



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

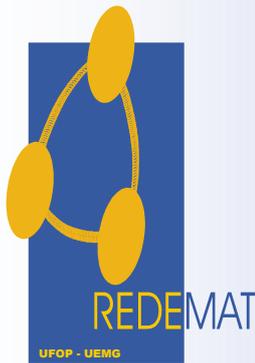
UFOP – UEMG



**“CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE *SHREDDER*
COMO ABSORVEDOR ACÚSTICO”**

Cristiano Sousa Benício Siqueira

Ouro Preto, 22 de outubro de 2020



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – UEMG

Cristiano Sousa Benício Siqueira

**“CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE *SHREDDER*
COMO ABSORVEDOR ACÚSTICO”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo.

Coorientador: Dr. Rubén Antonio Llobell Solé.

Ouro Preto, 22 de outubro de 2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

Snulc Siqueira, Cristiano Sousa Benício.
Caracterização e aplicação do resíduo de Shredder como absorvedor acústico. [manuscrito] / Cristiano Sousa Benício Siqueira. - 2020.
87 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo.
Coorientador: Prof. Dr. Robén Antônio Llobell Solé.
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais.
Área de Concentração: Análise e Seleção de Materiais.

1. Resíduos industriais. 2. Aço - Eliminação de resíduos. 3. Isolamento acústico. I. Araújo, Fernando Gabriel da Silva. II. Solé, Robén Antônio Llobell. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 620:669.1

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Cristiana Sousa Benício Siqueira

Caracterização e aplicação do resíduo de Shredder como absorvedor acústico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais

Aprovada em 28 de setembro de 2020

Membros da banca

Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo - Universidade Federal de Ouro Preto - Presidente
Prof. Dr. Jefferson Januário Mendes - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto
Eng. Esp. Wilson Carlos Faria - GERDAU S.A
Prof. Dr. Rubén Antônio Llobell Solé - Fundação Gorceix (Coorientador)

Prof. Fernando Gabriel da Silva Araújo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 19 de janeiro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Gabriel da Silva Araujo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/02/2021, às 15:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0134598** e o código CRC **FD475C80**.

RESUMO

O aço é um material essencial para a sociedade, estando presente em diversos setores da indústria. Sua produção causa impactos ambientais consideráveis, desde a obtenção da matéria-prima até os resíduos gerados no processo. Visando a redução de impactos ambientais e a sustentabilidade, a recuperação de sucatas ferrosas para a produção de aço tem sido muito utilizada. Essa recuperação é feita por meio da trituração de materiais descartados que contenham boa porcentagem de ferro em sua composição. Após a trituração, as partes metálicas são separadas e um resíduo conhecido como *Fluff* é gerado. Esse resíduo tem composição muito variada e sua reutilização tem sido alvo de pesquisas. O trabalho aqui proposto visa a pesquisa para utilização do *Fluff* como material absorvedor acústico, pois a poluição sonora é um sério problema ambiental vivenciado nas áreas urbanas. Existem alguns materiais convencionalmente aplicados para absorção acústica, fabricados principalmente a partir de poliuretano, lã de vidro e lã de rocha, mas a fabricação destes gera impactos ao meio ambiente, pelo consumo de recursos. Portanto, fazendo-se a caracterização, seleção e preparação de amostras a partir do *Fluff*, a pesquisa objetivou testar a capacidade de absorção sonora do material, realizando a medição de seu coeficiente de absorção acústica (CAA) por meio de um tubo de impedância propiciando um produto com boas características e menor preço.

Palavras-chave: Tubo de impedância. *Shredder*. *Fluff*. Coeficiente de absorção acústica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Steel is an essential material for society, being present in several sectors of the industry. Its production causes considerable environmental impacts, from obtaining the raw material to the waste generated in the process. In order to reduce environmental impacts and concerned with sustainability, the recovery of ferrous scrap for steel production has been widely used. This recovery is done by shredding discarded materials that contain a good percentage of iron in their composition. After grinding, the metal parts are separated, and a residue known as Fluff is generated. This residue has a very varied composition and its reuse has been the subject of research. The work proposed here aims the use of Fluff as an acoustic absorber material, since noise pollution is a serious environmental problem experienced in urban areas. There are some materials conventionally applied for sound absorption, manufactured mainly from polyurethane, glass wool and rock wool, but the manufacture of these materials generates impacts on the environment, due to the consumption of resources. Therefore, making the characterization, selection and preparation of samples from the Fluff, the research aimed to test the sound absorption capacity of the material, performing the measurement of its acoustic absorption coefficient through an impedance tube offering a good product with low price.

Keywords: Impedance tube. Shredder. Fluff. Sound absorption coefficient. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Visão geral de um <i>shredder</i>	15
Figura 2	Caracterização composicional realizada pela UCS para as seguintes frações do resíduo de <i>shredder</i> : menor que 20 mm (canto superior esquerdo), entre 20 e 30 mm (canto superior direito), entre 30 e 100 mm (canto inferior esquerdo) e acima de 100mm (canto inferior direito).....	17
Figura 3	Resultado da análise termogravimétrica.....	20
Figura 4	Gráfico comparativo dos coeficientes de absorção de fibras de quenafe (azul), poliéster reciclado (vermelho), lã de vidro (laranja) e lã mineral (cinza)	23
Figura 5	Resultados das medições para o arranjo com a placa à frente.....	25
Figura 6	Resultados das medições para o arranjo com a placa atrás.....	25
Figura 7	Montagem do sistema de tubo de impedância para medição do coeficiente de absorção sonora.....	32
Figura 8	Tubo de impedância com um microfone para medição de CAA.....	35
Figura 9	Curva indicando a atenuação sonora provocada por ressonadores em 250 Hz.....	36
Figura 10	Câmara reverberante.....	37
Figura 11	Fluxograma das etapas de atividades experimentais.....	38
Figura 12	Fluxograma do processo de trituração de sucatas e separação dos produtos e resíduos.....	39
Figura 13	Coleta de <i>Fluff</i> fino (esquerda) e grosso (direita).....	40
Figura 14	Peneiras utilizadas no refino da seleção granulométrica.....	40
Figura 15	Ilustração do processo de investigação da composição material do <i>Fluff</i> ..	41
Figura 16	Triturador (moinho de facas)	43
Figura 17	Agitador de peneiras, utilizado para a separação granulométrica.....	44
Figura 18	Prensa hidráulica a quente.....	47
Figura 19	Molde com o <i>Fluff</i> para prensagem a quente.....	47
Figura 20	Amostras preparadas para medições no tubo de impedância.....	48
Figura 21	Amostras testadas no tubo de impedância.....	50
Figura 22	Tubo de impedância para os testes deste trabalho.....	51
Figura 23	Tubo de impedância com equipamentos para medição do CAA.....	53

Figura 24	Porcentagens de material que compõem o <i>Fluff</i>	55
Figura 25	Perda de massa em função da temperatura.....	58
Figura 26	Resultado das medições de atenuação sonora para amostras de gesso preenchidas com 3 cm de espessura de <i>Fluff</i> e em outro momento com 3 cm de espessura de lã de vidro.....	59
Figura 27	Resultado das medições de atenuação sonora para amostras de gesso preenchidas com 5 cm de espessura de <i>Fluff</i> e em outro momento com 5 cm de lã de vidro.....	60
Figura 28	Comparação entre a atenuação acústica causada pelas placas de gesso preenchidas com 3 e 5 cm de espessura de <i>Fluff</i>	61
Figura 29	Comparação de efeito de atenuação sonora de placas de gesso preenchidas com espessuras de 3 e 5 cm de lã de vidro.....	62
Figura 30	Comparação entre atenuação sonora causada por discos de <i>Fluff</i> e lã de vidro com 3 cm de espessura.....	63
Figura 31	Comparativo entre atenuação sonora causada por discos de <i>Fluff</i> e lã de vidro com 5 cm de espessura.....	64
Figura 32	Medição do CAA com o tubo de impedância vazio, sem amostra.....	65
Figura 33	CAA para a lã de vidro.....	66
Figura 34	CAA para o <i>Fluff</i> original (12 a 19,1 mm).....	67
Figura 35	CAA para o <i>Fluff</i> original (12 a 19,1 mm) separado por densidade em.....	68
Figura 36	CAA do <i>Fluff</i> triturado (1 a 9 mm).....	69
Figura 37	CAA do <i>Fluff</i> triturado (1 a 9 mm) separado por densidade em água.....	70
Figura 38	CAA do <i>Fluff</i> prensado, uma placa.....	71
Figura 39	CAA do <i>Fluff</i> prensado, 2 placas.....	72
Figura 40	Comparação dos CAAs dos diferentes materiais avaliados.....	73
Figura 41	Ilustração do processo de trituração e peneiramento do <i>Fluff</i> para venda.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Separação em massa dos materiais que compõem o <i>Fluff</i>	54
Tabela 2	Densidade das amostras testadas no tubo de impedância da UFOP.....	55
Tabela 3	Densidade das amostras testadas no tubo de impedância da UFRJ.....	56
Tabela 4	Valores de NRC para as amostras.....	75
Tabela 5	Premissas adotadas e valores levantados.....	76
Tabela 6	Resumo dos valores de investimento levantados mais receita e custos anuais calculados.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C	Carbono
CAS	(ou CAA) Coeficiente de absorção sonora ou acústica
Cl	Cloro
CSF	Espuma sintética à base de cimento
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
F	Flúor
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
O	Oxigênio
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NRC	<i>Noise Reduction Coefficient</i>
PET	Politereftalato de etila
S	Enxofre
SI	Silício
SINOBRAS	Siderúrgica Norte Brasil
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USIMINAS	Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais

SUMÁRIO¹

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Geração do resíduo de <i>shredder</i>	15
3.2	Composição do resíduo de <i>shredder</i>	16
3.3	Propriedades físicas e químicas do resíduo de <i>shredder</i>	17
3.4	Possíveis aplicações para o resíduo de <i>shredder</i>	20
3.5	Utilização de materiais para absorção sonora.....	22
3.6	Características gerais das ondas sonoras	29
3.7	Variáveis que influenciam a absorção sonora	30
3.8	Métodos de medição do coeficiente de absorção acústica	31
3.8.1	<i>Tubo de impedância</i>	31
3.8.2	<i>Tubo de impedância com ressonador de Helmholtz</i>	35
3.8.3	<i>Câmara reverberante</i>	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Coleta da amostra.....	38
4.2	Seleção granulométrica	40
4.3	Composição material do <i>Fluff</i> fino.....	41
4.4	Separação densimétrica	42
4.5	Cominuição e separação granulométrica.....	42
4.6	Determinação da densidade.....	44
4.7	Análise de composição elementar (C, H, N e S)	45
4.8	Determinação do poder calorífico	45
4.9	Análise termogravimétrica (TG)	45

¹ Este trabalho foi revisado com base nas novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009. E foi formatado de acordo com a ABNT NBR 14724 de 2019.

4.10	Formação de placas de <i>Fluff</i> por prensagem a quente.....	46
4.11	Preparação dos corpos de prova	47
4.11.1	<i>Preparação dos corpos de prova para os testes de comparação em tubo de impedância.</i>	47
4.11.2	<i>Preparação dos corpos de prova para medição do coeficiente de absorção acústica em tubo de impedância.</i>	49
4.12	Avaliação comparativa da capacidade de absorção acústica em tubo de impedância.....	50
4.13	Determinação do coeficiente de absorção acústica em tubo de impedância	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1	Composição material do <i>Fluff</i> fino.....	54
5.2	Densidade das amostras de <i>Fluff</i> testadas no tubo de impedância	55
5.3	Composição elementar (C, H, N e S)	56
5.4	Poder calorífico	57
5.5	Análise termogravimétrica (TG)	57
5.6	Análise comparativa da capacidade de absorção acústica.....	58
5.7	Determinação do coeficiente de absorção acústica	65
6	VALOR EM USO DO TRATAMENTO E VENDA DO <i>FLUFF</i>	76
7	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O aço, devido às suas características de maleabilidade, durabilidade, resistência, além de matéria-prima abundante para sua produção, tornou-se indispensável para a sociedade. Ele está presente em quase todos os bens de consumo e setores industriais: navios, carros, celulares, eletrodomésticos, computadores, construção civil, plataformas de petróleo, máquinas agrícolas, etc. Ele ainda tem como vantagem ser reciclável, sendo o material mais reciclado do mundo. Carros, geladeiras, fogões, latas, barras e arames tornam-se sucatas que após serem trituradas por um equipamento conhecido como *shredder* têm a parte ferrosa separada para alimentar os fornos das usinas, produzindo novamente aço. (http://www.acobrasil.org.br/site2015/siderurgia_mundo.html).

O Brasil se configura entre os maiores produtores de aço do mundo, tendo essa indústria papel de destaque na economia nacional. O parque siderúrgico brasileiro compõe-se atualmente de 30 usinas, administradas por 11 grupos empresariais. São eles: Aperam, ArcelorMittal Brasil, Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), Gerdau, Siderúrgica Norte Brasil (SINOBRAS), Thyssenkrupp CSA, Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (USIMINAS), Vallourec Soluções Tubulares do Brasil, Villares Metals e Votorantim (http://www.acobrasil.org.br/site2015/siderurgia_brasil.html).

Assim como todas as grandes indústrias de base, a siderurgia causa impactos ambientais que precisam ser controlados. Entre os principais impactos indiretos e diretos associados a esse setor industrial, podem-se citar a extração de carvão vegetal e mineral, extração de minério de ferro, alto gasto energético, geração de efluentes gasosos e líquidos e geração de resíduos. Destacam-se neste trabalho a geração e a possibilidade de utilização do resíduo conhecido como *Fluff*, proveniente do processo de trituração de sucatas para uso do conteúdo ferroso em aciarias elétricas.

O *Fluff* é uma parte atualmente não aproveitada do processo de reciclagem do aço, parte não metálica das sucatas trituradas, contendo composição variada de materiais, principalmente plástico, tecido, borracha e espuma. O grande volume gerado desse resíduo é atualmente destinado a aterros industriais, ocupando e impactando grandes áreas, além de representar significativo custo para a indústria. Portanto, a primeira motivação para a realização deste

trabalho foi a possibilidade de redução dos impactos ambientais e custos devidos ao descarte do *Fluff* por meio de seu aproveitamento funcional.

Diversas pesquisas vêm sendo feitas para aproveitamento economicamente viável do *Fluff*, afinal, existe pressão social traduzida em acordos internacionais e setoriais forçando as atividades produtivas a se tornarem sustentáveis. No entanto, a característica de composição diversa e variável desse resíduo dificulta muito seu aproveitamento para outras atividades ou funções. Estando o autor também preocupado com outros tipos de impactos ambientais vivenciados pela sociedade, entre eles a poluição sonora, vislumbrou-se a aplicação do *Fluff*, ou pelo menos parte dele, para absorção acústica.

A poluição sonora pode causar sérios problemas de saúde de ordem física, mental e emocional. Esses problemas interferem, inclusive, na economia, ao gerarem gastos no sistema de saúde e queda de produtividade em empresas.

Nas grandes cidades brasileiras a intensa procura por moradias nos centros urbanos e seus entornos provoca elevação nos preços de imóveis, que para se tornarem acessíveis à maior parcela da população vêm sendo construídos em áreas cada vez mais reduzidas e com divisórias também menos espessas. A consequência é a alta concentração de edificações por área e de residências por edifício. Ou seja, os vizinhos encontram-se cada vez mais próximos, por conseguinte, há intensa interferência sonora entre as residências e também entre estas e o ambiente externo. É cada vez mais comum a percepção de perda da privacidade e os conflitos entre vizinhos devido a ruídos.

A solução mais viável para contornar os problemas supracitados relacionados à poluição sonora tem sido o emprego de materiais absorventes e isolantes na construção de edificações ou instalados em edifícios já concluídos. No entanto, os materiais absorventes acústicos tradicionalmente usados, tais como lã de vidro, lã de rocha e espumas de poliéster e poliuretano, apresentam valor relativamente elevado e utilizam matéria-prima que, em sua produção, causa impactos ambientais. E se esses materiais para a fabricação de painéis absorvedores sonoros pudessem ser substituídos por outros provenientes de resíduos? Nesse caso, provavelmente existiriam ao menos duas grandes vantagens: redução de geração de resíduo e fabricação de painéis absorvedores sonoros mais baratos, logo, mais acessíveis.

Essas vantagens conduziram à proposição deste trabalho, que caracteriza e prepara amostras a partir do *Fluff* para testá-las como material absorvedor sonoro em um tubo de impedância.

Uma avaliação do valor em uso para tratamento e venda do *Fluff* foi realizada após sua caracterização e testes em tubo de impedância, adotando a fração granulométrica e seleção da amostra que obteve o melhor resultado nas medições do Coeficiente de Absorção Acústica (CAA).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar a parte não metálica do resíduo de trituração de sucatas de uma aciaria e proceder a testes considerando aplicá-la na obtenção de um produto de baixo custo que possa ser empregado como absorvedor acústico.

2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar a composição gravimétrica do *Fluff* por tipo de material.
- b) Separar o *Fluff* por densidade em água.
- c) Triturar o *Fluff* para gerar amostras com granulometrias diferentes.
- d) Analisar algumas características físicas e químicas do *Fluff*.
- e) Prensar o *Fluff* a quente para a formação de placas.
- f) Preparar os corpos de prova com diferentes configurações para análise em tubo de impedância.
- g) Avaliar a capacidade de absorção acústica do *Fluff* no tubo de impedância, comparando-o com material de referência.
- h) Medir o coeficiente de absorção acústica no tubo de impedância
- i) Calcular o Coeficiente de Redução de Ruído *Noise Reduction Coefficient* (NRC) das amostras testadas.
- j) Analisar o valor em uso da amostra de *Fluff* com melhor desempenho na medição do CAA.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Geração do resíduo de *shredder*

O *shredder*, nesse caso, é um grande triturador de sucatas, utilizado por grandes empresas do ramo de produção de aço, que visam à reciclagem do material ferroso por meio de sua fundição em fornos elétricos (FIG. 1). O equipamento é alimentado com diversos materiais contendo boa porcentagem de aço ou ferro, tais como automóveis, máquinas, equipamentos, eletrodomésticos, etc. Esses materiais são triturados pelo *shredder* e seguem por meio de esteiras para um processo de separação magnética, cuja parte ferrosa é separada do restante. O restante do material não ferroso contém pequena parcela de metais, cujo valor econômico justifica a separação destes, que é feita por meio de um processo nomeado *Eddy Current*. São ímãs que criam um campo magnético que gera uma corrente induzida do tipo diamagnética com efeitos de repulsa sobre objetos condutivos (metálicos), assim os separando. Resta, então, o chamado *Fluff*, parte não metálica e não aproveitada da sucata triturada, o resíduo. De acordo com as bibliografias consultadas, pode-se concluir que em torno de 25% da sucata triturada tornam-se resíduos.

Figura 1 - Visão geral de um *shredder*



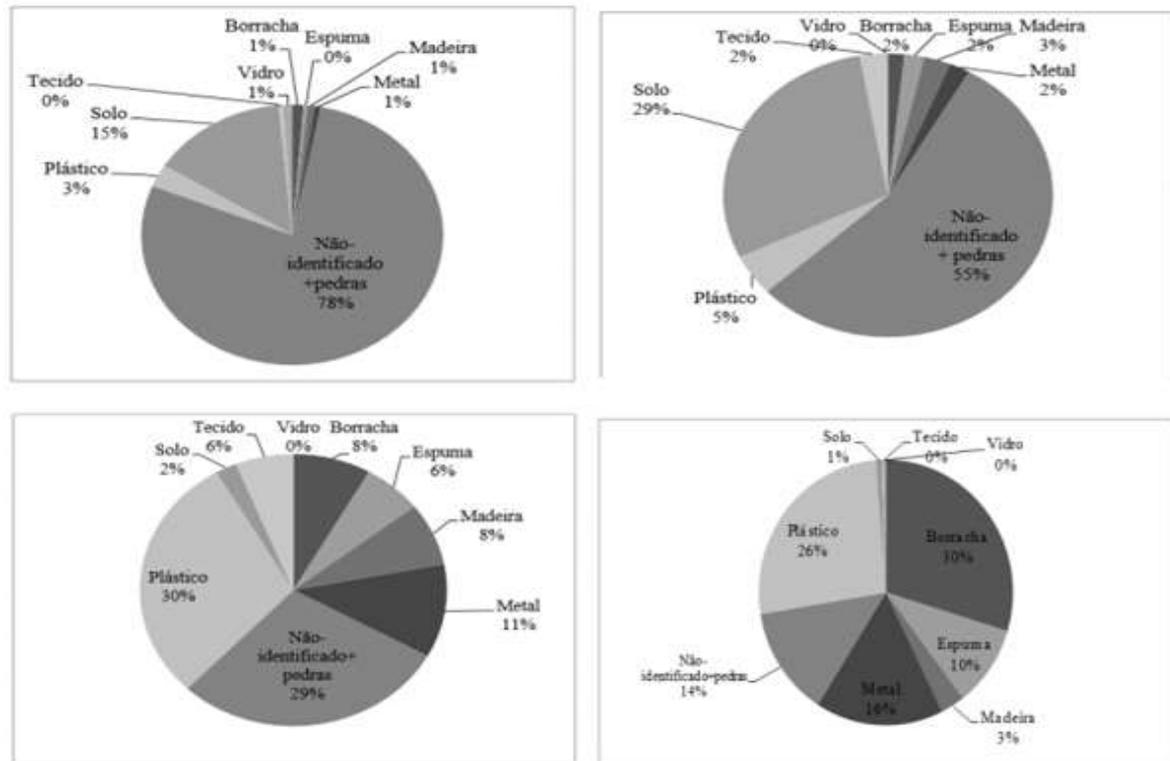
Fonte: <http://www.danieli-centro-recycling.com/about/news/>.

