabalho, da Universidade CEUMA.



Figura 1 - Amostras de corpos de prova de compósito de rejeito lignocelulósico. Fonte: Autor (2019).

3.2 Câmara Para Testes Acústicos

Recomendações de Amorim [20] serviram para conduzir os testes de desempenho acústico.

Foram construídas duas caixas com seções transversais retangulares, de lado de $17,0$ cm e comprimento de $27,0$ cm. No teste acústico foi instalado o emissor sonoro bluetooth a prova d'água nas caixas de

compósito celulósico e EPS, enquanto o decibelímetro ficou posicionado a 40 cm da fonte emissora sonora, para a detecção de onda sonora (Figura 2).



Figura 2 - Caixa com posicionado com a distância para o decibelímetro. Fonte: Autor (2019).

Realizaram-se ensaios preliminares para calibração do dispositivo de testes acústicos. O emissor (caixa de som) e o receptor (decibelímetro) foram montados com separação de 40,0 cm no interior do dispositivo. A caixa de som foi conectada via bluetooth por meio do aplicativo High Frequency Sounds, produzidas ondas com níveis específicos de pressão sonora equivalente (L_{eq}), permitindo a calibração do dispositivo. Ainda sem corpo de prova entre as câmaras emissora e receptora, foram emitidas ondas com frequências sonoras de 1.000 Hz, 3.500 Hz e 5.000 Hz, com duração de 10 segundos cada, sendo realizadas 25 medições para obtenção de valores médios para cada frequência.

3.3 Testes de Propriedades Térmicas

Os procedimentos recomendados por Azevedo [21] foram adotados durante os testes de desempenho térmico realizados no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Utilizou-se o analisador térmico KD2 Pro (Decagon Devices, Inc.) com sonda SH-1 para medição de propriedades térmicas (condutividade, difusividade, resistividade e capacidade calorífica) dos corpos de prova cilíndricos (Figura 3).



Figura 3 – Dispositivos utilizados para medição de propriedades térmicas. Fonte: Autor (2019).

4. Resultados e discussão

Os dados obtidos nos experimentos foram inseridos em planilhas eletrônicas para tabulação, obtenção média, variância, teste estatístico t de Student e comparação de médias com 95% de confiabilidade. Para evidenciar a diferença entre valores médios dos dados do compósito e do EPS por meio do teste t de Student, foram montadas tabelas com valores das repetições, separando-se os testes acústicos pelas frequências. Já nos testes de desempenho térmico, consideraram-se os dados obtidos das quatro propriedades térmicas (κ , α , r e $\rho \cdot c_p$).

4.1 Teste de Isolação Acústica

Utilizando o teste t de Student, obteve-se o valor de 0,023 para os dados apresentados no Figura 4, onde a diferença de média entre os materiais foi menor que 0,05. Na análise estatística do teste t de Student, conforme apresentado na Tabela 1, utilizou-se o valor médio de $L_i = 75,68$ dB para os dois corpos de prova e diferentes L_f para as placas, comprovando desta forma a diferença de média entre ambos os materiais, já que apresentaram $L_f = 74,12$ dB para o EPS e $L_f = 76,64$ dB para o compósito. Ficou evidente o melhor desempenho do EPS em relação ao compósito celulósico. Por apresentar mais espaços vazios no interior da sua estrutura, o EPS proporciona melhor isolação acústica em frequências mais graves em relação às frequências mais agudas.

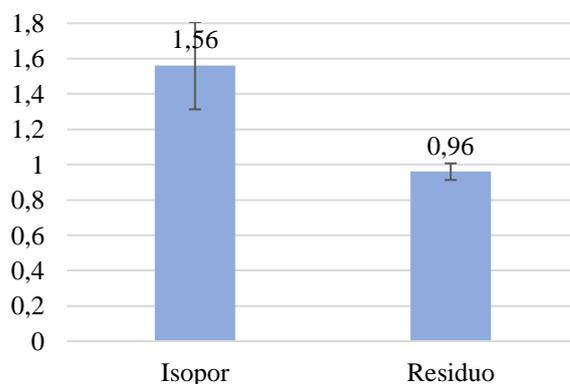


Figura 4 – Níveis de redução acústica na frequência de 1.000 Hz. Fonte: Autor (2019).

