



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PANEL ACÚSTICO A
PARTIR DEL DESECHO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

AUTORES

JORGE SANTIAGO ARROYO CHUQUÍN

SAÚL ISRAEL MÉNDEZ CHICAIZA

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PANEL ACÚSTICO A PARTIR
DEL DESECHO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingenieros en Sonido y Acústica

Profesor guía

MSc. María Bertomeu Rodríguez

Autores

Jorge Santiago Arroyo Chuquín

Saúl Israel Méndez Chicaiza

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo, Obtención y caracterización de un panel acústico a partir del desecho de la caña de azúcar, a través de reuniones periódicas con los estudiantes, Jorge Santiago Arroyo Chuquín y Saúl Israel Méndez Chicaiza, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

María Bertomeu Rodríguez

MASTER EN GESTIÓN Y EVALUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

CC: 1756773162

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Obtención y caracterización de un panel acústico a partir del desecho de la caña de azúcar, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Luis Bravo Moncayo
PhD. EN INGENIERÍA EN ACÚSTICA
CC: 1711710606

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que se protegen los derechos de autor vigentes.”

Jorge Santiago Arroyo Chuquín

CC: 1003545892

Saúl Israel Méndez Chicaiza

CC: 1722706379

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que conocí en todo este trayecto, amigos, compañeros, profesores y maestros que aportaron directa o indirectamente para que todo esto se haga realidad. En especial a mi madre y mi familia por apoyarme cada día.

Jorge Santiago Arroyo Chuquín.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de una manera cordial y muy atenta a todos mis profesores, mis padres, mis hermanos y todas las personas que me han acompañado en el transcurso y en la formación de toda mi vida estudiantil.

Saúl Israel Méndez Chicaiza.

DEDICATORIA

A Javier y Franklin por su apoyo
y consejos.

Y especialmente a Isabel, esto lo
hicimos juntos.

Jorge Santiago Arroyo Chuquín.

DEDICATORIA

La siguiente investigación dedico a toda mi familia, la cual me apoyado de una u otra manera en el crecimiento de mi vida profesional. De igual manera al ángel del cielo, mi madre, que sé que siempre está y estará en mi corazón.

Saúl Israel Méndez Chicaiza.

RESUMEN

El uso principal en Ecuador de la caña de azúcar es la producción azucarera, en la que se extrae el jugo de la caña para después convertirla en azúcar. Después de este proceso las sobras del bagazo de la caña son desechadas. En este trabajo se utiliza el bagazo de la caña de azúcar como un material acústico alternativo y amigable con el medio ambiente, al combinarlo con aglutinantes utilizados en la construcción como yeso, barro, goma y poliuretano.

Para realizar los paneles se mezcla el bagazo con el aglutinante en una proporción de tres a uno respectivamente. De esta manera se obtiene un panel donde el bagazo predomina en su composición total. Además, se propone realizar paneles de tres espesores 6, 12 y 25mm, con cada aglutinante. Se obtiene el coeficiente de absorción de los paneles siguiendo las directrices de la norma UNE-EN ISO 10534-2, "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia", se obtiene el coeficiente de absorción de los paneles.

Por otra parte, se realiza un cálculo estadístico de desviación estándar del coeficiente de absorción obtenido de las muestras. Posteriormente se calcula de manera teórica la pérdida de transmisión de cada panel, usando la teoría de ley de masas, y a su vez se obtiene el coeficiente de transmisión de cada una de las muestras de los paneles. Una vez obtenido el coeficiente de absorción y la pérdida de transmisión se realiza una comparación entre los paneles con el mismo aglutinante y también mismo grosor pero distinto aglutinante.

Finalmente se procede a realizar una valoración económica de los paneles creados artesanalmente para compararlos con materiales acústicos y de construcción existente en el mercado, comparando las ventajas económicas y medioambientales.

ABSTRACT

The main use in Ecuador of the sugarcane is the sugar production, in which the juice of the cane is extracted and later turned into sugar. After this process the leftovers of sugarcane bagasse are discarded. In this work sugarcane bagasse is used as an alternative acoustic material and friendly to the environment, when combined with binders used in construction such as plaster, mud, rubber and polyurethane.

To make the panels, the bagasse is mixed with the binder in a ratio of three to one respectively. In this way a panel is obtained where the bagasse predominates in its total composition. In addition, it is proposed to make panels of three thicknesses 6, 12 and 25mm, with each binder. The absorption coefficient of the panels is obtained following the guidelines of the standard UNE-EN ISO 10534-2, "Determination of the coefficient of acoustic absorption and of the acoustic impedance in impedance tubes", the absorption coefficient of the panels is obtained

On the other hand, a statistical calculation of the standard deviation of the absorption coefficient obtained from the samples is performed. Subsequently, the transmission loss of each panel is theoretically calculated, using the theory of mass law, and in turn the transmission coefficient of each of the panel samples is obtained. Once the absorption coefficient and the transmission loss are obtained, a comparison is made between the panels with the same binder and also the same thickness but different binder.