3.2 Composição do resíduo de *shredder*

A composição geral do resíduo de *shredder* é de materiais como plástico, vidro, borracha, tecido, madeira e papel, normalmente associados à sucata metálica provinda de automóveis, eletrodomésticos, equipamentos e máquinas em geral. Existem trabalhos publicados que fizeram a caracterização do *Fluff*. Num deles, de autoria de Reckziegel (2012), após seleção granulométrica, constatou-se que a fração com tamanho superior a 2 mm era composta principalmente de: borracha, 21%; outros (pedra, vidro,..), 7%; plástico, 5%; madeira somada a papel, 5%; metal, 5%; e porcentagens menores de têxtil e eletrônicos. No entanto, não se conseguiu identificar a maior parte do material, devido ao tamanho pequeno, menor que 8 mm, correspondente a 51%. Batista (2014) relata que o *Fluff* de maior granulometria é composto de: 48% de plástico e borracha; 5,6% de espuma e isopor; e 45,1% seriam somados madeira, tecido, pedra, metais e solo. Nesse mesmo trabalho a autora faz uma compilação de resultados da caracterização de *Fluff* por autores de diversos países, onde se nota que a fração maior do *Fluff* é composta principalmente de plástico, borracha, espuma e tecido. Segundo Jody *et al.* (2010), entre 40 e 50% da composição do *Fluff* são de plásticos, fibras, borracha e alcatrão.

Câmara (2017) realizou a caracterização do resíduo do *shredder* para as seguintes frações: menor que 20 mm, entre 20 e 30 mm, entre 30 e 100 mm e maior que 100 mm. Nessa caracterização mostrou-se que, para as frações menores, até 30 mm, prevalecem solo e material não identificado. Acima de 30 mm, o material é composto majoritariamente de plástico, borracha, espuma, metal e não identificados (FIG. 2).

Figura 2 - Caracterização composicional para as seguintes frações do resíduo de *shredder*: menor que 20 mm (canto superior esquerdo), entre 20 e 30 mm (canto superior direito), entre 30 e 100 mm (canto inferior esquerdo) e acima de 100 mm (canto inferior direito)



Fonte: Câmara (2017).

É importante destacar que a composição do *Fluff* é muito variável, em função dos tipos de sucatas trituradas, sendo que, de forma geral, a fração granulométrica acima de 5 mm é principalmente composta de plástico, borracha, espuma e tecido, sendo essa fração a maior parte do resíduo. Já os finos, fração abaixo de 5 mm, chamados de terra do *Fluff* e caracterizados em análises elementares, compõem a menor parte do resíduo. Essa fração não é aproveitável para os propósitos desta pesquisa, sendo, em geral, estudada sua aplicação na composição de concreto para a construção civil.

3.3 Propriedades físicas e químicas do resíduo de *shredder*

O *Fluff* é composto de material desagregado com diferentes formas e tamanhos. Sua variação granulométrica se deve às características da sucata triturada e do processo de trituração. Reckziegel (2012) relata que no processo de geração do *Fluff* da indústria fornecedora de suas amostras há uma separação nas seguintes frações com respectivas porcentagens em massa: *Fluff* <15 mm 9,8%; 15 mm < *Fluff* <100 mm 87,1% e *Fluff* >100 mm 1,0%. Batista (2014)

primeiramente separa o resíduo de *shredder* em dois tipos: terra de *shredder*, material com menor granulometria com aparência de terra e *Fluff* de *shredder*, material de maior granulometria com aparência de resíduo urbano. Segundo informação da empresa que forneceu as amostras para Batista (2014), 50% dos resíduos gerados são terra de *shredder* e os outros 50% *Fluff* de *shredder*. A autora ainda levanta as informações dessa distribuição do resíduo em outros países, onde fica constatado que há maior porcentagem de geração do *Fluff* de *shredder*, geralmente três a quatro vezes maior do que a porcentagem de terra de *shredder* gerada. Em um trabalho mais antigo de caracterização de *Fluff* gerado por uma empresa canadense, Day, Cooney e Shen (1996) apuraram que a maior parte do *Fluff* gerado, perto de 45%, está entre 2 e 26,5 mm, 37% são menores que 2 mm e os outros 18% são maiores que 26,5 mm.

Conforme o exposto no parágrafo anterior, a maior parte do resíduo de *shredder* é composta de material com aparência de resíduo urbano, ou seja, fração de maior granulometria que a parte terrosa composta principalmente de materiais plásticos, borrachas, tecidos e espumas.

A densidade do material é uma importante característica a ser considerada para a proposta deste trabalho de utilizar o *Fluff* como absorvedor acústico. Reckziegel (2012) preleciona que a massa específica da fração granulométrica acima de 2 mm foi medida em 0,78 g/cm³ e a massa específica aparente, de 0,54 g/cm³. Já Batista (2014) encontrou que a densidade aparente para o *Fluff* de *shredder*, material não terroso, ficou com média de 0,41 g/cm³. A densidade aparente do *Fluff* no estudo Day, Cooney e Shen (1996) coincidiu com o valor obtido por Batista (2014), 0,41g/cm³.

As densidades aparentes verificadas nas pesquisas consultadas são coerentes com a composição do material. Trata-se de um material de densidade baixa, o que favorece sua utilização na aplicação aqui proposta. Isso porque absorvedores acústicos irão revestir edificações e é interessante que seu peso não seja alto, para facilitar o processo de instalação e não forçar as estruturas dessas edificações.

Espera-se que o *Fluff*, sendo um material desagregado e devido à sua composição supracitada, tenha porosidade alta. Mas essa porosidade varia conforme a preparação das amostras, em que se varia a compactação do *Fluff* para a medição do coeficiente de absorção acústica. Este será

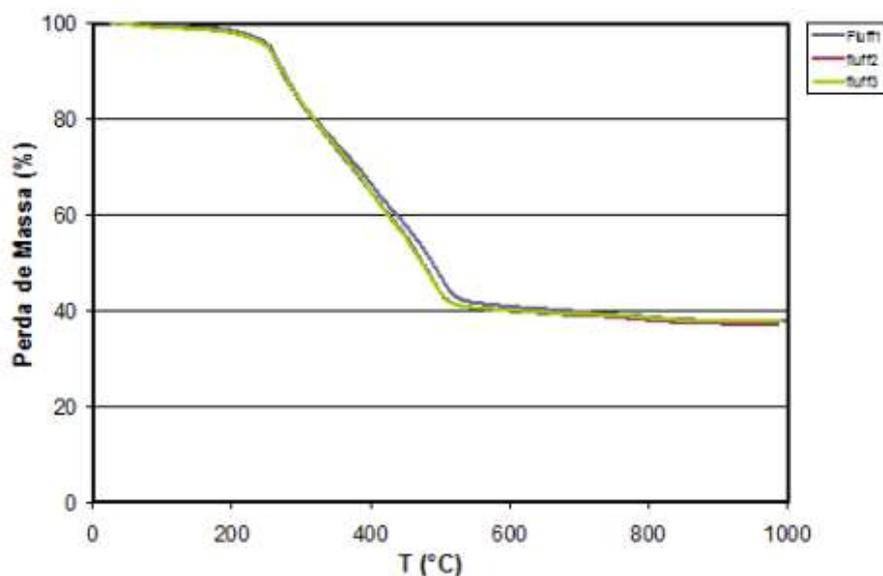
um dos principais pontos a serem analisados neste trabalho, como a compactação, que refletida na mudança de densidade irá alterar o CAA.

Reckziegel (2012) procedeu a uma análise elementar da composição do *Fluff* para a fração acima de 2 mm. Para isso, o material foi moído em um moinho micronizador. Os valores médios de carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H) foram de 39, 10 e 4%. Destacam-se ainda os valores de ferro (Fe), sódio (Na) e silício (Si), sendo suas respectivas porcentagens 5,5, 5,6 e 5,3%. Câmara (2017) também fez a análise elementar, mas apenas para carbono (C), nitrogênio (N), hidrogênio (H), cloro (Cl), flúor (F) e enxofre (S). Os resultados mostraram que em todas as amostras o elemento em maior porcentagem foi o carbono, muito acima dos demais, sendo de aproximadamente 11% para a fração menor que 20 mm, 15% para a fração entre 20 e 30 mm, 44% para a fração entre 30 e 100 mm e 67% para a fração acima de 100 mm. Para o hidrogênio, os resultados foram: aproximadamente 1% para a fração menor que 20 mm, 2% para a fração entre 20 e 30 mm, 6% para a fração entre 30 e 100 mm e 8% para a fração acima de 100 mm. Os demais elementos considerados se apresentaram abaixo de 1% em praticamente todas as frações.

Os resultados das análises elementares revelaram que o carbono é o elemento principal na composição do *Fluff*, tendo sua detecção aumentada com o aumento da granulometria considerada. É um resultado esperado tendo em vista que, com o aumento da granulometria, a presença de plástico, borracha e espuma é maior.

Ensaio de análise termogravimétrica, apresentados na FIG. 3, realizados sob atmosfera oxidante até a temperatura de 1.000°C conduzidos por Reckziegel (2012), acusaram que para o *Fluff* acima de 2 mm, 60% da massa são perdidos até a temperatura de 550°C, sendo que se nota um início de perda de massa considerável a partir de 200°C, conforme gráfico da Figura 3. O resultado é típico de materiais poliméricos. Na análise térmica feita por Câmara (2017) também foi notada maior perda de massa entre as temperaturas de 200 e 500°C, principalmente para as frações granulométricas acima de 30 mm.

Figura 3 - Resultado da análise termogravimétrica



Fonte: Reckziegel (2012).

Reckziegel (2012) avaliou o poder calorífico médio do *Fluff* com granulometria acima de 2 mm, chegando ao valor de 3.781 cal/g. Já Batista (2014) obteve valor de poder calorífico para o *Fluff* de 4.100 cal/g. Câmara (2017) conduziu testes de poder calorífico para as seguintes frações granulométricas: menor que 20 mm, 3.575 cal/g; entre 20 e 30 mm, 1.750 cal/g; entre 30 e 100 mm, 5.390 cal/g; e maior que 100 mm, 7.387 cal/g.

A caracterização do *Fluff* e os resultados dos testes de poder calorífico ressaltaram que, conforme se aumenta a granulometria do *Fluff*, maior é sua composição de plástico, borracha e espuma, sendo também maior o seu poder calorífico.

3.4 Possíveis aplicações para o resíduo de *shredder*

A mistura de materiais residuais que compõem o *Fluff* e o fato deste estar triturado, não tendo formatos definidos dificultam muito o seu aproveitamento. Mesmo contendo significativa porcentagem de materiais que poderiam ser reciclados, a dificuldade em segregar tais materiais inviabiliza a reciclagem. Portanto, evitar a atual destinação a aterros, como tem sido feito, é um grande desafio.

Reckziegel (2012) sugere que a fração do resíduo com granulometria abaixo de 2 mm pode ser utilizada na indústria cimenteira, enquanto a fração acima de 2 mm pode ser usada para

geração de energia. Sem citar a separação em frações, mas considerando que boa parte do *Fluff* tem composição polimérica, Börjeson *et al.* (1999) propõem também a queima para a produção de energia. Batista (2014) prefere não sugerir aplicações para a fração mais fina do resíduo, denominada terra de *shredder*, indicando a necessidade de estudo mais aprofundado sobre a composição química desse material. Mas para a fração de maior granulometria também é orientado seu aproveitamento como combustível, sendo alertado, porém, que, devido à existência do elemento Cl, é preciso avaliar os gases que poderão ser gerados nessa queima, por questões ambientais.

A utilização da terra de *shredder* foi testada por Caetano (2016) para uso na construção civil. O emprego de 20% do material residual em substituição à areia na fabricação de concreto obteve resultados satisfatórios, mas houve queda da resistência do concreto, atribuída a contaminantes como alumínio e fenóis.

Na caracterização de frações de resíduo de *shredder* feita por Câmara (2017), se concluiu que a fração mais fina, menor que 20 mm, é ideal para a fabricação de blocos cerâmicos estruturais, que a fração entre 20 e 30 mm tem características para ser aproveitada na indústria cimenteira e que acima de 30 mm pode ser aproveitada para queima e geração de energia.

O que se nota a partir da leitura dos trabalhos supracitados e de outros, é que as mais indicadas formas de aproveitamento do resíduo de *shredder* se resumem na aplicação ao cimento ou composição do concreto no caso da fração mais fina (terra de *shredder*) e na obtenção de energia pela queima da fração mais grossa (*Fluff*). No entanto, para a primeira aplicação proposta, contaminantes como o ferro, fenóis, alumínio, etc. podem comprometer a resistência do concreto produzido. Já na aplicação como combustível, a maior preocupação está associada ao Cl, podendo haver emissão de gases muito poluentes. Ressalta-se que, apesar das aplicações sugeridas poderem ser viáveis técnica e economicamente, de acordo com os vários estudos realizados a variação composicional do resíduo de *shredder* reduz a confiabilidade dos usos pretendidos no tocante à constância dos resultados do produto obtido. Mas esse parece ser um problema inevitável ao se aproveitar esse resíduo, inclusive na aplicação proposta neste trabalho.

3.5 Utilização de materiais para absorção sonora

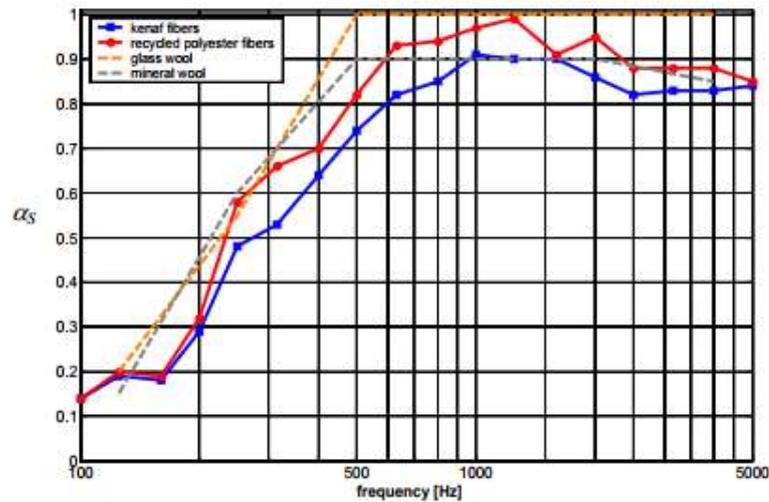
D'Alessandro e Pispola (2005) mediram o coeficiente de absorção sonora em uma câmara de reverberação dos seguintes materiais: fibra de quenafe e poliéster reciclado. Os resultados foram comparados com os de absorventes sonoros fibrosos tradicionais, como fibra de vidro e fibra mineral. Dois tipos de amostras foram preparados e testados pelos autores. O primeiro consistia em painéis semirrígidos de fibras de quenafe com baixa porcentagem de poliéster (8 a 10%) e adição de um adesivo à prova de fogo. O segundo tipo de amostra foi composto essencialmente de fibras de Politereftalato de etila (PET) de garrafas. A liga dos materiais em ambas as amostras foi feita termicamente.

As medições foram obtidas na câmara de reverberação do laboratório de acústica da Universidade de Perugia, seguindo os preceitos da *International Organization for Standardization* (ISO)-354. Uma das dificuldades reportadas por D'Alessandro e Pispola (2005) foi alcançar a difusão sonora adequada, pois a câmara de reverberação utilizada tinha limitações. Após diversas configurações de difusores para melhor avaliar as propriedades de absorção das amostras, os autores chegaram às seguintes conclusões:

- a) Os valores dos coeficientes de absorção sonora foram muito influenciados pelo número de difusores aplicados;
- b) quando os valores de temperatura e umidade se aproximam dos limites inferiores prescritos pela ISO- 354 (15°C e 30%), a correção para absorção atmosférica pode influenciar expressivamente os resultados, principalmente em frequências mais altas;
- c) as propriedades absorventes dos materiais testados foram ligeiramente inferiores à dos convencionalmente utilizados.

Observando o gráfico da FIG. 4, elaborado pelos autores, nota-se que o desempenho dos painéis de fibra de poliéster foi ligeiramente superior ao de quenafe. Ambos obtiveram elevados coeficientes de absorção em frequências entre 500 e 5.000 Hz. Nessa faixa de frequência os coeficientes médios ficaram em torno de 0,82 e 0,90 para os painéis de quenafe e poliéster reciclado, respectivamente.

Figura 4 - Gráfico comparativo dos coeficientes de absorção de fibras de quenafe (azul), poliéster reciclado (vermelho), lã de vidro (laranja) e lã mineral (cinza)



Fonte: Room e Pispola (2005).

Na Acoustics' 08 Paris, Asdrubali, D'Alessandro e Schiavoni (2008) apresentaram trabalho no qual foram testadas as propriedades acústicas de granulados obtidos de pneus usados. A técnica de medição adotada foi a do tubo de impedância. Os granulados foram separados, conforme o tamanho, em duas classes para os testes:

- a) Tamanho pequeno (em média, 1 mm de diâmetro);
- b) Tamanho médio (em torno de 3 mm de diâmetro).

Várias amostras foram confeccionadas a partir dos grânulos de pneus adicionando-se diferentes agentes ligantes e antichamas.

A taxa de compactação das amostras foi também um dos fatores testados. Esse parâmetro é importante, pois influencia a tortuosidade e a porosidade.

Um dos testes do trabalho consistiu em comparar três tipos de amostras, sendo um só com grãos pequenos, outro só com grãos médios e outro com 50% de cada. Os resultados salientaram que os melhores coeficientes de absorção foram obtidos com o uso somente de grãos pequenos. A concentração ótima de agente ligante ficou em torno de 10%.

Sabendo-se do melhor desempenho de amostras utilizando apenas grânulos pequenos, outros testes foram feitos mantendo-se o tamanho dos grãos e mudando-se espessura e/ou taxa de compactação.

Foram testadas amostras de mesma espessura e composição com taxas de compactação de 20, 28 e 40%. Notou-se que o melhor desempenho ocorreu com taxa de compactação de 20%.

Quando se manteve a taxa de compactação e composição alterando-se a espessura (6, 7,2, 8 e 9,4 cm), percebeu-se que, com o aumento da espessura, os picos de maiores valores de coeficiente de absorção deslocaram-se para frequências mais baixas e que a amplitude dos valores dos coeficientes foi reduzida entre as frequências utilizadas nos testes (100 a 6.400 Hz). Os autores concluíram que os melhores resultados foram obtidos com a amostra com menor taxa de compactação (20%) e maior espessura (9,4 cm) na faixa de frequência entre 500 e 2.000 Hz, apresentando coeficiente de absorção médio de aproximadamente 0,8.

Outro teste interessante realizado por Asdrubali, D'Alessandro e Schiavoni (2008) foi o uso de amostras de dupla camada, ambas de espessura de 3 cm e compostas de grânulos de pneus usados de tamanho pequeno. No entanto, uma das camadas tinha taxa de compactação de 20% e a outra 40%. Assim, duas configurações foram testadas gerando amostras com espessura total de 6 cm. A configuração com a camada menos compactada à frente em relação à fonte sonora obteve melhor desempenho.

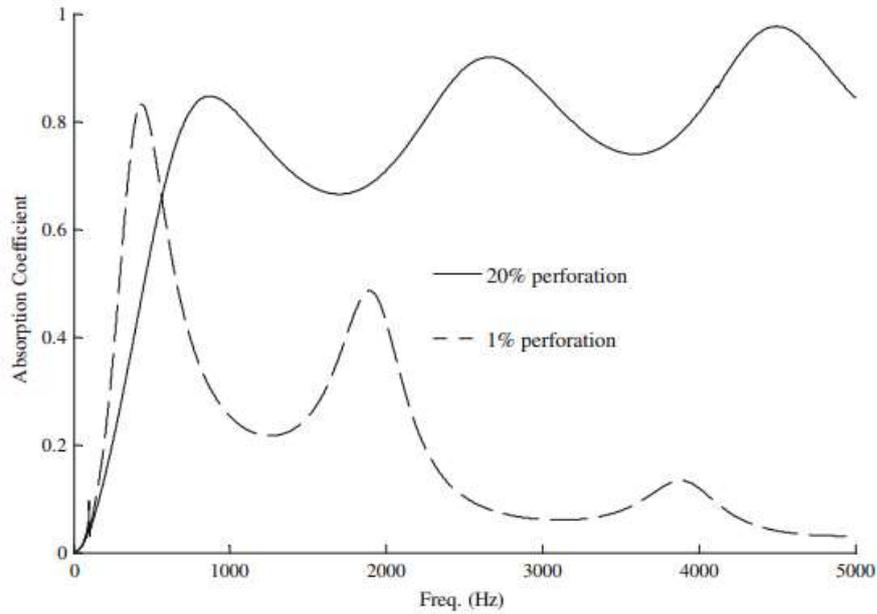
Fouladi (2009) testou amostras compostas de fibra de coco e placas perfuradas de liga de alumínio, havendo ou não no tubo de impedância um espaço livre atrás da amostra. Os resultados das medições feitas no tubo de impedância foram comparados com previsões calculadas utilizando-se três modelos: Allard, Beranek e Ver, Atalla e Sgard.

As medidas realizadas no tubo de impedância seguiram a ISO-10534-2.

Foram testadas duas configurações de amostras, sendo uma com a placa perfurada de 1 mm de espessura na frente, seguida de 50 mm de fibra de coco e espaço livre atrás de 35 mm. Na outra configuração inverteu-se a posição da fibra de coco com a placa perfurada. A placa perfurada tinha porcentagem de vazios superficial de 1% em um dos testes e 20% em outro.

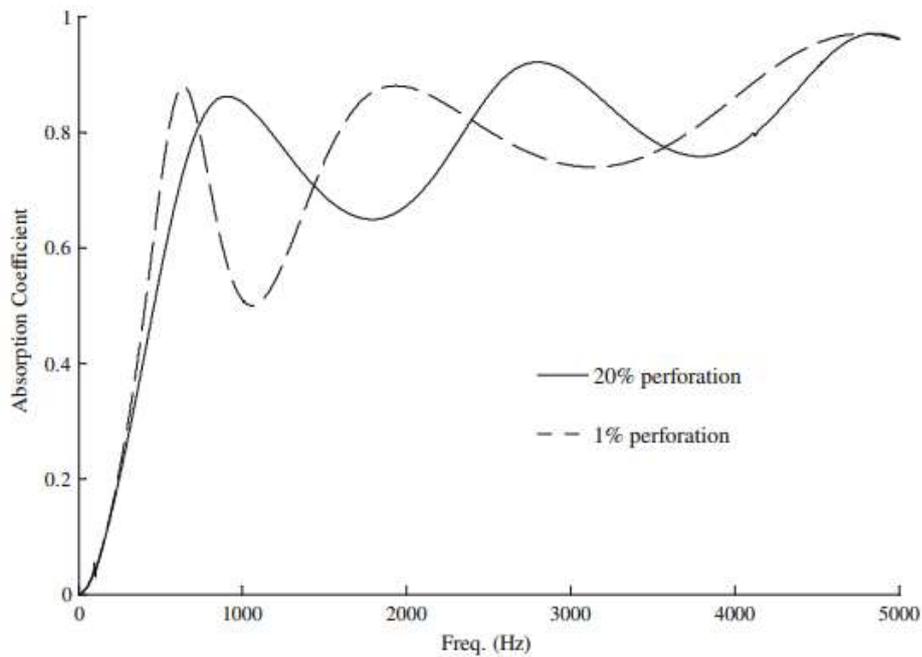
Entre as configurações avaliadas, quando a placa é colocada atrás da fibra de coco, ela pouco interfere estando com 1 ou 20% de vazio superficial, mas a placa com 20% de vazio superficial à frente da fibra de coco obteve resultados muito melhores que a de 1%, pois no último caso houve muita reflexão das ondas, conforme se vê nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Resultados das medições para o arranjo com a placa à frente



Fonte: Fouladi *et al.* (2009).