Tabela 1 – Valores médios dos ensaios realizados com frequência de 1.000 Hz

	ρ g/cm ³	L_i dB	MÉDIA (L_f) dB
Isopor (ESP)	0,0139	75,68	74,12
Resíduo Celulósico	0,5439	75,68	76,64

Fonte: Autor (2020).

Segundo Santos Neto [22], quanto menor for a frequência da onda sonora que incide no material isolante acústico, menor será o índice de atenuação da onda

sonora. Reciprocamente, quanto maior for a frequência da onda incidente, maior será a redução proporcionada.

De acordo com a ABRAPEX [11] o poliestireno expandido utilizado na construção civil apresenta massa específica (ρ) com valores que variam entre 0,013 g/cm³ a 0,025 g/cm³, tendo cerca de 97% de ar em sua constituição. O EPS utilizado no presente estudo tem $\rho = 0,0139$ g/cm³, enquanto o resíduo celulósico tem $\rho = 0,5439$ g/cm³. Utilizando o teste t de Student, obteve-se o valor de $7,1505 \times 10^{-20}$. Atribuiu-se a significativa diferença dos níveis de atenuação acústica observado na frequência de 1.000 Hz à diferença entre as massas específicas dos dois tipos de material.

Para os ensaios realizados com frequência de 3.500 Hz, obteve-se 0,0048 no teste t de Student, sendo a diferença média entre os materiais inferior a 0,05. A Tabela 2 apresenta a análise estatística do teste t de Student, onde utilizou-se o valor médio de $L_i = 83,04$ dB para ambos corpos de prova e $L_f = 76,075$ dB para o EPS e $L_f = 74,904$ dB para o compósito. A estrutura mais compacta do compósito, com menos espaços vazios, proporcionou maior atenuação da onda sonora com frequência de 3.500 Hz, onde a partir do Figura 5, nota-se que o compósito celulósico apresentou nível de redução acústica superior ao EPS.

Tabela 2 – Valores médios dos ensaios realizados com frequência de 3.500 Hz

	ρ g/cm ³	L_i dB	MÉDIA (L_f) dB
Isopor (ESP)	0,0139	83,04	76,075
Resíduo Celulósico	0,5439	83,04	74,904

Fonte: Autor (2019).

De acordo com Poll [23], frequências mais agudas permitem maior atenuação que as frequências mais graves, pois quanto maior a massa específica do isolante e quanto maior a frequência incidente, tanto maior será a resistência à propagação do som nesse meio, uma vez que o comprimento de onda diminui de acordo com o aumento da frequência incidida. Isso explica o melhor desempenho do compósito celulósico quando comparado ao EPS.

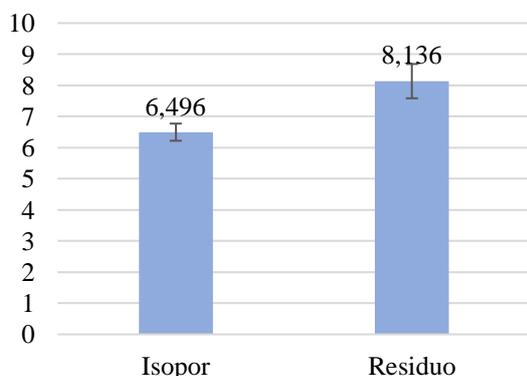


Figura 5 – Níveis de redução acústica na frequência de 3.500 Hz. Fonte: Autor (2019).