Figura 6 - Resultados das medições para o arranjo com a placa atrás



Fonte: Fouladi *et al.* (2009).

Em 2015, Asdrubali *et al.* publicaram artigo resumindo os resultados de testes realizados por diversos pesquisadores de medições de CAA de materiais sustentáveis (naturais renováveis e industriais reciclados). Sua pesquisa destacou a importância de se optar por materiais sustentáveis para uso como absorvedores ou isolantes acústicos. Citaram ainda a importância da disponibilidade, escolhendo-se aqueles materiais encontrados com fartura na região.

Foram apresentados gráficos expondo os melhores resultados obtidos com determinados materiais. Um dos materiais que se destacou é o painel feito com feixe de bambu de *Arundo donax*. Amostra de 12 m² foi testada em uma câmara de reverberação. Ela tinha 14 cm de espessura e os coeficientes de absorção sonora medidos para frequências acima de 300 Hz estiveram acima de 0,9, de acordo com os autores Jiménez-Espada e Dias-Sanchidrian (2010).

Pelos dados apresentados por Asdrubali *et al.* em 2015 relativos à capacidade de absorção acústica de materiais sustentáveis, nota-se que, para diversas espessuras, métodos de medição e formas de confecção das amostras, bons coeficientes de absorção podem ser obtidos por tais tipos de materiais que não são usualmente aproveitados comercialmente.

Enfatiza-se ainda o desempenho de restos de tecidos, principalmente *jeans*. No entanto, Asdrubali *et al.* ponderam sobre a impossibilidade da comparação direta entre o desempenho dos materiais citados no artigo, pois na obtenção dos coeficientes de absorção cada equipe de pesquisa empregou configurações de amostras e métodos de medições diferentes. Ainda mencionaram a restrição do uso comercial de determinados materiais devido a inflamabilidade, deterioração, resistência a fungos, etc.

Na pesquisa de He et al. (2017) foi feita comparação entre modelos de predição que calculam os coeficientes de absorção e resultados obtidos em experimentos em tubos de impedância reportados na literatura. Primeiramente fez-se comparação gráfica dos valores medidos e apresentados por Attenborough para fibra de vidro com os seguintes modelos de predição: *Miki-Delany-Bazley*, “*Multiple Scattering Theory*”, “*weakly anisotropic*” e “*fully anisotropic*” (proposto e descrito no trabalho dos autores). Os resultados gráficos indicaram que os modelos *Miki-Delany-Bazley* e “*fully anisotropic*” geraram valores muito próximos dos experimentais e o “*fully anisotropic*” ainda mais.

Também em 2017, um trabalho de revisão sobre compósitos utilizados para absorção acústica foi publicado por Rajappan, Bhaskaran e Ravindran. Primeiramente foram relatadas as propriedades absorventes de compósitos à base de fibras naturais em baixas (<2.000 Hz) e altas frequências (>2.000 Hz). Ressaltaram-se as vantagens adicionais do uso deste tipo de material, como: sustentabilidade ambiental, baixo custo e disponibilidade. No trabalho se destacou um compósito de espuma de poliuretano com casca de arroz, que foi proposto por Wang *et al* (2013), como bom absorvente acústico para baixas frequências, <500 Hz. Uma fibra citada como boa para ser usada em compósitos absorventes é a de coco, que ainda tem como vantagem a ampla oferta em alguns países. Os compósitos de fibra de coco têm excelentes *performances* em frequências acima de 1.500 Hz. Outro tipo de compósito que é citado por ter bom desempenho entre 250 e 2.000 Hz, havendo espaço livre posterior, é o poliuretano com fibra de *Kapok*. Em frequências mais altas (>2.000 Hz), Rajappan, Bhaskaran e Ravindran (2017) sublinharam os resultados de compósitos à base de polipropileno com fibra de quenafe ou cânhamo, principalmente entre 3.000 e 6.000 Hz. A fibra de coco também se destaca para a fabricação de compósitos absorventes acústicos em frequências mais elevadas, principalmente em torno de 6.000 Hz. Entre os compósitos feitos com materiais sintéticos, Rajappan, Bhaskaran e Ravindran (2017) realçam os desempenhos dos mais comumente usados, como a lã de vidro, lã de rocha, poliestireno, poliuretano, polietileno e poliéster.

Alternativamente aos materiais supracitados, os mesmos autores comentam o sucesso de compósitos à base de alumínio como bons absorventes em frequências abaixo de 2.000 Hz. Além do alumínio, é também identificado o bom desempenho da espuma sintética à base de cimento (CSF) desenvolvida por Hasan *et al* (2013).

Tratando-se ainda de compósitos citados por Rajappan, Bhaskaran e Ravindran (2017), é notável a *performance* da borracha natural de estireno butadieno com borracha recuperada com bicarbonato de sódio apresentada no estudo de Algaily e Puttajukr (2014). Esse material se mostrou um excelente absorvente acústico, com coeficientes acima de 0,9 na ampla faixa de frequência entre 20 e 2.000 Hz.

No caso de absorventes sintéticos para frequências acima de 2.000 Hz, Rajappan, Bhaskaran e Ravindran (2017) asseguram que a introdução de nanomateriais vem otimizando o desempenho de compósitos já tradicionalmente usados.

Ainda em 2017, Sari *et al.* (2017) acentuaram as propriedades acústicas de um compósito com diferentes proporções de fibras de casca de milho com resina de poliéster. Foram analisadas algumas características das amostras, como porosidade, tortuosidade, resistência ao fluxo de ar, absorção sonora, módulo de Young, além da realização de microscopia eletrônica de varredura. As amostras confeccionadas nesse trabalho tinham todas 20 mm de espessura, com composições percentuais de fibra de casca de milho de 20, 40, 50, 60, 70 e 80%. O restante da composição era resina de poliéster.

Enfatizando apenas os resultados relativos aos coeficientes de absorção, verifica-se que para todo o espectro de frequência testado (100 a 6.400 Hz) os coeficientes de absorção foram, em média, maiores para a amostra cuja proporção de fibra de casca de milho era de 80%, o que coloca esse material como uma boa alternativa a ser aplicada.

Wang *et al.* (2018) tratam a possibilidade de atingir a absorção perfeita, ou seja, criar uma metaestrutura capaz de impedir por completo a reflexão e transmissão das ondas sonoras. O protótipo criado pelos autores para isso possui duas camadas de metamaterial recheadas com material poroso. A frequência de ressonância da camada frontal foi sintonizada na mesma frequência de antirressonância da camada posterior. Então, na frequência crítica foi feita a condição para se atingir a absorção perfeita. A amostra foi construída com membranas de policarbonato e meio poroso de fibra de vidro. A membrana frontal tinha espessura de 254 μm , a posterior de 125 μm e o meio poroso de 15 mm.

Foi comparada a predição calculada com o valor de coeficiente de absorção medido e notou-se que estes ficaram muito próximos. Esses valores chegaram quase à absorção perfeita na frequência de 312 Hz. O experimento de Wang *et al.* (2018) avança a possibilidade de se obter metamateriais capazes de atingir a absorção perfeita, mas em uma frequência crítica. O desafio maior passa a ser conseguir criar um metamaterial que seja capaz de alcançar o mesmo resultado abrangendo o maior espectro de frequência possível.

Na pesquisa aqui proposta, o material a ser testado é proveniente do resíduo de trituradores de sucatas, conhecido como *Fluff*. A escolha desse material se deu por se tratar de um resíduo comum na região centro-sul mineira que ainda não tem sido reciclado ou reutilizado. Dessa forma, a destinação atual desse resíduo se dá em aterros industriais ou incineradores, havendo inevitavelmente considerável impacto ambiental, além de elevado custo. Para cada tonelada

de material metálico separado pelos “*shredders*” (trituradores de sucata), aproximadamente 227 Kg de resíduos são produzidos (Hoffman, 1993 *apud* MARQUES; SALDANHA, 2014). A composição desse resíduo é principalmente de vidro, plásticos, tecidos, madeira, borracha e óxidos metálicos.

3.6 Características gerais das ondas sonoras

Os sons são produzidos pela matéria em vibração. O material vibrante transfere energia para o ar, fazendo com que este sofra compressão e expansão traduzidas em ondas longitudinais, nas quais as moléculas do ar se movimentam para frente e para trás. As ondas sonoras podem se propagar com diversas frequências, mas o ouvido humano capta apenas frequências entre 20 e 20.000 Hz. As ondas infrassônicas e ultrassônicas não são audíveis pelo ouvido humano. As ondas infrassônicas são produzidas, por exemplo, por abalo sísmico. Os ultrassons podem ser ouvidos por certos animais, o cachorro é um deles (<http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/acustica.htm>).

A propagação das ondas sonoras necessita de um meio material e, em geral, quanto maior a densidade do material, maior é a velocidade de propagação. Maiores frequências geram sons mais agudos em relação a menores frequências (<http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/acustica.htm>).

As ondas sonoras sofrem reflexão ao encontrarem um obstáculo rígido. A reflexão ocasiona ecos e reverberação. O eco é a audição do som refletido com diferença de tempo em relação ao emitido. Em grandes salas fechadas ocorre o encontro do som com as paredes. Esse encontro produz reflexões múltiplas que reforçam o som e o prolongam durante algum tempo após cessada a emissão. É esse prolongamento que constitui a reverberação. Em resumo, a reverberação causa a sensação de prolongamento da audição sonora da onda emitida (<http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/acustica.htm>).

As ondas sonoras sofrem refração quando passam de um meio para outro, mudando suas velocidades e comprimentos de onda, mas mantendo constantes as frequências. As ondas sonoras também difratam, o que significa que podem mudar de direção e, assim, transpor um obstáculo. O som sofre interferência quando ondas sonoras se encontram e assim se têm interferências construtivas e destrutivas, gerando no ambiente, respectivamente, locais onde o

som é mais forte e mais fraco (<http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/acustica.htm>).

Outra propriedade das ondas sonoras é causar ressonância, que ocorre quando um meio físico vibra numa frequência igual a uma de suas frequências naturais de vibração (<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Ondas/ressonancia.php>).

3.7 Variáveis que influenciam a absorção sonora

O coeficiente de absorção sonora ou acústica (CAS ou CAA) pode ser entendido como a capacidade de um material absorver a energia sonora emitida por uma fonte e é expresso pela relação entre a energia sonora absorvida e a energia sonora emitida. As principais variáveis associadas ao material que afetam o seu coeficiente de absorção acústica (CAA) são tortuosidade, espessura e porosidade.

A tortuosidade, segundo Johnson *et al.* (1982), é um fator estrutural que depende da geometria dos poros. De forma geral, quanto mais compactado um material, maior a tortuosidade e menor a porosidade. O aumento da tortuosidade costuma deslocar os picos de coeficientes de absorção para frequências mais baixas. Mas a redução da porosidade causa marcante diminuição geral dos coeficientes de absorção na faixa de frequência audível. Portanto, torna-se um desafio encontrar a compactação ideal de um material para que este tenha o melhor desempenho absorvente sonoro dentro da faixa de frequência desejada.

Em termos da influência da espessura no coeficiente de absorção, nota-se que quanto mais espesso o material, maior é a capacidade de absorção em frequências mais baixas, pois em altas frequências a espessura não causa alterações significativas (GOMES, 2015).

Para um mesmo tipo de material, o aumento da porosidade provoca aumento da capacidade de absorção sonora, pois ao refletir menos, permitir a passagem das ondas sonoras por seu meio e ter maior superfície livre para vibrar, o material faz com que a onda sonora perca mais energia (MELO, 2017).

Será descrito mais adiante que uma das formas de se obter o CAA é realizando-se testes em uma câmara de reverberação, conforme a ISO 354. Nesse caso, podem influenciar no valor obtido:

- a) O formato da câmara;
- b) a posição dos painéis absorventes;
- c) as posições da fonte emissora e microfones de captação;
- d) o controle das condições climáticas (temperatura e umidade);
- e) a difusão do campo sonoro, que é o principal fator a alterar a qualidade das medidas.

3.8 Métodos de medição do coeficiente de absorção acústica

A capacidade de materiais para dissipar a energia acústica incidente é traduzida pelo coeficiente de absorção sonora, α . Ele é obtido pela razão entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente (OLLIVEIRA; TEODORO, 2005).

$\alpha = w_a/w_i$, onde w_a é a energia sonora absorvida e w_i a energia incidente. E

$w_a = w_i - w_r - w_t$, sendo w_r a energia sonora refletida e w_t a energia sonora transmitida.

O coeficiente de absorção sonora pode ser medido usando-se um tubo de impedância, no caso de pequenas amostras, conforme a ISO-10534-2 ou ASTM-E-1050. Para amostras maiores, o coeficiente é obtido em uma câmara de reverberação conforme a ISO-354. Esses dois métodos medem dois diferentes tipos de coeficientes de absorção sonora. No tubo de impedância mede-se o coeficiente de absorção para ondas sonoras de incidência normal, enquanto que na câmara de reverberação mede-se o coeficiente para ondas sonoras difusas (OLIVEIRA; TEODORO, 2005).

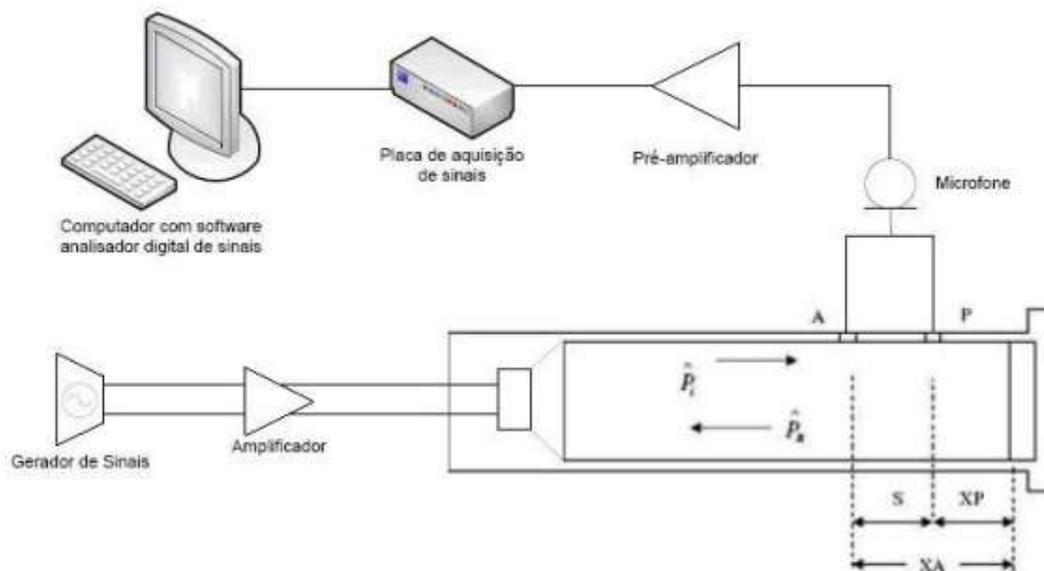
3.8.1 Tubo de impedância

A medição da absorção sonora utilizando um tubo de impedância e o Método da Função de Transferência com dois microfones é descrito por Masini e Teodoro (2011). Nessa metodologia coloca-se uma amostra de espessura conhecida na terminação rígida de uma das extremidades do tubo. Um alto falante é colocado na outra extremidade, gerando ondas

acústicas que se propagam pelo tubo, penetrando e refletindo na amostra ou no fundo rígido atrás dela. Um padrão de interferência resulta devido à superposição de ondas incidentes e refletidas. Então, medindo-se a pressão acústica em dois pontos diferentes por meio de dois microfones, a função de transferência é determinada, o que permite calcular a impedância acústica de superfície e, então, os coeficientes de reflexão e absorção (MASINI; TEODORO, 2011).

O cálculo embutido no processo de geração da curva de absorção em função da frequência pode ser entendido com a FIG. 7 e fórmulas que seguem:

Figura 7 - Montagem do sistema de tubo de impedância para medição do coeficiente de absorção sonora



Fonte Masini e Teodoro (2011).

Os dois microfones captam os sinais em duas diferentes posições no tubo. A função de transferência entre os sinais é a razão entre a pressão acústica da onda que se forma no interior do tubo entre as posições P e A (posições dos microfones). Tem-se que, conforme as equações para uma onda plana, a pressão no ponto P e a pressão no ponto A podem ser dadas por:

$$P_P = e^{i\omega t} \left[A e^{ikx_P} + B e^{-ikx_P} \right]$$

$$P_A = e^{i\omega t} \left[A e^{ikx_A} + B e^{-ikx_A} \right]$$

sendo A e B as amplitudes das ondas incidente e refletida, respectivamente, k o número de onda dado por $k = \omega/c$, ω é a frequência angular, c a velocidade de propagação do som no ar, X_P e X_A são as distâncias entre a superfície da amostra e a posição dos microfones em P e A. Portanto, a função de transferência ou função de resposta em frequência pode ser dada por:

$$H_{AP} = \frac{P_P}{P_A} = \frac{\left[A e^{ikx_P} + B e^{-ikx_P} \right]}{\left[A e^{ikx_A} + B e^{-ikx_A} \right]}$$

Com isso, o módulo da razão das amplitudes pode ser dado por:

$$\left| \frac{B}{A} \right| = \left| \frac{H_{AP} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right|$$

O coeficiente de reflexão acústica pode ser representado pela relação entre a intensidade sonora refletida e a intensidade incidente de tal modo que:

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_I} = \frac{P_r^2}{P_I^2} = \left| \frac{B}{A} \right|^2$$

Considerando-se que a energia sonora transmitida através do tubo é nula, tem-se que, pela lei da conservação de energia, a energia incidente é igual à energia absorvida mais a energia refletida, então o coeficiente de absorção acústica pode ser dado por:

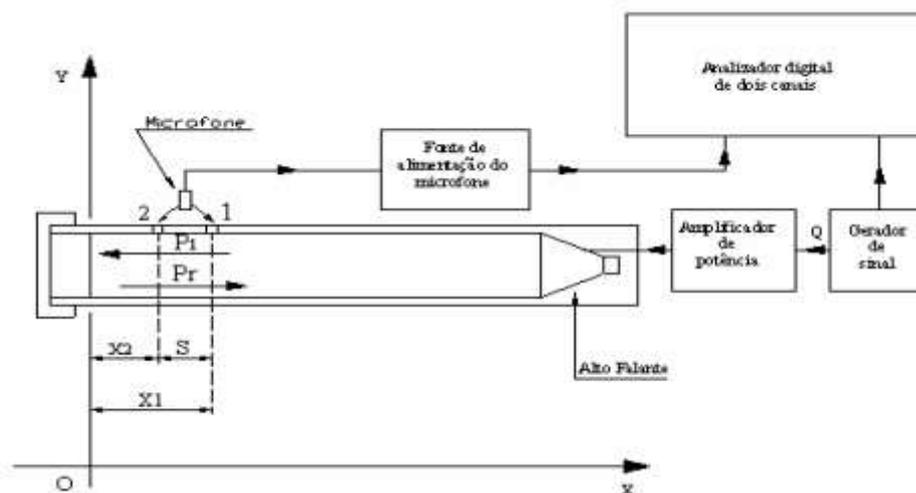
$$\alpha = 1 - \alpha_r = 1 - \left| \frac{B}{A} \right|^2 \qquad \alpha = 1 - \left| \frac{H_{AP} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right|^2$$

Observa-se que o resultado final o CAA é dado em função da frequência em gráficos, porém a frequência não aparece nas equações, ela está considerada dentro do número de onda \mathbf{k} . O que ocorre é que alterando a frequência, e portanto o comprimento de onda, muda-se as interações com o material, amostra testada dentro do tubo, mudando assim os sinais captados pelo microfone refletindo em diferentes valores de absorção para diferentes frequências. Portanto, tem-se uma avaliação dos intervalos de frequência em que o material mais interage e reduz a energia da onda, ou seja, tem maior capacidade de absorção.

A medição do CAA no tubo de impedância também pode ser feita utilizando-se apenas um microfone. Como o processo de excitação do tubo com um ruído branco pode ser considerado estacionário, os sinais dos microfones não precisam ser processados simultaneamente. A técnica de um microfone evita o erro sistemático de diferença de amplitude e de fase devido a possíveis diferenças entre os dois microfones, tornando desnecessária, portanto, a aplicação de funções de correção. Eliminam-se, assim, complicações computacionais adicionais (MASINI; TEODORO, 2011).

A Figura a seguir apresenta uma configuração típica para a aplicação da técnica de medição de CAA com um microfone no tubo de impedância.

Figura 8 - Tubo de impedância com um microfone para medição de CAA



Fonte: Mansini e Teodoro (2011).

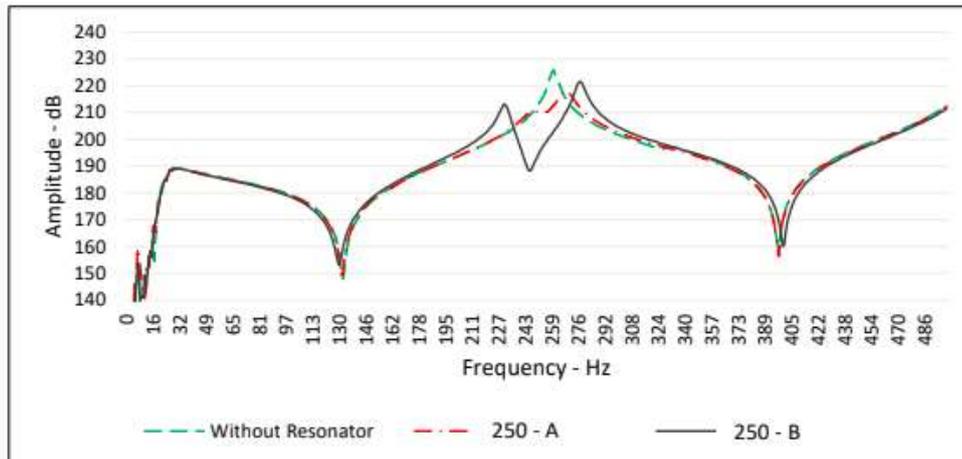
3.8.2 Tubo de impedância com ressonador de Helmholtz.