Determinou-se um valor de 2×10^{-11} no teste t de Student, portanto, inferior a 0,05, para os ensaios com frequência de 5.000 Hz. A Tabela 3 demonstra a análise estatística do teste t de Student, onde foi utilizado o valor médio de $L_i = 80,315$ dB para ambos corpos de prova e

$L_f = 72,515$ dB para o EPS e $L_f = 70,171$ dB para o compósito. Na Figura 6 é possível observar que, como no caso anterior onde foi utilizado uma frequência de 3.500 Hz, o compósito proporcionou um nível de redução da onda acústica superior ao EPS. Este desempenho do compósito em relação ao EPS na frequência de 5.000 Hz, pode ser atribuído à estrutura mais compacta daquele.

Tabela 3 – Valores médios dos ensaios realizados com frequência de 5.000 Hz

	ρ g/cm ³	L_i dB	MÉDIA (L_f) dB
Isopor (ESP)	0,0139	80,315	72,515
Resíduo Celulósico	0,5439	80,315	70,171

Fonte: Autor (2019).

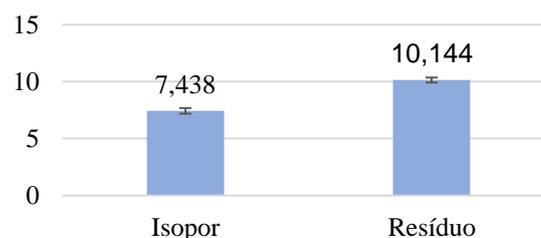


Figura 6 – Níveis de redução acústica na frequência de 5.000 Hz. Fonte: Autor (2019).

4.2 Propriedades Térmicas

Na Tabela 4 consta todos os resultados das análises estatísticas realizadas através do teste t de Student. Os valores das capacidades caloríficas foram utilizados nos cálculos de t de Student, resultando nos seguintes valores: 0,94289 resíduo aglutinado com cola branca; 0,22101 resíduo aglutinado com farinha de trigo e 0,000130748 gesso. Desse modo, foi possível constatar similaridades entre as médias das capacidades caloríficas desses materiais, uma vez que o valor apresentado pelo teste foi menor que 0,05.

Os valores médios obtidos para ρ foram: 0,5433 g/cm³ em amostras com cola branca, 0,715g/cm³ em amostras com farinha de trigo e 2,366 g/cm³ em amostras com gesso. Por meio do teste t de Student, foram obtidos os seguintes valores: $4,501 \times 10^{-11}$ entre o compósito com cola branca e com farinha de trigo; $9,479281 \times 10^{-10}$ entre o resíduo com cola branca e o gesso; e $3,765831 \times 10^{-11}$ entre o resíduo com farinha de trigo e o gesso. Assim, pode-se associar essas diferenças às diferenças entre os valores de ρ dos materiais.

Através do Figura 7 é possível identificar que mesmo com a diferença de massa específica entre os corpos de prova o desempenho de capacidade calorífica

dos corpos de prova de resíduo celulósico fora similar, contrariando desta forma portanto, a expectativa de que ρ é fator determinante para o desempenho desta variável térmica.

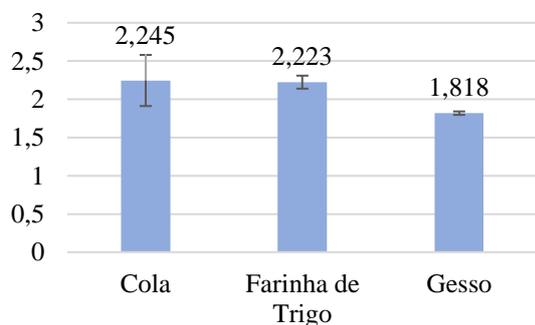


Figura 7 – Estimativa da capacidade calorífica volumétrica, $\rho \cdot c_p$ [MJ/(m³.K)]. Fonte: Autor (2019).

Em comparação ao gesso, o material do rejeito (nós e palitos) requer mais energia para aumentar sua temperatura. Logo, será necessário mais calor para aumentar a temperatura dos compósitos que levam o resíduo celulósico em sua composição, assim como também será necessário mais tempo as placas de compósito em comparação às placas de gesso.

Observa-se a partir do Figura 8 que, apesar da diferença de aglutinantes, os compósitos tiveram valores de α muito próximos, indicando que, nas proporções utilizadas, não há influência significativa nos resultados. Para comprovar essa afirmação, utilizou-se o teste t de Student, que resultou nos seguintes valores: 0,144664 entre o compósito com cola branca e farinha de trigo, $2,5974 \times 10^{-20}$ entre o compósito com cola branca e o gesso e $1,15052 \times 10^{-20}$ entre o compósito com farinha de trigo e o gesso. Dessa forma, há similaridade de média entre os resíduos e diferença de média de ambos em relação ao gesso, já que o valor apresentado pelo teste foi maior que 0,05 e menor que 0,05 respectivamente.

Como Rouver [19] explica, α caracteriza a quantidade de energia térmica que um certo material conduz quando submetido à uma dada variação de temperatura. Logo, quanto maior a difusividade térmica, menor será o tempo de variação da temperatura no interior do material em relação ao ambiente. Portanto, independente do aglutinante, o rejeito tem maior capacidade de isolamento térmica que o gesso, pois apresenta menor difusividade térmica e com isso menor variação de temperatura no interior da sua estrutura.

Tabela 4 – Resultados das análises estatísticas através do teste t de Student

	Cola branca/ Farinha de trigo	Cola branca/ Gesso	Farinha de trigo/ Gesso
Capacidade Calorífica ($\rho \cdot c_p$)	$4,501 \times 10^{-11}$	$9,479281 \times 10^{-10}$	$3,765831 \times 10^{-11}$
Difusividade Térmica (α)	0,144664	$2,5974 \times 10^{-20}$	$1,15052 \times 10^{-20}$
Resistividade Térmica (r)	0,457964	$1,5995 \times 10^{-11}$	$1,24365 \times 10^{-15}$
Condutividade Térmica (κ)	0,840084	$2,5014 \times 10^{-17}$	$2,70595 \times 10^{-21}$

Fonte: Autor (2019).

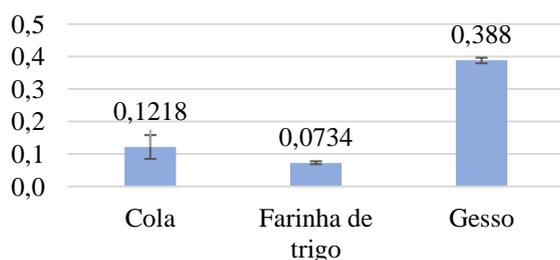


Figura 8 – Estimativa da difusividade térmica, α (m²/s). Fonte: Autor (2019).

Para as estimativas dos testes de resistividade térmica demonstradas através do Figura 9, aplicou-se o teste t de Student, obtendo-se: 0,457964; $1,5995 \times 10^{-11}$; e $1,24365 \times 10^{-15}$ entre os resíduos, entre o resíduo com cola branca e o gesso e entre o resíduo com farinha de trigo e o gesso, respectivamente, indicando similaridade entre os resíduos e diferenças em relação ao gesso, já que o valor apresentado pelo teste foi respectivamente maior que 0,05 e menor 0,05.

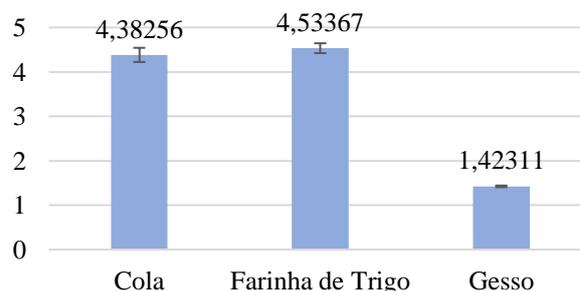


Figura 9 - Estimativas dos testes de resistividade térmica (K.cm/W). Fonte: Autor (2019).

Azevedo [21] destaca que, como a resistividade térmica (r) é diretamente proporcional à capacidade de isolamento térmica. Conseqüentemente, essa propriedade está diretamente ligada a resistência térmica (R_T). Por isso, quanto maior o valor de r , maior será a capacidade de isolamento térmica proporcionada.