Os métodos de medição do CAA em tubos de impedância anteriormente descritos são os tradicionalmente usados. Porém, existem outras formas de se verificar que um material tem capacidade de absorver energia sonora sem uma medição direta do CAA. É o caso do experimento realizado por Guimarães (2018). Este trabalho apresenta entre seus resultados a capacidade de atenuação acústica de ressonadores de Helmholtz acoplados na extremidade oposta à fonte sonora dentro de um tubo de impedância, semelhante ao que é feito nas tradicionais medições de CAA, mas tendo outros objetivos e forma de apresentação das medidas. No caso, as medições são apresentadas em termos de amplitude de níveis sonoros em decibéis dB por frequência em Hz como na FIG 9 extraída deste artigo. Interpreta-se a atenuação sonora causada verificando-se a redução no pico da curva, notável, nesse caso, na frequência de 250 Hz quando compara-se a linha verde treçada (tubo sem ressonador de Helmholtz) com as outras duas linhas quando tem-se os ressonadores sendo testados.

Na pesquisa aqui apresentada, antes de se medir o CAA de amostras de *Fluff*, testou-se primeiramente o material no tubo de impedância utilizado no experimento citado no parágrafo anterior, pois o aparato estava disponível na Universidade Federal de Ouro Preto, e a depender dos resultados já teríamos um indicativo do potencial de absorção acústica do *Fluff*

justificando o deslocamento para testes em laboratório em outra universidade com dispositivo preparado para a medição do CAA

Figura 9 – Curva indicando a atenuação sonora provocada por ressonadores em 250 Hz



Fonte: Guimarães (2018).

3.8.3 Câmara reverberante

Outro método de medição do coeficiente de absorção é em câmara reverberante (FIG. 10). Consiste basicamente em realizar duas medições do tempo de reverberação (T60) em uma câmara reverberante, onde se possa considerar um campo acústico difuso, ou seja, que a pressão sonora é uniformemente distribuída no ambiente. Nesse ensaio, o T60 é medido sob duas condições distintas. Na primeira medição, o T60 é tomado na câmara reverberante sem a presença da amostra a ser caracterizada. Na segunda medição, a amostra a ser caracterizada é posicionada e a segunda medida de T60 é tomada. A comparação das duas medições permite o cálculo do coeficiente de absorção por incidência difusa, a partir da teoria da acústica estatística proposta por Wallace Sabine. O coeficiente de absorção por incidência difusa é o dado normalmente utilizado quando se deseja fazer o projeto acústico de um ambiente (<http://www.eac.ufsm.br/ensaios/absorcao-sonora-iso-354>).

Figura 10 - Câmara reverberante

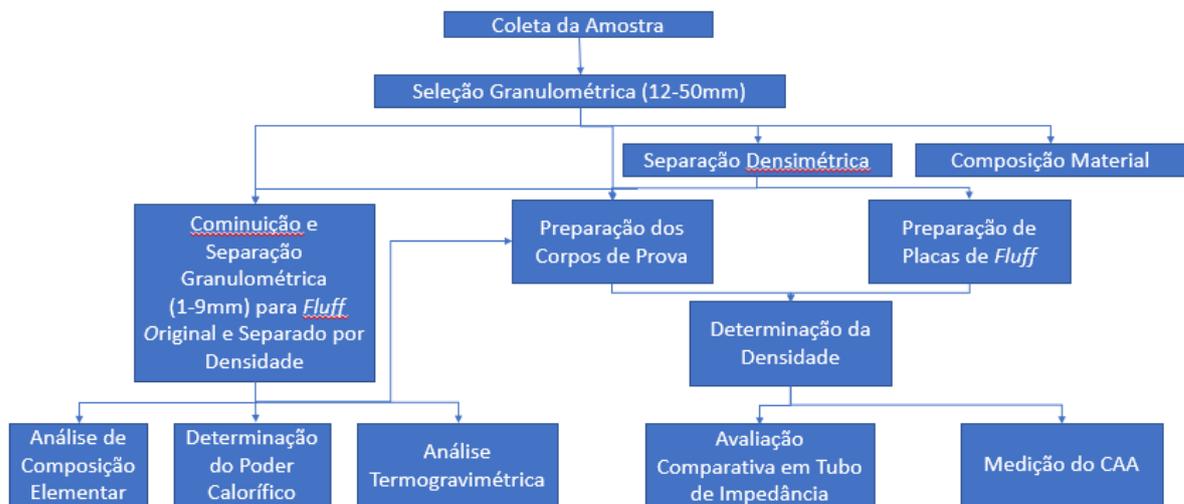


Fonte: Oliveira e Teodoro (2005)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia experimental utilizada no presente estudo, descrevendo-se as técnicas, materiais e equipamentos empregados. A FIG. 11 ilustra o fluxograma com as etapas de atividades desenvolvidas no processo de caracterização e avaliação da aplicação do *Fluff* como absorvedor acústico.

Figura 11 - Fluxograma das etapas de atividades experimentais

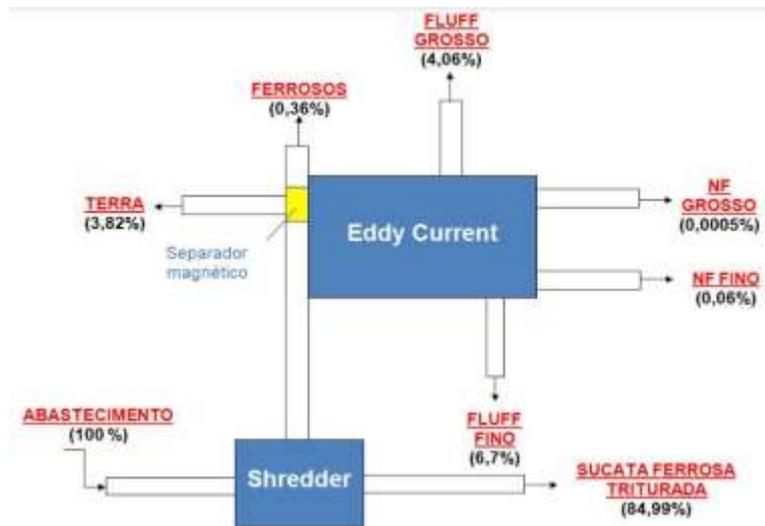


Fonte: Autor

4.1 Coleta da amostra

Para a obtenção das amostras de *Fluff* entrou-se em contato com uma empresa localizada no Rio de Janeiro-RJ que tem um triturador de sucatas, *shredder*, para recuperação de metais ferrosos para uso na aciaria e metais não ferrosos para venda, devido ao alto valor. No processo de trituração os resíduos gerados são separados em três diferentes frações granulométricas, assim denominadas e classificadas: terra de *shredder*, menor que 12 mm, *Fluff* fino, entre 12 e 50 mm e *Fluff* grosso, maior que 50 mm. A FIG. 12 mostra o fluxograma do processo, no qual se obtém os seguintes produtos e resíduos: sucata ferrosa, ferrosos recuperados em um segundo momento de separação, NF GROSSO (metais não ferrosos de maior granulometria), NF FINO (metais não ferrosos de menor granulometria), terra de *shredder*, *Fluff* fino e *Fluff* grosso.

Figura 12 - Fluxograma do processo de trituração de sucatas e separação dos produtos e resíduos



Fonte: Empresa fornecedora das amostras.

Devido às características previamente estudadas sobre o resíduo de *shredder*, procurou-se obter apenas o resíduo definido como *Fluff*, pois a terra não atende às finalidades propostas neste trabalho. Sabendo-se da variabilidade do resíduo gerado em função do tipo de sucata a ser triturada, para que houvesse maior representatividade da composição geral desse resíduo, era preciso que a amostragem abrangesse diversos dias de operação, quando haveria alteração aleatória típica do tipo de sucata sendo triturada. Portanto, ao longo de 20 dias, um volume de aproximadamente 15 litros era retirado diariamente em baldes de cada baia contendo *Fluff* grosso e *Fluff* fino, que foram sendo acumulados em grandes sacos. A coleta do *Fluff* utilizado no presente estudo é apresentada na FIG. 13.

Figura 13 - Coleta de *Fluff* fino (esquerda) e grosso (direita)



Fonte: Autor

4.2 Seleção granulométrica

Após coletadas, as amostras de *Fluff* fino e *Fluff* grosso passaram por lavagem e secagem. Apesar da existência de separação granulométrica feita na indústria no processo de trituração pelo *shredder*, por esta não ser muito precisa, uma nova seleção granulométrica foi feita. Essa seleção manteve os mesmos intervalos granulométricos, ou seja, *Fluff* fino entre 12 e 50 mm e *Fluff* grosso maior que 50 mm. Na FIG. 14 podem-se visualizar as peneiras utilizadas no processo de seleção granulométrica.

Figura 14 - Peneiras utilizadas no refino da seleção granulométrica



Fonte: Autor

O *Fluff* fino foi o objeto de estudo da pesquisa, por ter o tamanho mais adequado à produção de amostras para os testes acústicos realizados em tubos de impedância. Portanto, todas as etapas seguintes foram executadas utilizando-se esse material.

Em um primeiro momento, após a obtenção do *Fluff* fino melhor selecionado, como explicado nos parágrafos anteriores, ele foi observado a fim de se identificar sua forma e composição. Pôde-se perceber grande variação de tipo de materiais, formas e tamanhos das partículas que compõem o *Fluff*.

4.3 Composição material do *Fluff* fino

Esta análise visou quantificar a presença de plástico, borracha, espuma, tecido, vidro, madeira, metal e outros. O intuito foi verificar qual a proporção de materiais que têm mais capacidade de absorção acústica esperada, conforme revisão bibliográfica de materiais testados como absorvedores acústicos.

Os materiais foram separados visualmente com a ajuda de uma lupa de aumento e pesados. A massa de cada tipo de material foi dividida pela massa total, para se obter, assim, a porcentagem compondo o *Fluff* fino. A FIG. 15 ilustra o processo de separação e pesagem citados.

Figura 15 - Ilustração do processo de investigação da composição material do *Fluff*



Fonte: Autor

4.4 Separação densimétrica

Sabendo-se que os materiais menos densos tendem a ser os com melhor absorção acústica, conforme Lamounier (2008) e diversos autores, fez-se uma separação densimétrica do *Fluff* fino em água. A expectativa era de que com essa separação as amostras a serem testadas no tubo de impedância tivessem melhor desempenho. Além disso, a baixa densidade facilita a aplicação desse material em divisórias de edifícios por questão de cargas sobre estruturas.

O procedimento adotado foi simples, constando primeiramente da disposição do *Fluff* fino em um tanque com água e movimentando o material sobrenadante para desagregação e aumento da eficácia do processo. Após cinco minutos iniciou-se a coleta do material sobrenadante com uma peneira fina, abertura menor que 12 mm, menor granulometria do *Fluff* fino. O material coletado foi deixado ao sol para secagem, por se imaginar que no caso de uma aplicação real, em maior escala, a secagem por aquecimento encareceria o produto devido ao consumo de energia.

4.5 Cominuição e separação granulométrica

O objetivo desse processo é a obtenção do *Fluff* fino em granulometria mais fina e homogênea para se testar no tubo de impedância e também em fração fina o suficiente para aplicação dos processos de caracterização química.

É importante frisar que, após a separação por densidade em água, descrita no item anterior, têm-se dois tipos de *Fluff* fino, que serão testados em tubo de impedância: um com composição material original e outro de composição menos densa que a água. Estes foram separadamente cominuídos e peneirados na etapa da pesquisa descrita neste item.

Visando alcançar o objetivo citado no primeiro parágrafo deste item, submeteu-se o *Fluff* ao processo físico de cominuição em moinho de facas (marca Rone, modelo FA2305) com grelha de 9 mm, conforme Figura 16.

Figura 16 - Triturador (moinho de facas)



Fonte: Autor

Após o processo de moagem, cada material (*Fluff* original e *Fluff* separado por densidade em água) foi submetido a uma separação granulométrica, utilizando-se uma peneira de 9 mm e outra de 1 mm, colocando-se esse conjunto de peneiras mais um fundo de peneira em um agitador de peneiras da marca Bronzinox, por períodos de cinco minutos, como apresentado na FIG. 17. O material de interesse para a produção dos corpos de teste é aquele retido no intervalo das peneiras (9 mm e 1 mm). Já o material inferior a 1 mm foi utilizado para os ensaios de caracterização química, que serão descritos adiante.

Figura 17 - Agitador de peneiras, utilizado para a separação granulométrica



Fonte: Autor

Para a caracterização química do *Fluff* fino deve ser feita uma análise elementar e uma análise de poder calorífico. No entanto, tais análises requerem primeiramente uma pulverização do material, que foi realizada por meio dessa cominuição no moinho de facas. Esse processo gerou o *Fluff* fino em tamanho compatível para os equipamentos e métodos a serem utilizados.

4.6 Determinação da densidade

A determinação da densidade dos discos utilizados como amostras no tubo de impedância é muito importante, pois esse parâmetro tem influência na capacidade de absorção acústica. Assim, os resultados servirão como referência para testes acústicos utilizando o *Fluff* em diversos graus de compactação.

As densidades dos discos de amostras foram obtidas pela razão entre a massa e volume de cada um deles. Os discos foram pesados em balança de precisão calibrada para obtenção das massas e os volumes calculados conforme o diâmetro e espessura.

4.7 Análise de composição elementar (C, H, N e S)

Como relatado nos capítulos anteriores, o *Fluff* fino foi separado por densidade em água para obtenção do material menos denso e mais poroso, polímeros principalmente, que têm maior potencial para absorção acústica. Essa parte menos densa do *Fluff* foi triturada, conforme item 4.5, e a fração mais fina, menor que 1 mm, foi enviada a laboratório para análise da composição elementar em termos de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Para proceder com os ensaios fizeram-se antes a moagem e peneiramento em malha de 60 mesh.

As finalidades dessa análise são a melhor compreensão desse material, obtenção de indícios da proporção de polímeros contidos nele e fornecimento de informações para aprofundamento das pesquisas e avaliações de sua aplicabilidade.

A determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foi baseada na ASTM-D5373-16 – Método A. Para a determinação do teor de enxofre total, baseou-se na ASTM-D4239-17 – Método A.

4.8 Determinação do poder calorífico

Utilizando-se a mesma fração do *Fluff* fino que foi usada na análise de composição elementar citada no item anterior foi aplicada metodologia para determinação do poder calorífico, baseada na ASTM-D5865-13.

Saber o poder calorífico dessa fração do *Fluff* fino não interfere na capacidade de absorção acústica, mas fornece uma ideia do grau de risco de seu uso no caso de um incêndio para a aplicabilidade proposta neste trabalho. Além disso, é uma informação importante para subsidiar pesquisas de outras aplicabilidades, por exemplo, uso como fonte de energia em processos industriais.

4.9 Análise termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica (TG) da mesma fração do *Fluff* fino que foi usada na análise de composição elementar e determinação de poder calorífico foi realizada em balança

termogravimétrica da marca NETZSCH, modelo Jupiter STA 449 F1. A taxa de aquecimento aplicada foi de 10°C/min.

Esse procedimento visou verificar a partir de qual temperatura o material começaria a sofrer decomposição térmica. Isso porque uma das formas de utilização pensada para esse material é a formação de placas por meio de aquecimento, que leva a derretimento parcial e colagem por resfriamento, sabendo-se da rica composição em plásticos e borrachas. Pensou-se nessa formação de placas, pois a utilização do *Fluff* solto como material de preenchimento entre divisórias de edificações não é funcional em termos práticos. Há, porém, grande probabilidade de perda da capacidade acústica em função desse processo de formação de placas, por diminuir a porosidade.

4.10 Preparação de placas de *Fluff* por prensagem a quente

A preparação dos corpos de prova de *Fluff* prensados a quente foi realizada na prensa hidráulica SOLAB modelo SL 11, apresentada nas FIG. 18 e 19.

Para alcance do melhor resultado em termos de aglutinação do material devido ao derretimento parcial e ao mesmo tempo, evitando-se uma compactação que reduzisse demais a porosidade, foram utilizadas as seguintes configurações:

- a) 1° teste: uma massa de 10 g de *Fluff* fino separado por densidade em água foi inserida dentro de um molde de silicone com 16 cm de diâmetro sob pressão de 0,25 t, à temperatura de 160°C por 15 minutos;
- b) 2° teste: as mesmas condições do 1° teste foram mantidas, aumentando-se a temperatura para 180°C e o tempo para 20 minutos;
- c) 3° teste: as mesmas condições do 1° teste foram mantidas, aumentando-se a temperatura para 200°C e o tempo para 20 minutos.

Figura 18 - Prensa hidráulica a quente

Figura 19 - Molde com o *Fluff* para prensagem a quente.

Fonte: Autor

Com a configuração utilizada no 3º teste obteve-se a base para os corpos de prova de *Fluff* prensado, pois a partir do disco base retirado da prensa, este foi cortado circularmente, conforme o diâmetro do tubo de impedância, e utilizado na medição do CAA.

4.11 Preparação dos corpos de prova

4.11.1 Preparação dos corpos de prova para os testes de comparação em tubo de impedância

As amostras foram preparadas de forma a ficarem compatíveis com a dimensão dos tubos de impedância utilizados nos testes. Portanto, elas tinham diâmetro de 156 ou 46 mm em discos que variavam em espessura e composição material.

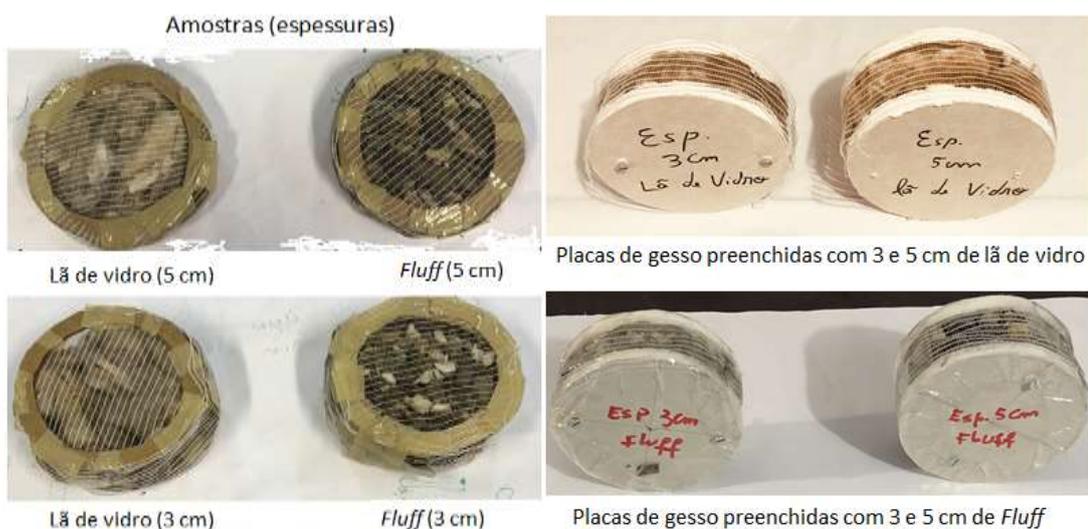
No primeiro tubo de impedância utilizado não se pôde realizar a medição do coeficiente de absorção acústica, pois não havia os equipamentos necessários para tal. Assim, nele a capacidade de absorção foi indiretamente avaliada por meio de comparação. Ajustando-se à medida interna do tubo, as amostras foram feitas com 156 mm de diâmetro. Foram produzidos oito tipos diferentes de amostras, sendo:

- a) Um disco composto de duas placas de gesso de 1,2 cm de espessura cada, preenchido com 3 cm de espessura de *Fluff* fino. As placas de gesso representam o material de divisórias internas de um edifício (*drywall*), já que uma das aplicações pensadas seria desse tipo;

- b) um disco composto de duas placas de gesso de 1,2 cm de espessura cada, preenchido com 5 cm de espessura de *Fluff* fino;
- c) um disco composto de duas placas de gesso de 1,2 cm de espessura cada, preenchido com 3 cm de espessura de lã de vidro (modelo Wallfelt 4+ da Isover) ;
- d) um disco composto de duas placas de gesso de 1,2 cm de espessura cada, preenchido com 5 cm de espessura de lã de vidro;
- e) um disco de *Fluff* fino de 3 cm de espessura mantido aglomerado por tela de *nylon*, papelão e fita adesiva. Acredita-se que a influência dos outros materiais nos resultados dos testes seja irrelevante. O intuito era averiguar o potencial absorvedor acústico do *Fluff* somente;
- f) um disco de *Fluff* fino de 5 cm de espessura mantido aglomerado por tela de *nylon*, papelão e fita adesiva;
- g) um disco de lã de vidro de 3 cm de espessura mantido aglomerado por tela de *nylon*, papelão e fita adesiva;
- h) um disco de lã de vidro de 5 cm de espessura mantido aglomerado por tela de *nylon*, papelão e fita adesiva.

A FIG. 20 exibe as amostras supracitadas.