Em relação aos testes realizados para estimar a condutividade térmica das amostras estudadas, realizou-se a aplicação do teste t de Student, e foram obtidos os seguintes valores: 0,840084; $2,5014 \times 10^{-17}$ e $2,70595 \times 10^{-21}$, entre os resíduos celulósicos, entre o resíduo com cola branca e o gesso e entre o resíduo com farinha de trigo e o gesso, respectivamente. Percebe-se que houve similaridade entre os resíduos e diferença entre os resíduos e o gesso, já que os valores apresentados pelo teste foram, respectivamente, maior que 0,05 e menor 0,05.

De acordo com Cardoso [24], como a condutividade térmica define a capacidade do material em conduzir calor, materiais com menores valores de κ são classificados como melhores isolantes térmicos. Analisando-se o Figura 10 fica evidente que os compósitos com rejeitos de nós e palitos apresentam maior capacidade de isolamento térmica quando comparado ao gesso, pois apresentam menores valores de κ .

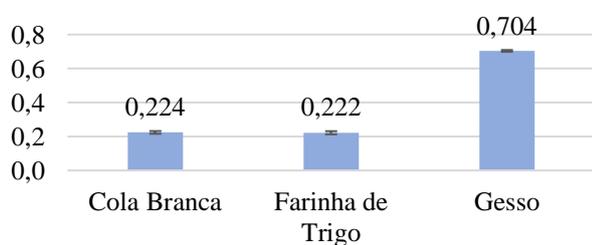


Figura 10 – Estimativa da condutividade térmica, κ (W/m.K). Fonte: Autor (2019).

5. Conclusões

Foi possível constatar experimentalmente que os compósitos produzidos a partir de rejeitos de nós e palitos apresentaram propriedades térmicas e acústicas que os tornam passíveis de aplicação na construção civil.

Os resíduos celulósicos apresentados anteriormente se caracterizam se por ser uma estrutura porosa no seu interior, fazendo com que tenha a capacidade de reverberar as ondas sonoras no interior da sua estrutura, e ao mesmo tempo diminuir a transmissão de calor de um meio para o outro, impulsionando desta maneira a sua capacidade de isolamento.

Foi possível concluir que os resíduos possuem capacidade de compactação muito boa, características observada através da aplicação dos aglutinantes empregados, que por sua vez, não apresentaram diferenças significativas entre os valores das propriedades dos dois tipos de compósitos no que diz respeito ao tipo de aglutinante utilizado (cola branca e farinha de trigo).

Na avaliação do desempenho do isolamento acústico, utilizou-se o EPS para comparar o desempenho do resíduo celulósico. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que, para frequências mais agudas (3.500 Hz e 5.000 Hz), os compósitos proporcionaram melhor isolamento acústica que o EPS.

No desempenho de isolamento térmico, definiu-se que os rejeitos de nós e palitos apresentaram capacidade de isolamento superior ao gesso, e que sua estrutura porosa permite a utilização deste material como alternativa para as divisórias internas já empregadas em larga escala.

Desta forma, considerando que sua destinação final tem fins pouco nobre e que este material apresentou desempenho superior aos convencionais, o reaproveitamento destes rejeitos é muito interessante para a construção civil, visto que o compósito pode trazer vantagens comerciais se fizer uso do aspecto de redução do impacto ambiental, tendo em vista que contribui para reduzir o descarte de resíduos no ambiente.