Figura 20 - Amostras preparadas para medições no tubo de impedância



Fonte: Autor

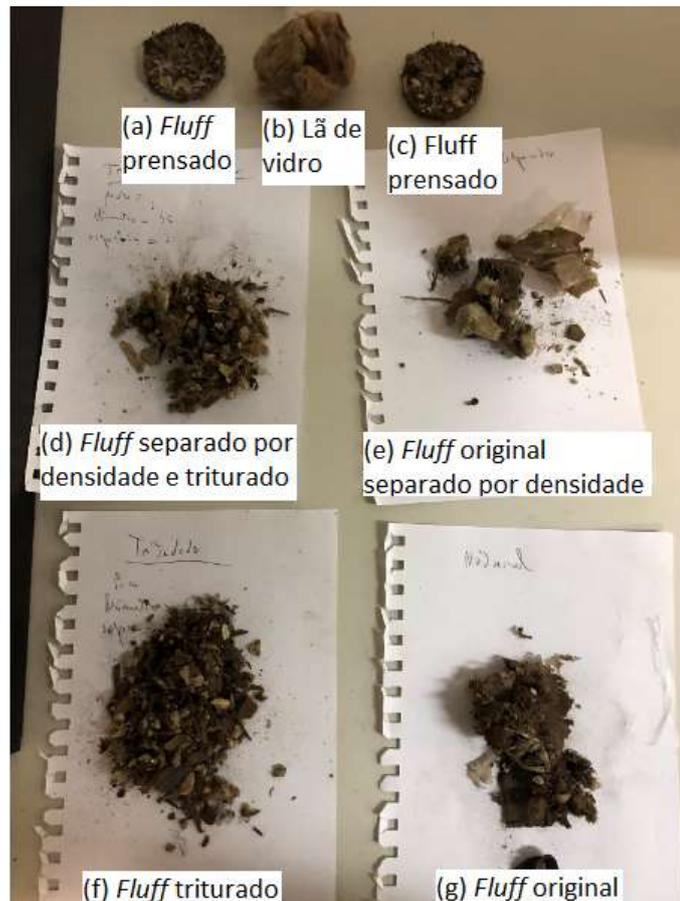
4.11.2 Preparação dos corpos de prova para medição do coeficiente de absorção acústica em tubo de impedância

No outro tubo de impedância utilizado nesta pesquisa, o laboratório dispunha de todo o equipamento necessário para a medição do coeficiente de absorção acústica. Ajustando-se ao diâmetro interno do tubo de 46 mm, foram produzidos sete tipos diferentes de amostras, sendo:

- a) Disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino original, ou seja, da forma como a amostra foi obtida na aciaria, mas selecionada em peneira com abertura de 19,1 mm para adequação às dimensões do equipamento;
- b) disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino separado por densidade em água, mas selecionado em peneira com abertura de 19,1 mm para adequação às dimensões do equipamento;
- c) disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino triturado e selecionado em granulometria entre 1 e 9 mm;
- d) disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino separado por densidade em água, triturado e selecionado em granulometria entre 1 e 9 mm;
- e) disco de placa de *Fluff* fino prensado a quente com 0,75 cm de espessura;
- f) disco de placa dupla de *Fluff* fino prensado a quente com 1,5 cm de espessura;
- g) disco de lã de vidro com 2 cm de espessura.

Os tipos de materiais utilizados na confecção dos corpos de prova para medição do CAA estão na Figura 21.

Figura 21 - Amostras testadas no tubo de impedância



De cima para baixo e da esquerda para a direita têm-se: (a) *Fluff* prensado; (b) lã de vidro (modelo Wallfelt 4+ da Isover); (c) *Fluff* prensado; (d) *Fluff* separado por densidade e triturado; (e) *Fluff* original separado por densidade; (f) *Fluff* triturado; (g) *Fluff* original.

Fonte: Autor

4.12 Avaliação comparativa da capacidade de absorção acústica em tubo de impedância

Na FIG. 22 tem-se uma fotografia do tubo de impedância que foi utilizado na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Laboratório de Acústica, Vibrações e Sistemas Inteligentes do Departamento de Engenharia Mecânica, para se avaliar de forma comparativa a capacidade de absorção acústica das amostras com *Fluff* testadas. Cada amostra testada foi posicionada em uma das extremidades do tubo, enquanto na outra eram emitidas ondas sonoras por um alto falante JBL 6W4P *Selenium Pro Woofer*. Foi utilizado um amplificador NCA – AB 100, mono, 100W @ 4 Ohms. Para captação da amplitude sonora dentro do tubo foi usado um microfone GRA, 40PH.

A medição direta do CAA não pôde ser feita, pois os recursos disponíveis não forneciam as respostas nesses termos. Os gráficos gerados nos testes apresentam a amplitude de intensidade

sonora em decibéis em função das frequências até 2.000 Hz. Os testes tiveram caráter mais comparativo, envolvendo medidas com o tubo vazio, com as amostras dos discos contendo *Fluff* e com as amostras de discos contendo lã de vidro modelo Wallfelt 4+ da Isover, material cuja propriedade de absorção acústica é reconhecida.

Figura 22 - Tubo de impedância para os testes deste trabalho



Fonte: Autor

A preparação das amostras com o *Fluff* entre placas de gesso talvez seja interessante, pois seria o mais próximo de uma aplicação real. Afinal, um material muito comum utilizado em divisórias de construções hoje no Brasil é o *drywall*, placas de gesso que podem ter suas propriedades acústicas melhoradas, tendo preenchimento com materiais apropriados, conforme Luca (2015). Nesse artigo citado, o preenchimento entre placas de gesso é feito com lã de vidro ou lã de rocha, conferindo uma significativa melhora no desempenho acústico. Com o intuito de averiguar a possibilidade de substituir a lã de vidro ou de rocha pelo *Fluff*, algumas amostras testadas no tubo de impedância foram de discos compostos de placas de gesso tendo o *Fluff* como preenchimento.

A preparação das amostras com diferentes espessuras visou verificar a interferência no desempenho de absorção acústica. Portanto, nos testes foi observado também como a variação da espessura afetou a capacidade de absorção.

4.13 Determinação do coeficiente de absorção acústica em tubo de impedância

A medição do coeficiente de absorção acústica (CAA) embasou-se na metodologia descrita na norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM)-E-1050, utilizando o tubo de impedância, dois microfones, um analisador digital e o *software Labview*. Essa metodologia consiste na emissão de ruído branco, que possui distribuição de energia constante com a

frequência (MASINI; TEODORO, 2011). Este foi aplicado em um espectro de frequências variando entre 100 e 3.150 Hz. O ruído é emitido a partir de uma das extremidades do tubo, com determinadas pressões sonoras. A onda percorre ao longo do tubo até a outra extremidade, contendo a amostra com o material sendo testado. Parte da onda é absorvida pelo material, outra é refletida pelo próprio material e pela parede do tubo atrás dele. Os microfones então captam a pressão sonora emitida e a refletida e o coeficiente de absorção acústica será dado pela expressão:

$CAA = (E_e - E_r) / E_e$, sendo:

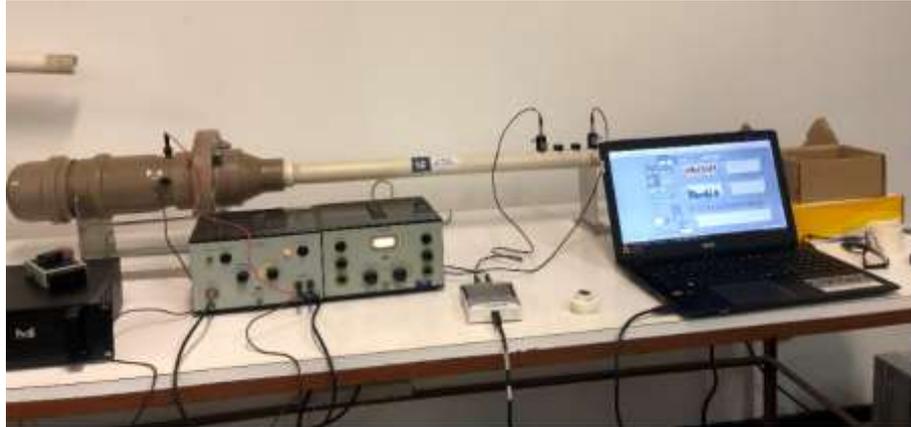
CAA = coeficiente de absorção acústica;

E_e = energia emitida;

E_r = energia refletida.

Os testes foram feitos no Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Um ruído branco foi gerado e a pressão sonora no interior do tubo foi determinada por dois microfones posicionados em aberturas na parte superior do tubo, que continha quatro posições para colocação dos microfones. Essas quatro posições para colocação dos microfones têm distâncias iguais de 40 mm entre os centros dos furos adjacentes. Enquanto um dos microfones tem sua posição fixa em um dos furos (furo número 1), o outro tem sua posição variando (furos número 2, 3 e 4) para cada sequência de medida. A média entre os valores captados nas três combinações possíveis confere mais confiabilidade ao resultado final. Os sinais dos microfones foram simultaneamente processados por um analisador digital e a curva de absorção em função da frequência foi determinada a partir do *software* Labview contendo a função de transferência. A FIG. 23 ilustra o tubo de impedância e todo o equipamento utilizado para obtenção do CAA.

Figura 23 - Tubo de impedância com equipamentos para medição do CAA



Fonte: Autor

O tubo de impedância tem extensão de 1,01 m e 46 mm de diâmetro interno, mesmo diâmetro das amostras. Foram feitas as medidas do CAA de amostras nas seguintes configurações:

- a) Disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino original, ou seja, da forma como a amostra foi obtida na aciaria, mas selecionada em peneira com abertura de 19,1 mm para adequação às dimensões do equipamento;
- b) disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino separado por densidade em água, mas selecionado em peneira com abertura de 19,1 mm para adequação às dimensões do equipamento;
- c) disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino triturado e selecionado em granulometria entre 1 e 9 mm;
- d) disco de 2 cm de espessura com *Fluff* fino separado por densidade em água, triturado e selecionado em granulometria entre 1 e 9 mm;
- e) disco de placa de *Fluff* fino prensado a quente com 0,75 cm de espessura;
- f) disco de placa dupla de *Fluff* fino prensado a quente com 1,5 cm de espessura;
- g) disco de lã de vidro modelo Wallfelt 4+ da Isover com 2 cm de espessura.

Para referência e comparação se mediu o CAA da lã de vidro modelo Wallfelt 4+ da Isover e o CAA do tubo vazio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Composição material do *Fluff* fino

Para a análise da composição material do *Fluff*, primeiramente ele foi quarteado para retirada de uma porção representativa de toda a amostra. Posteriormente, foi feita lavagem para remoção das partículas muito finas (poeira e terra). O *Fluff*, pós-secagem, foi espalhado sobre uma bancada para separação em tipos de materiais listados a seguir:

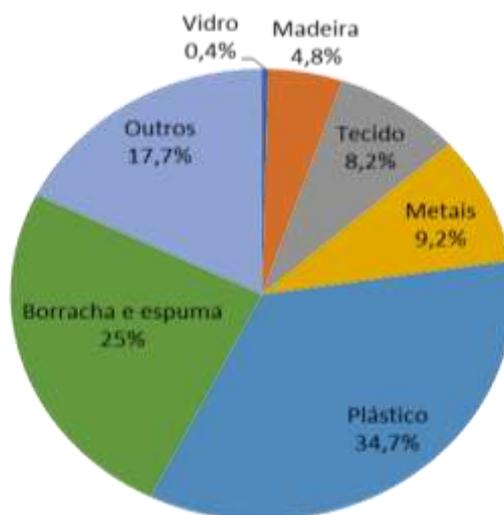
- a) Plástico;
- b) espuma e borracha;
- c) vidro
- d) madeira
- e) metal
- f) tecido
- g) outros materiais e materiais não identificados.

A separação foi feita por meio de tato e inspeção visual com auxílio de lupa.

Cada tipo de material separado foi pesado e dividido pela massa total da amostra para se obter suas porcentagens. A TAB. 1 apresenta as massas de cada material, a massa total e as porcentagens. Para melhor visualização dos resultados foi gerado também um gráfico em forma de pizza (FIG. 24).

Tabela 1 - Separação em massa dos materiais que compõem o *Fluff*

Tipo de material	Massa (g)	Porcentagem em massa
Vidro	28	0,4
Madeira	372	4,8
Tecido	630	8,2
Metais	704	9,2
Plástico	2.667	34,7
Borracha e espuma	1.925	25,0
Outros	1.363	17,7
Total	7.689	100,0

Figura 24 – Porcentagens de material que compõem o *Fluff*

Fonte: Autor

A composição material do *Fluff* fino pode ser considerada favorável à pretensão de uso como absorvedor acústico, pois aproximadamente 68% dela são de materiais de baixa densidade, que têm tido melhores resultados nas medições de CAA, de acordo com as publicações sobre o assunto. Esses 68% são a soma das porcentagens de plástico, borracha, espuma e tecido.

Os resultados também reforçaram o que se leu na revisão bibliográfica em relação à composição do *Fluff* na faixa granulométrica aqui analisada.

5.2 Densidade das amostras de *Fluff* testadas no tubo de impedância

As densidades das amostras testadas nos tubos de impedância foram obtidas a partir da medição de suas massas e volumes (espessuras e diâmetros) e estão apresentadas nas TAB. 2 e 3.

Tabela 2 – Densidade das amostras testadas no tubo de impedância da UFOP

Amostras testadas no tubo de impedância da UFOP	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Massa (g)	Densidade média da amostra (Kg/m ³)
<i>Fluff</i> separado por densidade	3	15,6	88,26	153,93
<i>Fluff</i> separado por densidade	5	15,6	145,25	151,99
Lã de vidro	3	15,6	29,58	51,59
Lã de vidro	5	15,6	55,93	58,53
<i>Fluff</i> separado por densidade e placas de gesso	5,4	15,6	349,55	338,68
<i>Fluff</i> separado por densidade e placas de gesso	7,4	15,6	361,09	255,30

Não foi medida a densidade das amostras de gesso preenchidas com lã de vidro. As amostras só de lã de vidro apresentaram, em média, densidade três vezes menor que as amostras somente de *Fluff* separado por densidade em água.

Tabela 3 – Densidade das amostras testadas no tubo de impedância da UFRJ

Amostras testadas no tubo de impedância da UFRJ	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Massa (g)	Densidade média da amostra (Kg/m ³)
Lã de vidro	2	4,6	3,8	28,58
<i>Fluff</i> original	2	4,6	7,8	58,67
<i>Fluff</i> original separado por densidade em água	2	4,6	6,5	48,89
<i>Fluff</i> triturado	2	4,6	11,4	85,75
<i>Fluff</i> separado por densidade em água e triturado	2	4,6	9,7	72,96
<i>Fluff</i> prensado placa única	0,75	4,6	11,9	238,69
<i>Fluff</i> prensado placa dupla	1,5	4,6	23,2	232,67

As amostras de placas de *Fluff* formadas na prensagem a quente tiveram maior densidade, seguidas das amostras com o *Fluff* triturado, triturado separado por densidade em água, *Fluff* original e *Fluff* original separado por densidade em água. As amostras de lã de vidro relataram a menor densidade. Os resultados seguiram de forma lógica o esperado. A separação por densidade em água fez com que as amostras assumissem densidade em torno de 84% das suas similares sem separação.

5.3 Composição elementar (C, H, N e S)

Conforme descrito no primeiro parágrafo do item 4.7, a análise de composição elementar foi realizada para o *Fluff* fino após separação por densidade em água, trituração em moinho de facas e seleção granulométrica, cuja fração abaixo de 1 mm foi então destinada para laboratório. Os ensaios foram executados após moagem e peneiramento em malha de 60 *mesh*.

Os resultados estão apresentados a seguir:

Carbono - % massa.....	52,5
Hidrogênio - % massa.....	6,43
Nitrogênio - % massa.....	1,7
Enxofre - % massa.....	0,17
Umidade total - % massa	3,8

A composição majoritária de carbono e hidrogênio, aproximadamente 60% em massa, foi coerente com a composição material do *Fluff* fino, cuja maior parte, mesmo antes da separação por densidade em água, foi de polímeros, vide item 5.1.

Devido à considerável porcentagem de carbono no *Fluff*, justifica-se a sugestão de utilização desse material como combustível por muitos que o pesquisaram. Mas uma análise dos tipos de gases liberados na queima deve ser feita, pois conforme destaca Batista (2014), é provável a formação de dioxinas e furanos no processo de recuperação de energia com a queima do *Fluff*.

5.4 Poder calorífico

Para a determinação do poder calorífico do *Fluff*, utilizou-se como amostra a mesma fração dele citada no item anterior.

Poder calorífico - MJ/Kg:

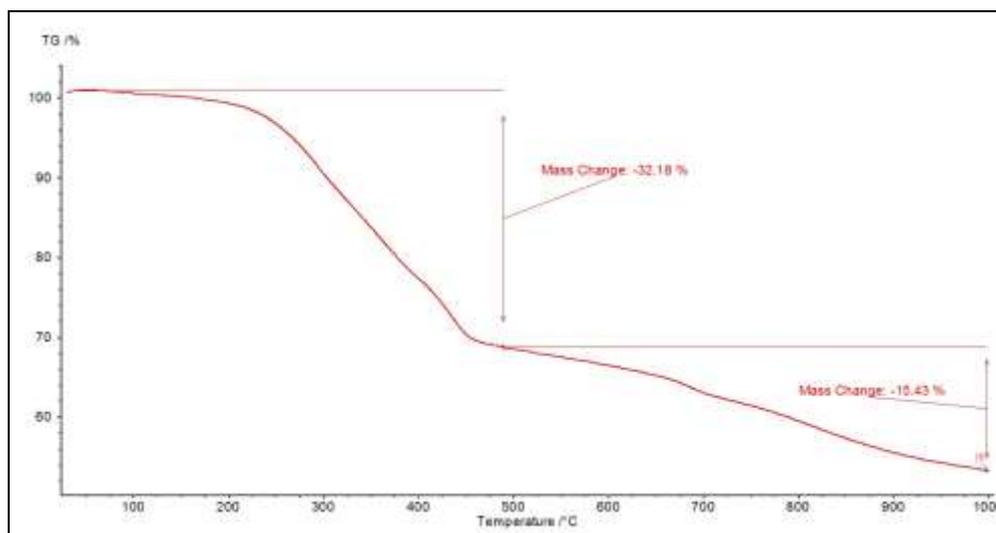
superior	23,67
inferior	22,24

Hugot (1996), citando vários autores, afirma que o poder calorífico superior do bagaço de cana de açúcar seco é de 19,26 MJ/Kg e o inferior é de 17,79 MJ/Kg. Ele propõe que esses valores sejam adotados como referência para esse material. Sabendo-se que usinas de etanol comumente usam o bagaço de cana seco para geração de energia, pode-se deduzir que o mesmo pode ser feito com o *Fluff* após sua separação por densidade em água. Como referido no item anterior, porém, essa utilização requer estudos sobre os contaminantes que podem ser gerados na queima.

5.5 Análise termogravimétrica (TG)

O *Fluff* fino separado por densidade em água e triturado, com granulometria inferior a 1 mm, foi aquecido em termobalança, sob atmosfera de nitrogênio, até a temperatura de 1.000°C. Na FIG.25 são descritos os resultados da perda de massa percentual, em função do aumento da temperatura.

FIG 25- Perda de massa em função da temperatura



Na FIG. 25 observa-se que o início da perda de massa do *Fluff* se deu a partir de aproximadamente 100°C, sendo que até 200°C essa perda foi pouco significativa. Acima de 250°C a taxa aumentou notavelmente até atingir aproximadamente a temperatura de 500°C, em que até então a perda de massa era de 32,18%. Ou seja, a maior perda ocorreu entre 250°C e 500°C, uma vez que a perda de massa total obtida até 1.000°C foi de 47,61%.

Com base nesses resultados, foram programadas as temperaturas a serem utilizadas na prensa hidráulica aquecida para a produção das placas de *Fluff* fino separado por densidade em água, considerando que o derretimento parcial do material, que em boa parte é composto de espuma, borracha e plástico, pode causar sua colagem.

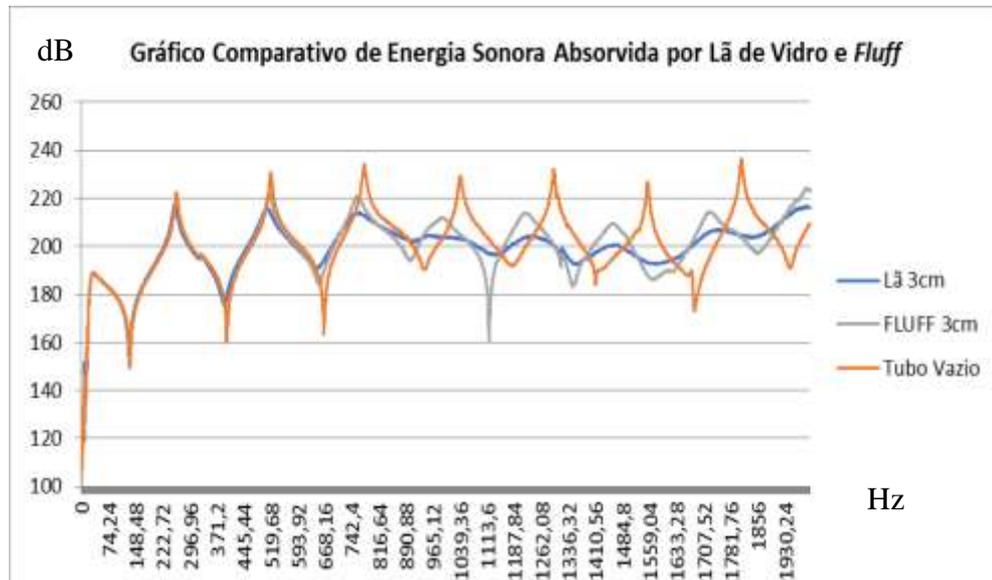
5.6 Análise comparativa da capacidade de absorção acústica

Utilizando-se um tubo de impedância, foram realizadas medições para comparar a energia sonora absorvida pelas amostras. Em uma das extremidades do tubo uma fonte emitia ondas sonoras em diversas frequências, que se propagavam pelo tubo e pela amostra, refletindo na outra extremidade e sendo captadas por um microfone. A interpretação da energia sonora absorvida pelos materiais foi feita pela atenuação das curvas apresentadas nos gráficos. Isto é, quanto menor os picos dessas curvas, maior foi a absorção.

A FIG. 26 exibe o comparativo das curvas características geradas no tubo quando este estava vazio, quando estava com a amostra de placa de gesso preenchida com 3 cm de espessura de

Fluff fino e quando estava com a amostra de placa de gesso preenchida com 3 cm de espessura de lã de vidro.

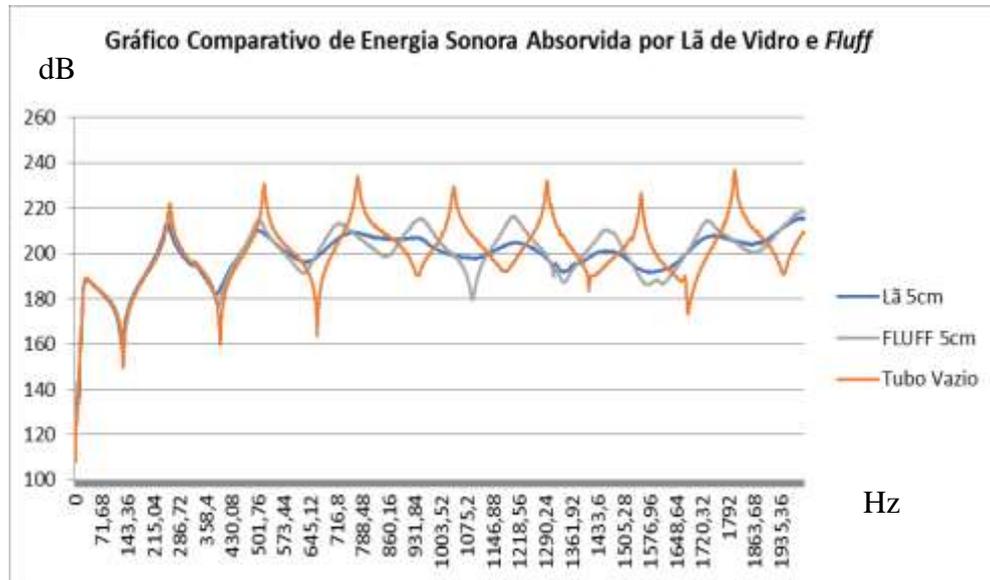
Figura 26 - Resultado das medições de atenuação sonora para amostras de gesso preenchidas com 3 cm de espessura de *Fluff* e em outro momento com 3 cm de espessura de lã de vidro



Encontrou-se que para baixas frequências, até aproximadamente 600 Hz, houve pouca atenuação da curva, baixa capacidade de absorção sonora tanto para a placa de gesso preenchida com 3 cm de *Fluff* como para a preenchida com lã de vidro. A partir de 600 Hz até 2.000 Hz percebe-se que as curvas representando o *Fluff* e a lã de vidro foram suavizadas, indicando absorção sonora, sendo que a atenuação provocada pela lã de vidro foi maior.

A FIG.27 expõe as curvas de medição de amplitude sonora por frequências para as amostras de placas de gesso preenchidas com 5 cm de espessura de *Fluff* e com 5 cm de lã de vidro.

Figura 27 - Resultado das medições de atenuação sonora para amostras de gesso preenchidas com 5 cm de espessura de *Fluff* e em outro momento com 5 cm de lã de vidro

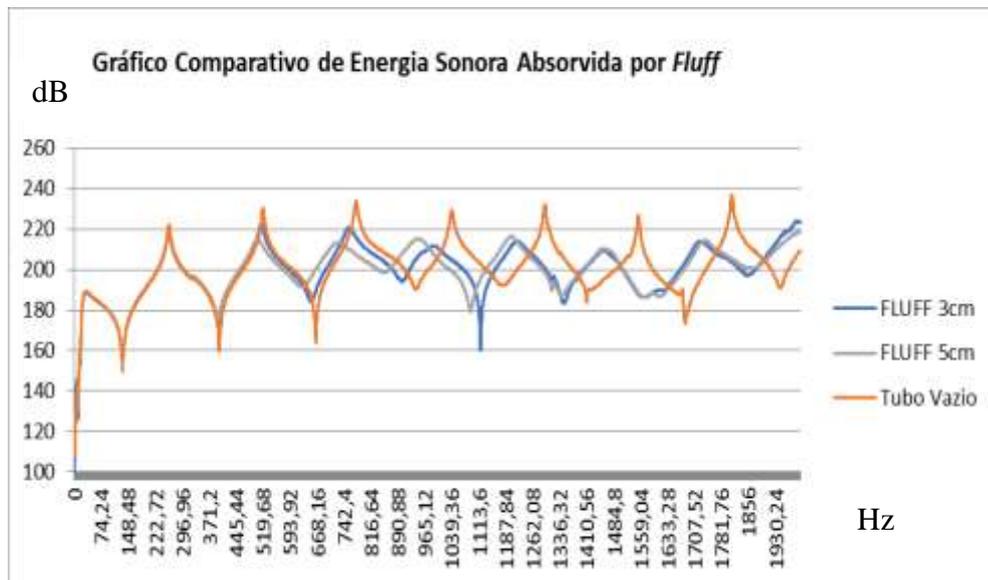


Para baixas frequências, de até aproximadamente 400 Hz, houve pouca atenuação da curva, ou seja, baixa capacidade de absorção sonora tanto para a placa de gesso preenchida com 5cm de *Fluff* como para a preenchida com lã de vidro. A partir de 400 Hz até 2.000 Hz percebe-se que as curvas representando o *Fluff* e a lã de vidro foram suavizadas, indicando absorção sonora, sendo que a atenuação provocada pela lã de vidro foi maior.

Houve melhor capacidade de absorção, principalmente para frequências mais baixas, quando se compararam as placas de gesso com preenchimento de 5 cm de *Fluff* ou lã de vidro com as de 3 cm.

Na FIG. 28 apresenta-se a comparação entre as curvas de medição de amplitudes sonoras por frequências para as amostras de placas de gesso preenchidas com 3 e 5 cm de espessura de *Fluff*.

Figura 28 - Comparação entre a atenuação acústica causada pelas placas de gesso preenchidas com 3 e 5 cm de *Fluff*

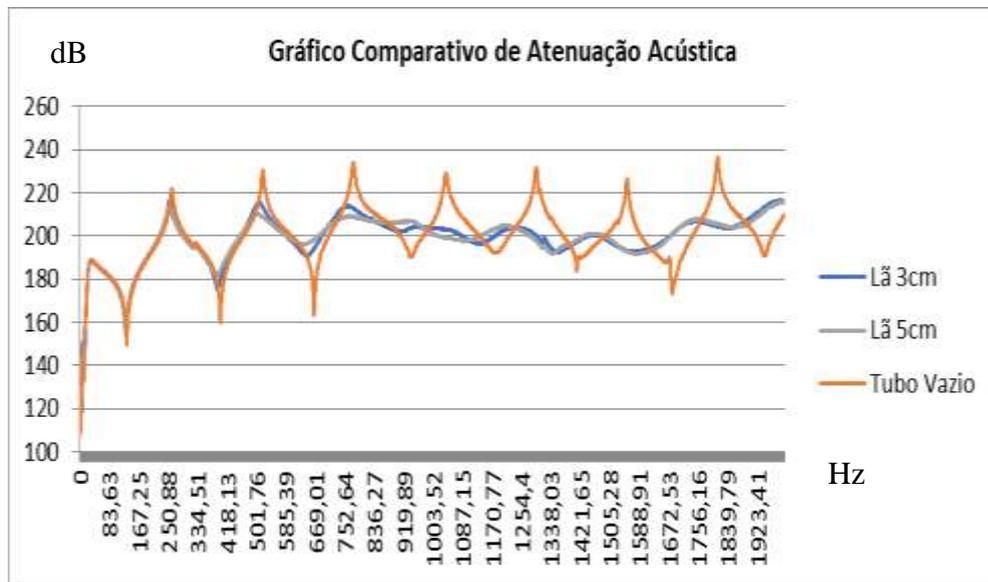


Comparando-se a atenuação provocada pelas amostras de gesso preenchido com *Fluff* de espessura de 5 cm e de 3 cm, nota-se que entre aproximadamente 500 e 1100 Hz houve atenuação sensivelmente maior para a placa com 5 cm de *Fluff*. Observa-se também que os picos da curva para o *Fluff* com 5 cm de espessura foram deslocados para a esquerda em relação aos da curva do *Fluff* com 3 cm, o que indica melhor desempenho de absorção em baixas frequências quando a espessura foi maior. Mas de forma geral o desempenho acústico em ambas as configurações foi bastante parecido.

Nota-se que até 500 Hz a mudança de espessura não teve efeito, assim como em frequências mais altas, acima de 1260 Hz.

A comparação entre a diferença do efeito de atenuação sonora provocada pela mudança de espessura do preenchimento das placas de gesso também foi feita para a lã de vidro (FIG. 29).

Figura 29 – Comparação de efeito de atenuação sonora de placas de gesso preenchidas com espessuras de 3 e 5 cm de lã de vidro

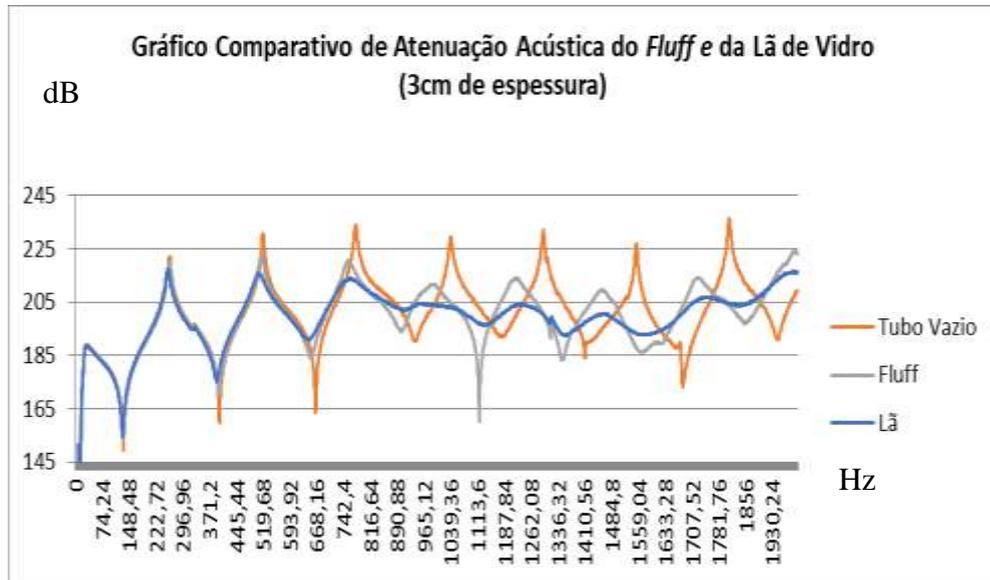


O desempenho acústico das placas de gesso preenchidas com lã de vidro foram muito semelhantes para as espessuras de 3 e 5 cm. Entre as frequências de 500 e 1.350 Hz houve atenuação sonora ligeiramente maior para a placa com maior espessura, assim como ocorreu no caso do preenchimento com *Fluff*.

Em baixas frequências, até 500 Hz, a espessura não teve efeito, assim como em frequências mais altas, acima de 1.350 Hz.

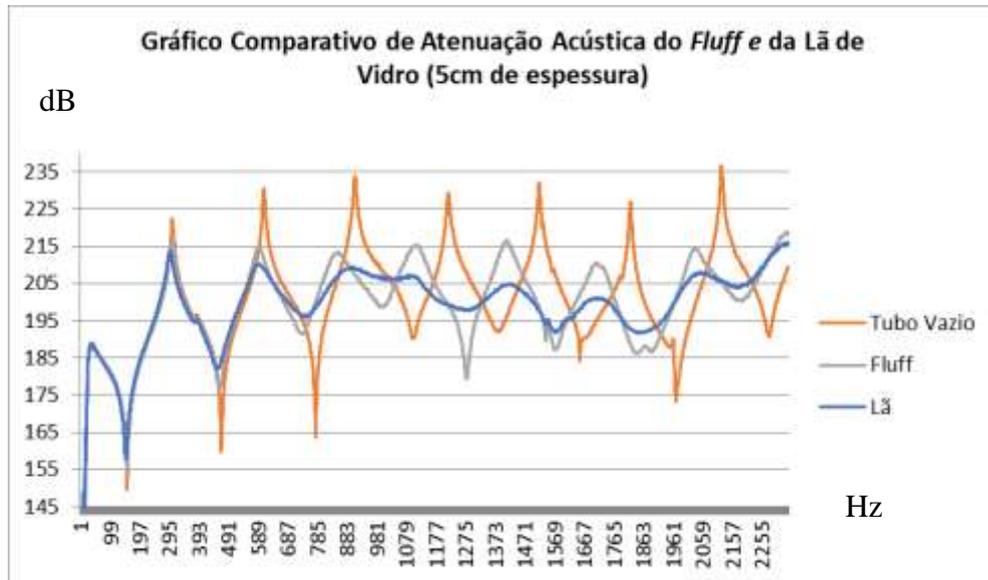
Os resultados para as medições realizadas para os discos de *Fluff* e lã de vidro sem o gesso, apenas uma tela de *nylon*, serão discutidos com base nas FIG. 30 e 31. A intenção dessas medidas foi avaliar o desempenho acústico do *Fluff* comparado ao do da lã de vidro sem a interferência da placa de gesso.

Figura 30 - Comparação entre atenuação sonora causada por discos de *Fluff* e lã de vidro com 3 cm de espessura



Analisando a Figura 30, não se detectou significativa diferença entre a atenuação acústica causada pelo *Fluff* e pela lã de vidro até aproximadamente 350 Hz. A partir dessa frequência até em torno de 800 Hz, a atenuação sonora do *Fluff* foi bem próxima da verificada na lã de vidro, sendo ambas moderadas. Já para as frequências acima de 800 até 2.000 Hz o desempenho da lã de vidro foi melhor, apesar do *Fluff* ter tido bom resultado quando se comparou com o tubo vazio.

Figura 31 - Comparativo entre atenuação sonora causada por discos de *Fluff* e lã de vidro com 5 cm de espessura



A análise do gráfico com os resultados da atenuação acústica causada por discos de 5 cm de espessura de *Fluff* e de lã de vidro revelou que uma leve atenuação se iniciou em frequências em torno de 150 Hz até 400 Hz para ambos os materiais. A partir dos 400 Hz a atenuação se tornou mais notável, havendo desempenho semelhante entre o *Fluff* e a lã de vidro até a frequência de aproximadamente 850 Hz. Dos 850 Hz até os 2.255 Hz, a atenuação causada pela lã de vidro se mostrou mais intensa, apesar de que houve considerável atenuação causada pelo *Fluff* quando se comparou com o tubo vazio.

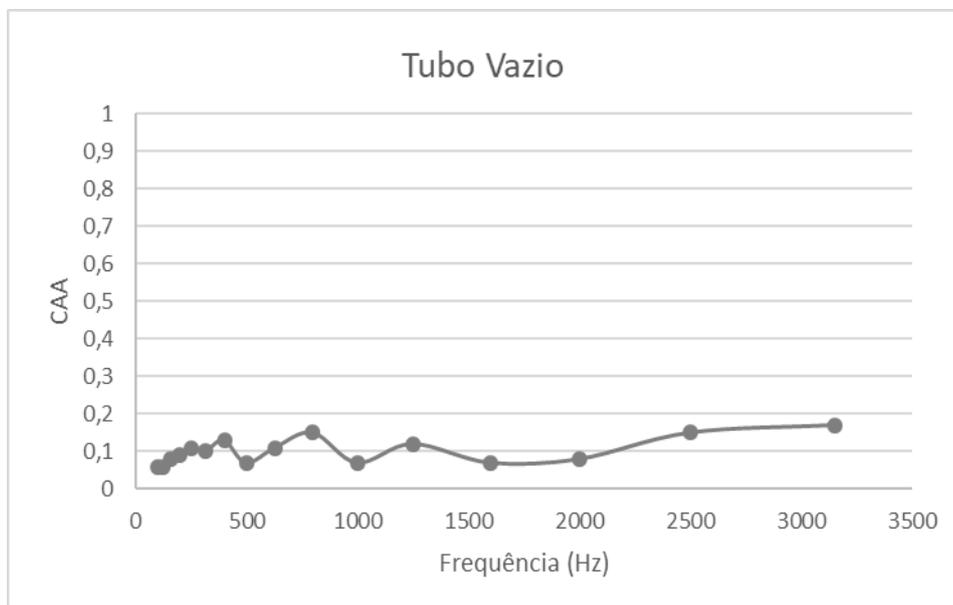
Resumindo o que se constatou nos gráficos, de forma geral tem-se:

- Em frequências mais baixas - até 500 Hz - não houve atenuação sonora significativa causada pelo *Fluff* ou lã de vidro. A partir dos 500 Hz nota-se que as amostras causaram atenuação das ondas sonoras ao se comparar com o tubo vazio, sendo que a lã de vidro teve efeito mais notável;
- Quando a diferença entre as amostras foi apenas a espessura, a comparação entre as atenuações mostra que o efeito foi pouco significativo, apesar de ligeira superioridade das amostras com maior espessura nas frequências mais baixas, entre 500 e 1.000 Hz. Isso vai ao encontro das pesquisas de materiais absorvedores, como em Gomes (2015).

5.7 Determinação do coeficiente de absorção acústica

Conforme exposto na metodologia, os testes seguiram o que orienta a norma ASTM-E-1050. Iniciaram-se as medições com o tubo vazio para servir de referência no entendimento das alterações do CAA causadas pelas amostras. Posteriormente, foi testada a amostra de lã de vidro, material bastante aplicado, por suas propriedades de absorção acústica e que serve como padrão para comparação e análise dos resultados das medições com as amostras de *Fluff*.

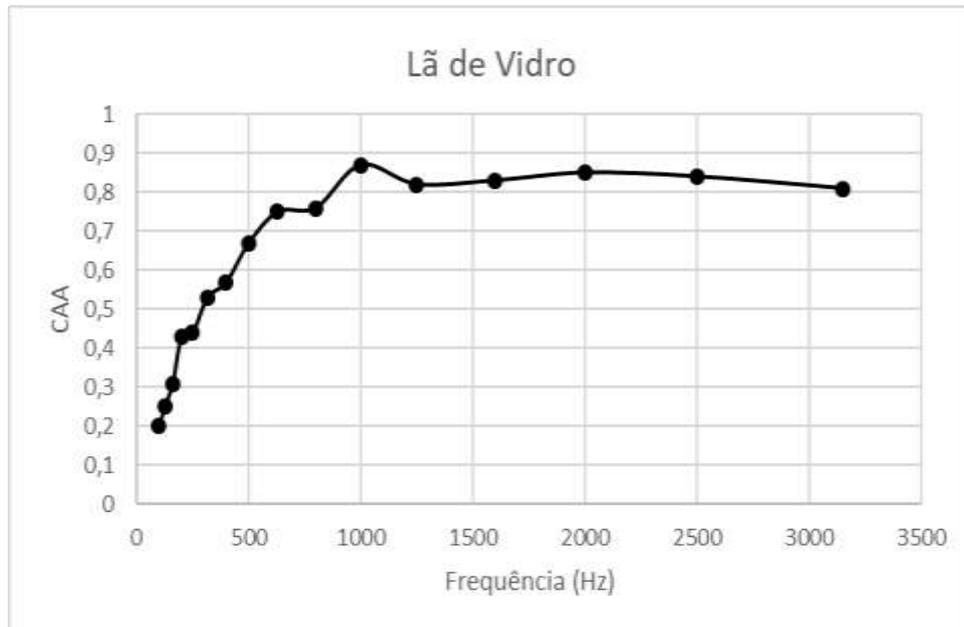
Figura 32 - Medição do CAA com o tubo de impedância vazio, sem amostra



O resultado da medição com o tubo vazio (FIG. 32), apresenta valores de CAA variando entre 0,06 e 0,17 ao longo da faixa de frequência utilizada, de 100 a 3.150 Hz. Atribui-se a existência de absorção à interação das ondas sonoras com o ar dentro do tubo e as paredes internas dele.

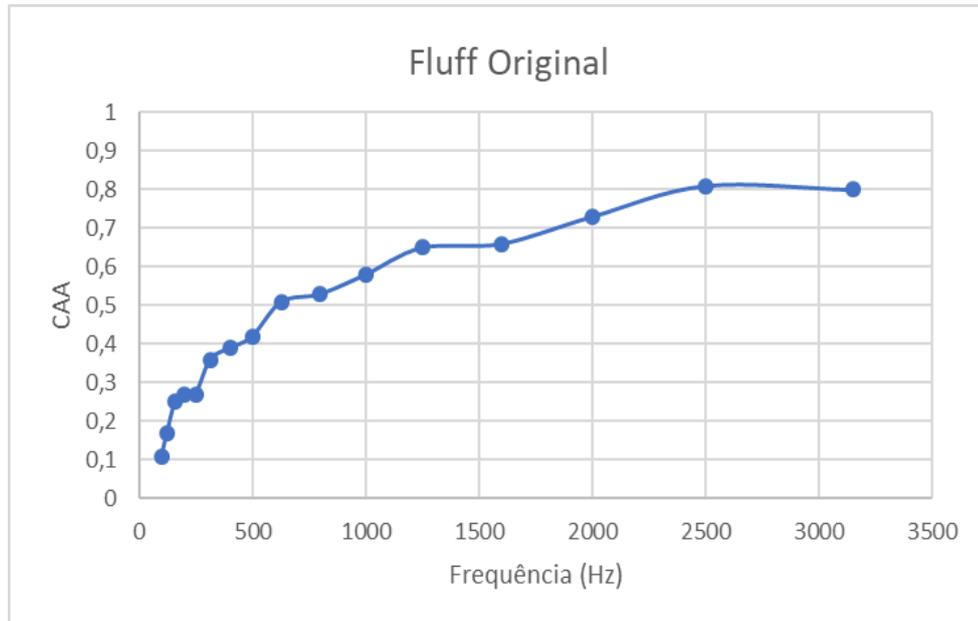
Parametrizando-se pela revisão bibliográfica em pesquisas com materiais absorvedores, na análise do CAA deste estudo, foi considerado que valores abaixo de 0,50 representam capacidade de absorção relativamente baixa, valores entre 0,50 e 0,70 são razoáveis e acima de 0,70 representam alta capacidade de absorção.

Figura 33 - CAA para a lã de vidro



Na FIG. 33, vê-se que entre 100 e 500 Hz o coeficiente de absorção aumentou de 0,20 para 0,67. O coeficiente continuou aumentando a partir de 500 Hz e atingiu o maior valor - 0,87 - na frequência de 1.000 Hz. A partir dessa frequência até 3.150 Hz, o coeficiente de absorção reduziu e elevou-se suavemente, mas se mantendo acima de 0,80.