Referências

- [1] Agopyan, V.; John, V.N. O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil. Vol. 5. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda; 2011. 22-23.
- [2] Ferreira, D. S. Conceito de gestão ambiental em obras de subestação de energia elétrica [artigo de MBA]. Florianópolis: Universidade do Sul de Santa Catarina, 2018.
- [3] Derisio, J. C. Introdução ao control de poluição ambiental. Ed. 4. São Paulo: Editora Oficina de Textos; 2012. 206.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14001 – Sistemas de gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso. 3ª Edição, São Paulo, SP, 2015.
- [5] Alcântara, L. A.; Silva, M. C. A.; Nishijima, T. Educação ambiental e os sistemas de gestão ambiental no desafio do desenvolvimento sustentável. *Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)*, Vol. 5, n. 5, p. 734-740, 2012.
- [6] Andrade, L. A. S.; Medeiros, R. Reaproveitamento de rejeitos de EVA para a produção de placas utilizáveis na construção civil. *Revista Científica Linkania Master*, Vol. 3, n. 3, 2012.
- [7] Indústria Brasileira De Árvores (IBÁ). Relatório IBÁ 2017. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 15 de mar. 2018.
- [8] Sperotto, F. Q. A expansão do setor de celulose de mercado no Brasil: condicionantes e perspectivas. *Indicadores Econômicos FEE*, v. 41, n. 4, 2014.
- [9] Araújo, S. K. C.; Oliveira, D. R.; Silva, T. J.; Barbosa, J. C.; Gava, M. Desempenho acústico de painéis de gesso incorporados com fibras de celulose. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Vol. 20, n. 1, p. 456-463, 2016.
- [10] Foelkel, C. Resíduos sólidos industriais da produção de celulose Kraft de Eucalipto.

- Revista Eucalyptus Online Book & Newsletter, p. 9-13, 2007.
- [11] Associação Brasileira do Poliestireno Expandido (ABRAPEX). Disponível em: <<http://www.abrapex.com.br/>>. Acesso em: 21 de mai. de 2019.
- [12] Silva, A. P.; Almeida, P. C. de. Tecnologia drywall: principais características e localização no cenário brasileiro. Jornada Científica da Unesc, n. 1, p. 1-2, 2016.
- [13] Lima Junior, A. R.; Fonseca, B. G.; Silva, M. E. Produtos ecoeficientes na arquitetura: o emprego de materiais lignocelulósicos. Janus Revista de Pesquisa Científica - FATEA, Vol. 11, n. 20, p. 35-47, 2014.
- [14] Silva, D. M. Fibras Naturais como Isolamento Acústico. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, Vol. 12, n. 12, p. 41-44, 2018.
- [15] Michalsky, R. L. X. N. Metodologias para medição de isolamento sonoro em campo e para expressão da incerteza de medição na avaliação do desempenho acústico de edificações [tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2011.
- [16] Ribeiro, R. O.. Acústica previsional aplicada às salas de espetáculo [tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2016.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10152 - Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, RJ, 2017.
- [18] Ozisik, N. M. Transferência de Calor: um texto básico. Ed. 1. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S. A.; 1990.
- [19] Rouver, A. N. Determinação da influência do contorno de grão na medida de difusividade térmica em cerâmicas supercondutoras YBa₂Cu₃O_{7-δ} [dissertação de mestrado]. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo; 2013.
- [20] Amorim, P. G. R. Produção de compósitos termo acústicos a base de resíduos reciclados provenientes da construção civil [tese de doutorado]. Brasília: Universidade de Brasília, Departamento de engenharia florestal; 2014.
- [21] Azevedo, C. C. de A. Estudo de comportamento térmico e compósito à base de gesso e vermiculita [dissertação de mestrado]. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de tecnologia; 2017.
- [22] Santos Neto, N. A. dos. Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos [dissertação de mestrado]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2006.
- [23] Poll, B. J. Análise da isolação acústica em parede de habitação popular executada com resíduos de pneus [dissertação de mestrado]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2009.
- [24] Cardoso, A. de L. Modelo de predição de condutividade térmica de rochas usando medidas em misturas bifásicas [tese de doutorado]. Bahia: Universidade Federal da Bahia; 2016.
- [25] Indústria Brasileira De Árvores (IBÁ). Relatório IBÁ 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 17 de fev. 2020.
- [26] Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305 de 2 de Agosto de 2010; Caderno “Política Nacional de Resíduos Sólidos”; 3ª Edição; Brasília, DF; 2016.