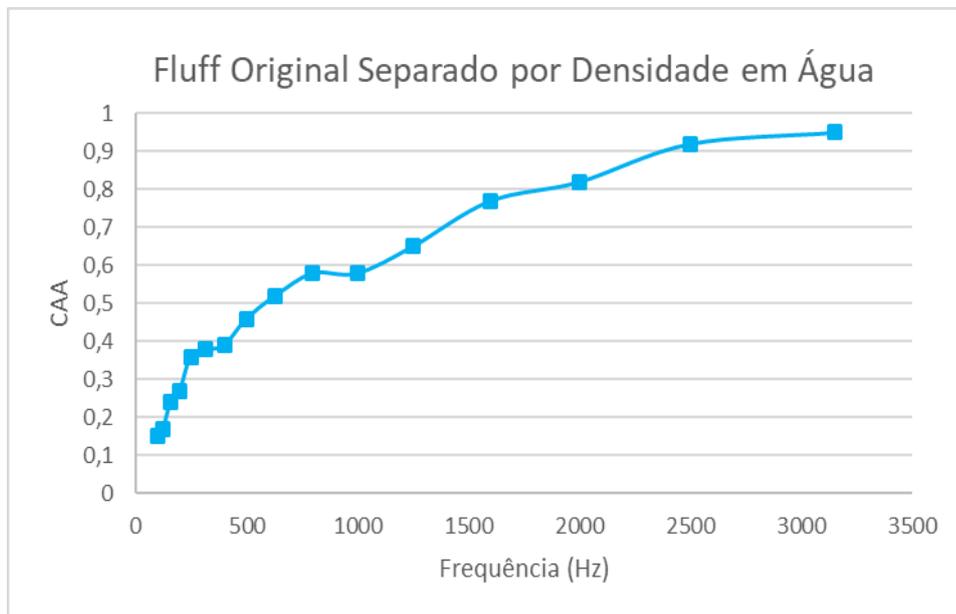
Verifica-se que a lã de vidro teve menos capacidade de absorção acústica em baixas frequências, até 500 Hz. No restante do espectro testado, esse material, como esperado, teve alta capacidade de absorção.

Figura 34 - CAA para o *Fluff* original (12 a 19,1 mm)

Na FIG. 34, entre 100 e 500 Hz o coeficiente de absorção aumentou de 0,11 a 0,42 e continuou aumentando a partir de 500 Hz, passando de 0,60 em frequências acima de 1.000 Hz. Ao chegar em 2.500 Hz o *Fluff* original alcançou sua mais elevada capacidade de absorção com o CAA de 0,81 e seguiu em torno de 0,80 até os 3.150 Hz.

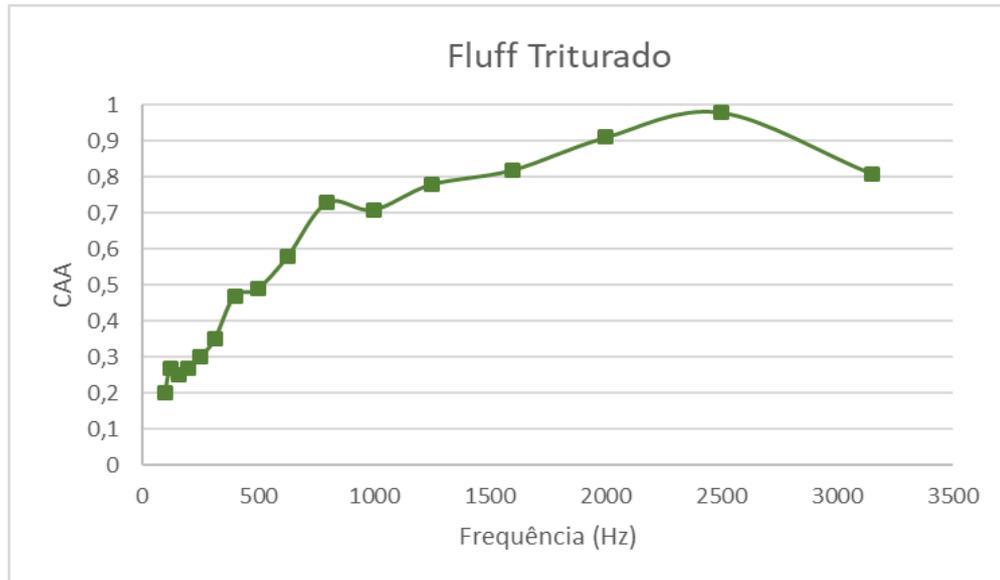
Logo, assim como a lã de vidro, o *Fluff* original apresentou menor capacidade de absorção acústica em baixas frequências, até 500 Hz. Entre 600 Hz e 2.000 Hz o material se mostrou competente na absorção e com alta capacidade nas frequências acima de 2.500 Hz

Figura 35 - CAA para o *Fluff* original (12 a 19,1 mm) separado por densidade em água



O CAA para o *Fluff* original separado por densidade em água, de acordo com a FIG 35, entre 100 e 500 Hz, aumentou de 0,15 para 0,46. O coeficiente continuou aumentando a partir de 500 Hz, mas se manteve com valores abaixo de 0,60 em frequências até 1.000 Hz. A partir de 1.500 Hz os valores do CAA ficaram acima de 0,70 e seguiram subindo, passando de 0,90 em torno de 2.500 Hz, tendo o valor mais alto de 0,95 para 3.150 Hz.

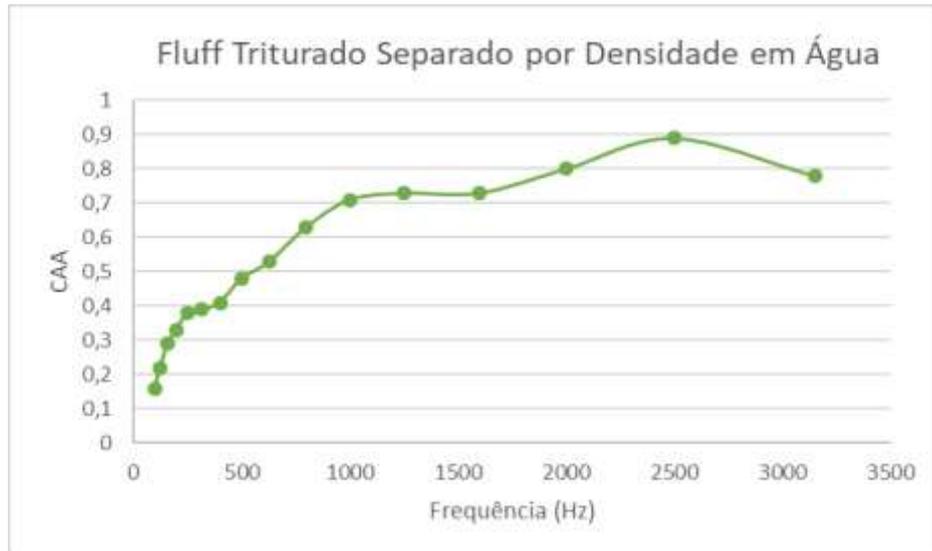
Dessa forma, o *Fluff* original separado por densidade em água tem baixa capacidade de absorção até os 600 Hz. Entre 600 Hz e 1.400 Hz o material se mostra competente na absorção e com alta capacidade nas frequências acima de 1.400 Hz. Chamou a atenção a alta capacidade de absorção sonora nas frequências acima dos 2.500 Hz.

Figura 36 - CAA do *Fluff* triturado (1 a 9 mm)

Os resultados da medição para o *Fluff* triturado acusaram rápido aumento do CAA entre 100 e 800 Hz com o coeficiente de absorção saindo de 0,20 e chegando a 0,73 (FIG 36). Dos 800 aos 1.500 Hz os coeficientes ficaram entre 0,70 e 0,80. A partir de 1.500 Hz o CAA ficou acima de 0,80, atingindo valor máximo de 0,98 em 2.500 Hz.

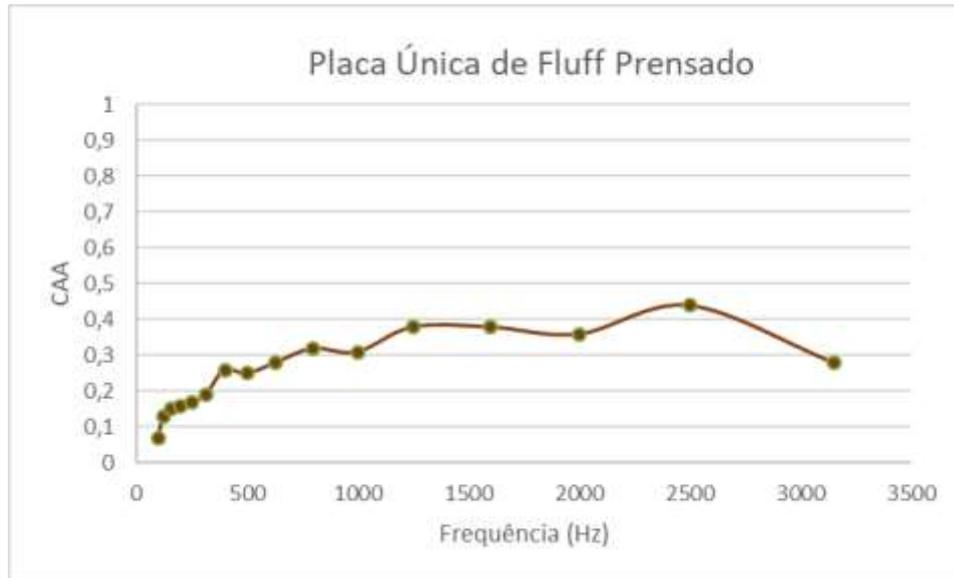
Nesse material com granulometria menor constatou-se também a reduzida capacidade de absorção nas baixas frequências. A partir dos 500 Hz até próximo de 800 Hz a absorção foi razoável, CAA entre 0,50 e 0,70. Nas frequências acima de 800 Hz o *Fluff* triturado mostrou alta capacidade de absorção.

Figura 37 - CAA do *Fluff* triturado (1 a 9 mm) separado por densidade em água



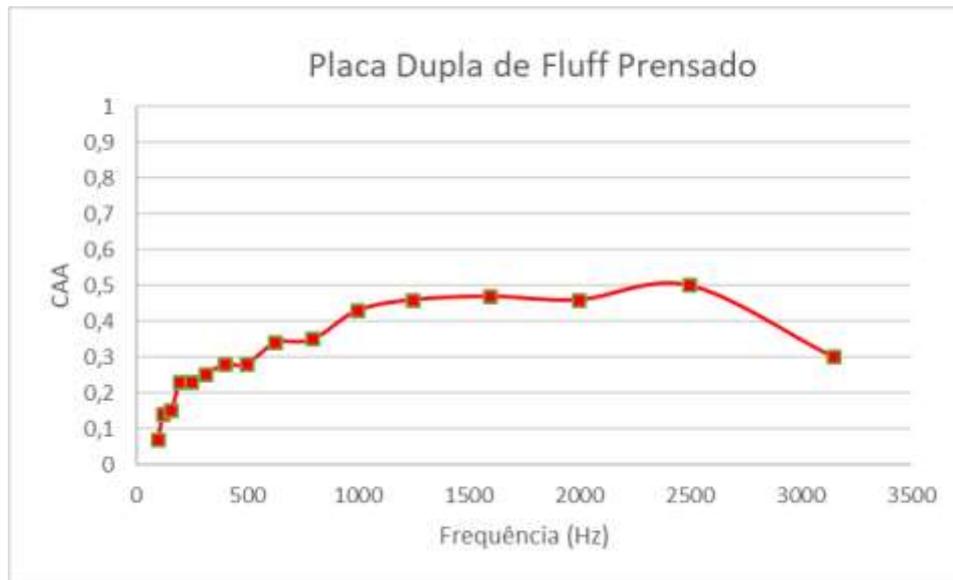
A FIG. 37 expõe que entre 100 e 500 Hz o coeficiente de absorção aumentou de 0,14 a 0,48. Ele seguiu subindo até a frequência de 1.000 Hz, atingindo o valor de 0,71 e mantendo-se nessa faixa até os 1.600 Hz, quando voltou a se elevar. E em 2.000 Hz chegou a 0,8, com curva ascendente constante atingindo valor máximo de 0,89 em 2.500 Hz. Dos 2.500 Hz em diante o CAA decresceu e ficou em 0,78 a 3.150 Hz.

Como todas as demais amostras, o *Fluff* separado por densidade em água e triturado demonstrou baixa capacidade de absorção sonora em frequências até 500 Hz. Mas já se mostrou competente, com razoável capacidade de absorção na faixa entre 500 e 1.000 Hz e com alta capacidade de absorção nas frequências acima desta.

Figura 38- CAA do *Fluff* prensado, uma placa

A FIG. 38 apresenta a curva de valores de CAA para a placa de *Fluff* obtida por prensagem a quente, onde nas frequências entre 100 e 600 Hz o coeficiente de absorção ficou com valores abaixo de 0,30. Entre 600 e 1000 Hz ele estabiliza em torno de 0,30 e a partir dos 1000 Hz o CAA aumenta timidamente, mas não chega a valores acima de 0,50 em nenhuma frequência. Seu valor máximo de 0,44 ocorre na frequência de 2.500 Hz. A partir dessa frequência os valores do CAA caem, ficando abaixo de 0,30 na frequência mais alta medida, 3.150 Hz.

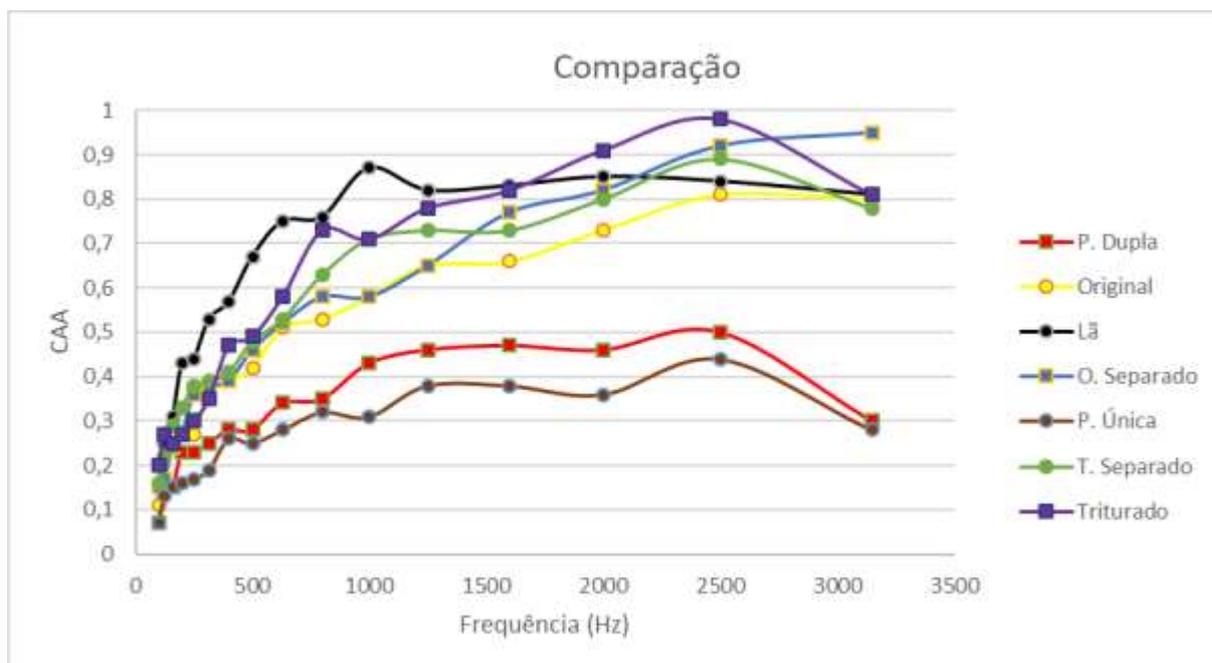
A placa de *Fluff* prensado demonstrou baixa capacidade de absorção sonora em todo o intervalo de frequência testado.

Figura 39 - CAA do *Fluff* prensado, 2 placas

A FIG. 39 representa a curva de valores de CAA quando duas placas de *Fluff* prensado foram utilizadas em sequência, com o intuito de aumentar a espessura da amostra e verificar o efeito na absorção. O padrão da curva se assemelhou bastante ao da curva anterior utilizando-se uma única placa. Até 500 Hz os valores de CAA não chegaram ao patamar de 0,30. Mas o ultrapassaram a partir de então, porém não ficaram acima de 0,50 para nenhuma frequência medida, apresentando o valor máximo, de 0,50 em 2.500 Hz. Para frequências acima desta, o CAA caiu voltando a 0,30 em 3.150 Hz .

A duplicação da espessura adicionando-se à amostra mais uma placa de *Fluff* prensado pouco melhorou a capacidade de absorção. Assim como para os testes com a placa única, a capacidade de absorção é máxima na frequência de 2.500 Hz, mas em momento algum o CAA fica acima de 0,50. No restante das frequências medidas o *Fluff* prensado mostrou baixa capacidade de absorção.

Figura 40 - Comparação dos CAAs dos diferentes materiais avaliados



As curvas de valores de CAA para todas as amostras testadas constam simultaneamente na FIG 40. Assim, pôde-se fazer a análise comparativa dos resultados.

Um fator comum a todas as amostras testadas, inclusive a de lã de vidro, foram os baixos valores de CAA para frequências até 500 Hz. Isso também foi referenciado na literatura sobre capacidade de absorção acústica de materiais porosos e fibrosos e apresentado em resumo por Portela (s.d.). Esse autor também expressou que o aumento da espessura desse tipo de material favorece o aumento da capacidade de absorção acústica, principalmente em frequências mais baixas - até 2.000 Hz.

Um padrão notável no gráfico comparativo de todas as amostras é a tendência de estabilização ou queda dos valores de CAA para frequências acima de 2500 Hz. A queda de capacidade de absorção é muito semelhante para as amostras de *Fluff* triturado e *Fluff* prensado a partir dessa frequência.

Os valores mais baixos de CAA para a faixa de frequência avaliada foram apresentados pelas amostras de placas de *Fluff* prensado. A amostra utilizando duas placas para aumentar a espessura relatou valores de CAA ligeiramente superiores em praticamente toda a faixa de frequência quando comparada à de placa única. Em função do que se leu na revisão

bibliográfica, o resultado inferior para absorção sonora da placa de *Fluff* era esperado, pois na sua prensagem o material perde porosidade e a espessura das amostras com esse tipo de material também foi inferior à dos demais testados.

O *Fluff* original e o original separado por densidade em água obtiveram conjuntamente desempenho inferior ao *Fluff* triturado e *Fluff* separado por densidade em água e triturado. A princípio, isso era inesperado, pois o material triturado tinha mais densidade, refletindo menos porosidade em relação aos originais. Uma explicação possível para isso é a granulometria do *Fluff* original usado no teste (12 a 19,1 mm), em função das dimensões para amostragem no tubo, discos de 20 mm de espessura e 46 mm de diâmetro. As amostras contendo poucas e grandes partes de *Fluff* proporcionaram vazios, poros grandes o suficiente para permitir a passagem direta de ondas sonoras, que refletiram no fundo rígido do tubo sem perda de energia mais significativa. A resistividade ao fluxo e a tortuosidade, fatores importantes que interferem no CAA, devem ter ficado menores nas amostras de *Fluff* original comparadas às de *Fluff* triturado (GIESBRECHT, 2007). O *Fluff* original separado por densidade apresentou CAA ligeiramente superior ao seu similar em frequências a partir de 1.250 Hz, conforme esperado. A capacidade de absorção sonora foi inferior quando se comparou à lã de vidro. No entanto, o *Fluff* original separado por densidade chegou a superar os valores de CAA da lã de vidro, a partir de 2.250 Hz.

As amostras de *Fluff* triturado obtiveram os melhores resultados de absorção, não se considerando a lã de vidro, notadamente o triturado sem a prévia separação por densidade em água. Este último, inclusive, teve valores medidos de CAA superiores ao da lã de vidro, a partir de 1.600 Hz. As curvas das amostras de *Fluff* triturado foram bem semelhantes, mas contra o esperado. A amostra com *Fluff* triturado teve valores de CAA acima de sua similar separada por densidade em água em todas as frequências medidas acima de 500 Hz. A explicação para isso não é simples e precisaria de outros testes, medição de resistividade ao fluxo, por exemplo (GIESBRECHT, 2007). O que se imagina é que na montagem com disposição aleatória do material para preenchimento e formação dos discos testados pode ter havido um arranjo dos grãos na amostra de *Fluff* triturado que promoveu uma tortuosidade e resistência ao fluxo maior do que em seu similar.

Uma forma interessante, resumida e bastante utilizada para transmitir a capacidade de absorção sonora de um material é por meio do cálculo de seu *Noise Reduction Coefficient*

(NRC), coeficiente de redução de ruído. Ele é obtido pela média aritmética dos valores de CAA do material, amostra testada, nas frequências de 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz, conforme equação:

$$\text{NRC} = \frac{\alpha_{250\text{Hz}} + \alpha_{500\text{Hz}} + \alpha_{1000\text{Hz}} + \alpha_{2000\text{Hz}}}{4}$$

A TAB. 4 traz os valores de NRC para as amostras testadas no trabalho:

Tabela 4 – Valores de NRC para as amostras

Valores de NRC para as amostras							
Amostras	P. Única	P. Dupla	Original	O. Separado	T. Separado	Triturado	Lã
NRC	0,27	0,35	0,50	0,56	0,59	0,60	0,71

A lã de vidro atingiu o maior valor de NRC, 0,71, refletindo maior capacidade de redução de ruído. Em seguida, têm-se o *Fluff* triturado e triturado separado por densidade com, respectivamente, 0,60 e 0,59. Apresentaram valor de NRC de 0,50 o *Fluff* original e 0,56 o seu similar separado por densidade em água. Conforme critério adotado no início deste item, as amostras de *Fluff*, exceto as em placa, tiveram razoável capacidade geral de absorção sonora, ou seja, mostraram-se competentes nessa função. Lembra-se, claro, que estes são testes realizados em escala amostral e numeral reduzida, porém servem como bom indício da possibilidade de aplicação desse material considerando sua característica de absorvente acústico.

6 VALOR EM USO DO TRATAMENTO E VENDA DO *FLUFF*

O fluxo do processo para o aproveitamento do *Fluff* por meio de sua trituração para a venda é ilustrado na FIG 41 abaixo:

Figura 41 – Ilustração do processo de trituração e peneiramento do *Fluff* para venda



A análise de viabilidade financeira foi feita para o *Fluff* triturado, pois foi o que obteve o melhor resultado nas medições de CAA no tubo de impedância. Para a análise utilizou-se o conceito de valor presente líquido (VPL). A interpretação para o VPL é de que se ele for positivo o investimento é rentável e se for negativo não é rentável, e não compensa ao investidor. A fórmula para o cálculo do VPL é a seguinte:

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} - \text{Investimento Inicial}$$

FC = Fluxo de caixa

TMA = Taxa mínima de atratividade

j = período de cada fluxo de caixa

A Tabela 5 a seguir apresenta algumas premissas adotadas e valores levantados que serão explicados e trabalhados ao longo deste capítulo.

Tabela 5 – Premissas adotadas e valores levantados.

Premissas e Valores Levantados	
Preço de venda Fluff triturado por tonelada	R\$ 85,12
Custo de energia (kWh)	R\$ 0,24
Custo de manutenção (85% do valor do produto ao longo da vida útil dele)	Triturador (vida útil de 3 anos) R\$ 76.500,00 Peneira (vida útil de 10 anos) R\$ 29.750,00
Custo mão de obra mensal por operador (salário+encargos+benefícios)	R\$ 4.838,78
Operação 345 dias por ano e 24 horas por dia	
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	12%

Primeiramente foi preciso estimar um valor razoável para o *Fluff* triturado, que não tem ainda uma referência de mercado. Assim, extraiu-se o preço estimado do *Fluff* triturado em 16 dólares americanos por tonelada (JODY, 1992). Apesar da data antiga desta estimativa, ela foi entendida como a mais adequada, pois há nesta publicação a proposta de um processo de pelotização do *Fluff* para venda, contendo o tratamento e produto mais aproximado ao aqui proposto. O valor em dólar foi convertido em nossas contas para real considerando a cotação do dia 10/07/2020 de R\$ 5,32 = U\$ 1,00 (<https://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/>). Então, adotou-se o valor de venda do *Fluff* triturado sendo de **R\$ 85,12** por tonelada.

Um triturador da marca Rone – modelo N-700, semelhante ao utilizado nessa pesquisa para obtenção do *Fluff* triturado a partir do *Fluff* original, custa em torno de **R\$ 90.000,00**, de acordo com a fabricante. Ele tem capacidade de produção de 24 toneladas por dia, considerando operação de 24 horas diárias. Este equipamento opera com potência de 18,5 kW e, de acordo com a aciaria fornecedora do *Fluff*, a tarifa média de energia paga por eles é de aproximadamente R\$ 0,24/kWh. Então, 24 horas de operação diária, significaria um gasto com energia de $18,5\text{kW} \times \text{R\$ } 0,24/\text{kWh} \times 24\text{h} = \text{R\$ } 106,56$ por dia.

O preço de uma peneira vibratória industrial com capacidade para selecionar o *Fluff* triturado em fração entre 1 e 9 mm, como feito aqui na pesquisa, é de **R\$ 35.000,00** (<https://www.mfrural.com.br/detalhe/191725/peneira-vibratoria-de-alta-producao>).

Considerando o equipamento operando com potência de 6 kW e as mesmas premissas de operação do triturador ter-se-ia um gasto com energia de $6\text{ kW} \times \text{R\$ } 0,24/\text{kWh} \times 24\text{h} = \text{R\$ } 34,56$ por dia.

O custo de manutenção de equipamentos desse tipo é de 85% do valor de compra deles ao longo da vida útil. (MARTINS, 2016). A vida útil estimada pelos fabricantes nas condições de operação aqui descritas é de 3 anos para o triturador e de 10 anos para a peneira. No caso, significaria um custo de $0,85 \times \text{R\$ } 90.000,00 = \text{R\$ } 76.500,00$ a cada 3 anos para o triturador e de $0,85 \times \text{R\$ } 35.000 = \text{R\$ } 29.750,00$ para a peneira vibratória em 10 anos. Ou seja, o gasto anual com manutenção seria de $\text{R\$ } 76.500,00/3 = \text{R\$ } 25.500,00$ para o triturador e de $\text{R\$ } 29.750,00/10 = \text{R\$ } 2.975,00$ para a peneira.

Considerando que a contratação de um operador para se responsabilizar por esse serviço tenha salário médio é de R\$ 1.548,41. (<https://www.salario.com.br/profissao/operador-de-maquina-trituradora-tratamentos-quimicos-e-afins-cbo-811115/>). Estima-se que o salário represente 32% dos custos de um funcionário (<https://www.jornalcontabil.com.br/quanto-custa-um-funcionario-para-uma-empresa/>). Portanto, nesse caso, haveria um custo mensal de **R\$ 4.838,78**. Adotamos que esse será o valor gasto mensalmente por operador, sendo necessários quatro operadores para cumprir turnos de 6 horas mantendo os equipamentos funcionando por 24 horas diárias.

Outra premissa importante adotada para os cálculos é de que os equipamentos operariam 345 dias por ano, sendo os demais 20 dias restantes estimados para manutenção e paralisações por outros motivos.

Analisando os valores destacados e trazendo-os para um fluxo de caixa anual temos:

- Ganhos anuais:
 - Venda de *Fluff* triturado = R\$ 85,12/t X 24 t/dia X 345 dias/ano = **R\$ 704.793,60**.
- Gastos anuais:
 - Energia = (R\$ 106,56/dia + R\$ 34,56/dia) X 345 dias/ano = **R\$ 48.686,40**
 - Manutenção = (R\$ 25.500,00 + R\$ 2.975,00) = **R\$ 28.475,00**
 - Mão de obra = R\$ 4.838,78/mês X 12 meses X 4 operadores = **R\$ 232.261,50**

A Tabela 6 a seguir resume as premissas e cálculos para obtenção do VPL num fluxo de caixa anual e período considerado de 10 anos.

Tabela 6 – Resumo dos valores de investimento levantados mais receita e custos anuais calculados.

Resumo dos Investimentos, Custos e Receitas					
Receita Anual		Investimento (Capex)		Custos Operacionais Anuais (Opex)	
Preço de venda do Fluff triturado	R\$ 85,12/ton	Preço triturador (investimento a cada 3 anos)	R\$ 90.000,00	Energia	R\$ 48.686,40
Produção anual	8.280 ton	Preço peneira (investimento a cada 10 anos)	R\$ 35.000,00	Manutenção	R\$ 28.475,00
Receita	R\$ 704.793,60			Mão de obra	R\$ 232.261,50

Adotou-se uma taxa mínima de atratividade TMA = 12 %, usual entre as empresas metalúrgicas consultadas.

O Anexo I apresenta o cálculo do VPL realizado em Excel, cujo resultado é positivo em **R\$ 1.124.194,69** para o período de 10 anos adotado. Ou seja, considerando-se as prerrogativas usadas, o projeto para triturar, peneirar e comercializar o *Fluff* para uso como absorvedor acústico traria um retorno financeiro atrativo

O *Payback* simples ou período de retorno do investimento inicial é de pouco mais de 6 meses, uma vez que o valor de investimento é de R\$ 125.000,00 e o fluxo de caixa anual, desconsiderado o TMA, é de R\$ 241.174,10, conforme verifica-se no Anexo I.

$$\text{Payback simples} = \frac{\text{Valor investido}}{\text{Fluxo de caixa}} = \frac{\text{R\$ } 125.000,00}{\text{R\$ } 241.174,10} = 0,52 \text{ ano}$$

É fundamental frisar que não se levou em conta nessa avaliação de viabilidade financeira que a empresa geradora do *Fluff* tem um custo atual de R\$ 53,00 por tonelada para destinação a aterro. Então a produção, aproveitamento, diária de 24 toneladas significaria a economia de R\$ 1.272,00 por dia. Isto é, uma economia anual com destinação de *Fluff* para aterro = R\$ 1.272,00/dia X 345 dias úteis/ano = **R\$ 438.840,00**.

Para efeito de comparação, considerando-se as massas usadas para ocuparem o mesmo volume nas amostras testadas no tubo de impedância, 11,4 g de *Fluff* triturado e 3,8 g de lã de vidro, a de lã de vidro foi um terço da de *Fluff*. O valor da lã de vidro da Isover WF4 + é de R\$ 129,90 (site da Leroy Merlin, em 03/07/2020) para um rolo com as dimensões 1,20 m X 12,50 m X 0,050 m = 0,75m³, ou seja, R\$ 129,90/0,75 m³ = R\$ 173,20/m³. Pela TAB 3. a densidade da amostra com lã de vidro usada no teste foi de 28,58 kg/m³. Assim, temos o valor de R\$ 173,20 para 28,58 Kg, o mesmo que R\$ 6.060,18 por tonelada de lã de vidro. Como citado, se usou um terço de massa de lã de vidro comparado à massa de *Fluff* para preencher o mesmo volume, então se gastaria R\$ 2.020,06 com lã de vidro para a mesma aplicação que custaria R\$ 85,12 se utilizado o *Fluff* triturado. Isto representa um custo quase 24 vezes maior.

7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho foi motivado pelos estudos de ciências dos materiais e a possibilidade de sua aplicação na resolução de problemas ambientais. Assim, a ideia de se aproveitar o *Fluff*, um resíduo de composição diversificada, para a redução da poluição sonora numa hipotética aplicação em divisórias de edificações encaixou-se perfeitamente. Então, a sua caracterização e a avaliação da capacidade de absorção acústica tornaram-se os objetivos desta pesquisa.

A caracterização do *Fluff* começou pela sua composição material, que revelou ser predominantemente de plástico, espuma e borracha, que somaram 60% em massa. A análise de composição elementar mostrou que C e H respondem por 59% da massa, indicando a composição majoritária por polímeros. Esta composição refletiu num poder calorífico superior alto de 23,67 MJ/Kg, maior que o do bagaço da cana de açúcar seco que é de 19,26 MJ/Kg, por exemplo. A termogravimetria mostrou que o *Fluff* tem uma perda de massa de 32% até a temperatura de 500°C, sendo que esta perda ocorre praticamente no intervalo entre 250 e 500°C.

Foram executados dois processos de avaliação da capacidade de absorção acústica do *Fluff* usando-se tubos de impedância e métodos diferentes. Os discos de amostras testadas nos tubos de impedância tiveram suas densidades calculadas. Materiais de baixa densidade tendem a ser mais porosos, o que lhes confere maior capacidade de absorção acústica. As amostras com *Fluff* testadas no tubo de impedância da UFOP apresentaram densidades próximas de 150 Kg/m³ enquanto as amostras com lã de vidro ficaram com densidades próximas de 50 Kg/m³. Já as amostras com *Fluff* testadas no tubo de impedância da UFRJ tiveram a densidade variando entre 48,89 Kg/m³ (*Fluff* separado por densidade em água) e 238,69 Kg/m³ (*Fluff* prensado a quente) de acordo com o processo de tratamento realizado anteriormente no material. A amostra com lã de vidro testada nesse mesmo tubo apresentou densidade de 28,58 Kg/m³.

O primeiro processo de avaliação da capacidade de absorção acústica do *Fluff* foi um teste comparativo e não uma medição direta do CAA, sendo a interpretação dos resultados realizada por meio da análise de atenuação de picos nos gráficos de variação da amplitude sonora em função da frequência. Os resultados mostraram que em frequências acima de 500

Hz o *Fluff* e a lã de vidro causaram significativa atenuação sonora, estando ou não preenchendo placas gesso. O efeito atenuante da lã de vidro foi mais proeminente.

No segundo processo de avaliação da absorção acústica utilizou-se um tubo de impedância com os devidos equipamentos para medição do CAA, seguindo-se a norma ASTM-E-1050. As medidas de CAA abrangeram a faixa de frequência de 100 a 3.150 Hz. A medição foi feita para oito discos de amostras, sendo compostos de:

- a) Lã de vidro;
- b) *Fluff* original;
- c) *Fluff* original separado por densidade em água;
- d) *Fluff* triturado;
- e) *Fluff* triturado separado previamente por densidade em água;
- f) Placa de *Fluff* prensado;
- g) Placa dupla de *Fluff* prensado.

Os resultados levaram a conhecer que a absorção acústica desses materiais até 500 Hz é baixa, inclusive da lã de vidro. O *Fluff* triturado, separado ou não por densidade, obteve os maiores valores de CAA dentre as amostras de *Fluff*, acima de 0,7 para frequências entre 1.000 e 3.150 Hz. Os resultados para o *Fluff* original separado ou não por densidade em água também foram satisfatórios, com valores acima de 0,6 para frequências entre 1.000 e 3.150 Hz. Já as placas de *Fluff* prensado tiveram baixo desempenho, com valores de CAA não ultrapassando 0,50 em todas as frequências testadas.

As placas de *Fluff*, apesar de não terem boa capacidade de absorção acústica, foram de fácil formação e sua aplicação, ao reduzir o volume de resíduo depositado em aterro, deve ser avaliada e pesquisada. Imagina-se, por exemplo, o uso como tapumes ou pisos flexíveis com cobertura de outro material.

Com os valores de CAA foi calculado o NRC (uma média dos coeficientes de absorção) para as amostras, em que o da lã de vidro foi de 0,71, do *Fluff* triturado de 0,60, do triturado separado por densidade em água de 0,59 e do original separado por densidade em água de 0,56. Esses valores de NRC das amostras de *Fluff* indicam a viabilidade técnica da aplicação considerando-se a propriedade de absorção sonora.

A análise de viabilidade financeira para tratamento e venda do *Fluff* por meio do cálculo do valor presente líquido (VPL) indicou que se considerando uma taxa mínima de atratividade de 12% é financeiramente viável tal comercialização, com $VPL = R\$ 1.124.194,69$ num horizonte de 10 anos. Considerando-se as prerrogativas usadas, o projeto para triturar, peneirar e comercializar o *Fluff* para uso como absorvedor acústico traria um retorno financeiro atrativo.

O *Payback* simples ou período de retorno do investimento inicial é de pouco mais de 6 meses, ou seja, é um projeto que se paga rapidamente.

Também tem-se que destacar que com estes equipamentos e condições de operação utilizados para os cálculos, haveria um aproveitamento de *Fluff* anual de 8.280 toneladas. O que significaria evitar a destinação para aterro sanitário, representando uma economia anual de R\$ 438.840,00. Pois, segundo a empresa fornecedora do *Fluff* para essa pesquisa, se gasta atualmente R\$ 53,00 por tonelada para a destinação ao aterro.

O aproveitamento do *Fluff* significa um grande benefício ambiental, dada a elevada quantidade gerada desse material. Este aproveitamento implicaria em redução da necessidade de áreas para aterrar resíduos, redução de impactos causados na extração de material primário para a aplicação com a função de absorção acústica, atenuação da poluição sonora e diminuição do passivo ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALGAILY, B.; PUTTAJUKR, S. Acoustic absorption and physicochemical properties of SBR/RR foam. **International Journal Technical Research and Applications**, v. 2, p. 15-18, 2014.
- ASDRUBALI, F.; D'ALESSANDRO, F.D.; SCHIAVONI, S. **Sound absorbing properties of materials made of rubber crumbs**. Università degli studi di Perugia, Italy. Acoustics' 08 Paris, 2008.
- ASDRUBALI, F. *et al.* A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable materials and technologies**, v. 4, p. 1-17, 2015.
- BATISTA, D.C. **Classificação e caracterização dos resíduos do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação de viabilidade de aplicações**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia São Carlos, USP, 2014.
- BÖRJESON, L. *et al.* Characterization of automotive shredder residues from two shredding facilities with different processes in Sweden. **Waste Manage Res**, v. 18, p. 358-366, 1999.
- CAETANO, J.A. **Reaproveitamento do resíduo terra de Shredder através da técnica de solidificação/estabilização em matrizes de cimento Portland para aplicação na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - USP, 2016.
- CÂMARA, G.G. **Caracterização das frações do resíduo do triturador de sucata de uma siderúrgica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharias – UFRS, Porto Alegre, 2017.
- D'ALESSANDRO, F.; PISPOLA, G. Sound absorption properties of sustainable fibrous materials in an enhanced reverberation room. In: CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING. **Proceedings of Internoise**, 2005. Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- DAY, M.; COONEY, J.D.; SHEN, Z. Pyrolysis of automobile shredder residue: an analysis of the products of a commercial screw Kiln process. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 37, p. 49–67, 1996.
- FOULADI, M.H. *et al.* **Utilization of coir fiber in multilayer acoustic absorption panel**. Rio de Janeiro, Elsevier, v. 71, Issue 3, 2009.
- GIESBRECHT, P.K. **Incerteza na medição das características acústicas dos materiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFSC, Florianópolis, 2007.
- GOMES, C.V.S. **Comportamento acústico de materiais absorvedores em multicamadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFMG, Belo Horizonte, 2015.

GUIMARÃES, G. P. **Experimental investigation on the acoustic impedance of Helmholtz resonators using an accelerometer for the volume velocity source.** – UFOP, Ouro Preto, 2018.

HASAN *et al.* Low-frequency sound proof cement-based syntactic foam. *Int. J. Mater. Mech. Manuf.*, n. 1, p. 385-387, 2013.

HE, M. *et al.* Multiscale prediction of acoustic properties for glasswools: Computational study and experimental validation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 143, n. 6, p. 3283-3299, June 2018.

HUGOT, E. **Handbook of cane sugar engineering.** Tradução de Jenkins, G.H., 7. ed., Sugar Technology Series, v. 7 1996, World Crop Pests. ISSN 0167-7675.

JIMÉNEZ-ESPADA, M.; DIAS-SANCHIDRIAN, C. The use of reed panels in suspended ceiling and room dividers. **Proceedings of Internoise 2010.** Lisbon, Portugal, p. 16, June 2010.

JODY, B.J. *et al.* Treatment and Recycling of Shredder Fluff: Final Report on Phase I, Proof of Concept. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, ANL/ESD--13, 1992.

JODY, B.J. *et al.* **End of-life vehicle recycling:** the state of the art of resource recovery from shredder residue. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, ANL/ ESD/10-8, 2010.

JOHNSON, D.L. *et al.* Tortuosity and acoustic slow waves. **Physical Review Letters**, 1982.

LAMOUNIER, M.M. **Critério para a seleção de materiais acústicos utilizados em recintos fechados para diferentes tipologias.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

LUCA, C.R. **Desempenho acústico em sistemas drywall.** 2. ed., Associação Brasileira do Drywall, São Paulo, 2015.

MARQUES, L.M.; SALDANHA, R.B. Caracterização de resíduo da indústria siderúrgica para aproveitamento na construção civil. 2014.

MARTINS, N. K. Composição de custos de implantação e operação de centrais de valorização de resíduos sólidos urbanos secos. **Revista Científica Faesa**, v. 12, n. 1, p. 23-30, 2016

MASINI, H.F.; TEODORO, E.B. Medição automática do coeficiente de absorção acústica de materiais. **Horizonte Científico**, v. 5, n. 10, 2011.

MELO, L.R. **Estudo da capacidade de atenuação acústica da manta residual de acetato de metila etil (EVA) em escala absoluta.** Monografia (Trabalho de conclusão de curso de Ciências Exatas e Tecnológicas) – Universidade Federal do Recôncavo Baiano, Cruz das Almas, 2017.

OLIVEIRA, E.C.; TEODORO, E.B. Métodos para medição do coeficiente de absorção sonora. *In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA*, Uberlândia. **Anais...**, 2005.

PORTELA, M. **Acústicas de salas**: conceitos para acústica arquitetônica. LVA/UFSC, s.d.

RAJAPPAN, S.; BHASKARAN, P.; RAVINDRAN, P. An insight into the composite materials for passive sound absorption. **Journal of Applied Sciences**, v. 17, Issue 7, p. 339-356, 2017.

RECKZIEGEL, V.N. **Caracterização para o aproveitamento do resíduo de um triturador de sucata em uma usina siderúrgica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharias – UFRS, Porto Alegre, 2012.

SARI, N.H. *et al.* Corn husk fiber-polyester composites as sound absorber: Nonacoustical and acoustical properties. **Advances in Acoustics and Vibration**, n. 4, p. 1-8 · Jan. 2017.

WANG, Y., *et al.* Influences of rice hull in polyurethane foam on its sound absorption characteristics. **Polym. Compos.**, n. 34, p. 1847-1855, 2013.

WANG, X. *et al.* Acoustic perfect absorption and broadband insulation achieved by double-zero metamaterials. **Applied Physics Letters**, v. 112, n. 2, p. 021901, Jan. 2018.

Anexo I

ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA PARA TRITURAR E VENDER O FIUFF										
Investimento	Depreciação anual									
Triturador de Fiuff	90.000,00	30.000,00	Investimento em novo triturador a cada 3 anos							
Peneira vibratória	35.000,00	3.500,00	Investimento em nova peneira a cada 10 anos							
Receita anual com venda de Fiuff	704.793,60									
Despesas										
Opex - Custo anual de energia	48.686,40									
Opex - Custo anual de manutenção	28.475,00									
Opex - Custo anual de mão de obra	232.261,50									
Pis/Cofins	9,25%									
TMA	12,00%									
Imposto de Renda	30,00% considerando alíquotas de 15,00% IR + 10,00% adicional IR + 9,00% Contribuição Social - (adições - exclusões LALUR)									
Financeiro	Considerou-se o investimento à vista.									
FCE / Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Receita Bruta de Vendas	704.793,60	704.793,60	704.793,60	704.793,60	704.793,60	704.793,60	704.793,60	704.793,60	704.793,60	704.793,60
(-) Pis/Cofins	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41	-65.193,41
Receita Líquida de Vendas	639.600,19	639.600,19	639.600,19	639.600,19	639.600,19	639.600,19	639.600,19	639.600,19	639.600,19	639.600,19
(-) Custo de energia	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40	-48.686,40
(-) Custos de manutenção	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00	-28.475,00
(-) Custo mão de obra	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50	-232.261,50
(-) Depreciação Triturador de Fiuff	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00	-30.000,00
(-) Depreciação Peneira vibratória	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00	-1.500,00
(=) EBIT (=LBO)	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29
(=) Lucro antes do IR	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29	296.677,29
(-) Imposto	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19	-89.003,19
(=) NOPLAT	207.674,10	207.674,10	207.674,10	207.674,10	207.674,10	207.674,10	207.674,10	207.674,10	207.674,10	207.674,10
(+) Depreciações	33.500,00	33.500,00	33.500,00	33.500,00	33.500,00	33.500,00	33.500,00	33.500,00	33.500,00	33.500,00
(-) CAPEX *	-125.000,00			-90.000,00			-90.000,00			-90.000,00
(=) FCFF	116.174,10	241.174,10	241.174,10	151.174,10	241.174,10	241.174,10	151.174,10	241.174,10	241.174,10	151.174,10
(=) Valor Presente do Projeto	1.124.194,69									
Conferência Valor Presente	103.726,88	192.262,52	171.662,96	96.073,88	136.848,66	122.186,31	68.383,49	97.406,18	86.969,80	48.674,02
	1.124.194,69									