Finally, an economic evaluation of the handcrafted panels is carried out to compare them with acoustic and construction materials existing in the market, comparing the economic and environmental advantages.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Alcance	4
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Fibras Naturales	6
2.1.1 Caña de azúcar.....	6
2.1.2 Bagazo de la caña de azúcar.....	7
2.2 Conceptos técnicos.....	8
2.2.1 Aislamiento acústico	8
2.2.2 Acondicionamiento acústico.....	13
2.2.3 Coeficiente de absorción.....	13
2.3 Tipos de materiales absorbentes	15
2.3.1 Materiales Absorbentes porosos.....	15
2.3.2 Materiales Fibrosos.....	15
2.4 Características de la variación del coeficiente de absorción sonoro de materiales porosos	16
2.4.1 Efecto del espesor o grosor	16
2.4.2 Efecto de la densidad límite	19
2.4.3 Efecto de la porosidad	20
2.5 Obtención de la absorción acústica	21
2.5.1 Obtención del coeficiente de absorción acústica mediante cámara reverberante	21
2.5.2 Obtención del coeficiente de absorción usando el tubo de impedancia	22

2.5.3 Obtención del coeficiente de absorción en campo libre o cámara anecoica	23
2.6 Normativas	24
2.6.1 Norma UNE-EN ISO 10534-2	24
2.6.2 Norma UNE EN ISO 11654.....	24
2.7 Software ACCU PRO 4.5	25
3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	27
3.1 Producto de fibra vegetal caña de azúcar	27
3.1.1 Recolección de la materia prima	27
3.1.2 Tratamiento de la materia prima	28
3.2 Elaboración de muestras de paneles de bagazo con distintos aglutinantes	29
3.3. Procedimiento de medición de las muestras	35
3.3.1 Proceso de conexión de los componentes del Tubo de Kundt	35
3.3.2 Proceso de ejecución del software Accu Pro 4.5	36
3.3.3 Cálculo de incertidumbre entre las muestras	45
3.3.4 Cálculo de la obtención global del coeficiente de absorción	45
3.3.5 Cálculo de la pérdida de transmisión y el coeficiente de transmisión	47
4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS	49
4.1 Absorción Panel Bagazo - Goma	49
4.1.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Goma	49
4.1.2 Valores globales del coeficiente de absorción del panel Bagazo-Goma	50
4.1.3 Comparación entre los paneles de Bagazo - Goma y sus espesores	51
4.2 Absorción Panel Bagazo - Yeso	51
4.2.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Yeso	51
4.2.2 Valor global del coeficiente de absorción del panel Bagazo-Yeso	53
4.2.3 Comparación entre los paneles de Bagazo -Yeso y sus espesores	54
4.3 Absorción Panel Bagazo - Poliuretano.....	54

4.3.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Poliuretano...	54
4.3.2 Valores globales del coeficiente de absorción del panel Bagazo - Poliuretano	56
4.3.3 Comparación entre los paneles de Bagazo - Poliuretano y sus espesores	57
4.4 Absorción Panel Bagazo - Barro	58
4.4.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Barro.....	58
4.4.2 Valores globales del coeficiente de absorción del panel Bagazo - Barro.....	59
4.4.3 Comparación entre los paneles de Bagazo - Barro y sus espesores	60
4.5 Comparación entre paneles del mismo espesor con distinto aglutinante.	61
4.5.1 Comparación paneles de 6mm	61
4.5.2 Comparación paneles de 12mm	62
4.5.3 Comparación entre los paneles de 25mm.....	63
4.6 Pérdida de transmisión paneles de Bagazo.....	63
4.6.1 Paneles Bagazo – Goma	63
4.6.2 Pérdida de transmisión muestra Bagazo – Yeso	65
4.6.3 Pérdida de transmisión muestra Bagazo - Poliuretano	67
4.6.4 Pérdida de transmisión muestra Bagazo - Barro.....	68
4.7 Comparación de pérdida de transmisión entre paneles del mismo espesor	70
4.7.1 Comparación de la pérdida de transmisión en paneles de 6mm	70
4.7.2 Comparación de la pérdida de transmisión en paneles de 12mm	71
4.7.3 Comparación de la pérdida de transmisión en paneles de 25mm	72
5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS ECONÓMICO	73
5.1 Costo total de materiales usados en la fabricación de los paneles.	73
5.2 Análisis económico del precio de los diferentes aglutinantes en los paneles de bagazo	74

5.3 Comparación del valor de los paneles de bagazo frente al valor comercial de otros materiales acústicos y de construcción.	77
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
6.1 Conclusiones	83
6.2 Recomendaciones	84
REFERENCIAS.....	86
ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Transmisión de sonido en una superficie simple (pared simple).....	9
Figura 2 Comportamiento de una pared simple	10
Figura 3: Celeridad de las ondas de flexión, cuando la onda de frecuencia incidente es mayor o igual a la frecuencia de resonancia.	12
Figura 4: Reflexiones sucesivas en un medio de espesor finito	14
Figura 5: Estructura interna de un material poroso	15
Figura 6: Comportamiento de D (espesor) mucho menor que λ (longitud de onda)	17
Figura 7: Comportamiento de D (espesor) con respecto $\lambda/4$ (longitud de onda, punto máximo de energía).....	18
Figura 8: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de un material absorbente de distintos espesores.	18
Figura 9: Estructura interna de un material poroso	19
Figura 10: Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de un material absorbente de distintas densidades.	20
Figura 11: Variación del coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de un material absorbente y de la porosidad de un material.....	21
Figura 12: Partes del tubo de impedancia (Kundt)	23
Figura 13: Diagrama de medición in situ. Trayectoria del sonido directo de la fuente al micrófono: D-d; trayectoria del sonido reflejado: d1; trayectoria del sonido difractado en el borde de la muestra: d2	24
Figura 14: Interfaz virtual Acupro 4.5, calibración de micrófonos y coeficientes de absorción	25
Figura 15: Interfaz virtual Acupro 4.5, pérdida de transmisión	26
Figura 16: Máquina exprimidora de zumo de caña de azúcar.....	27

Figura 17: Fibras de la caña de azúcar	28
Figura 18: Tamizado del bagazo	30
Figura 19: Llenado de fibra de bagazo en el molde	30
Figura 20: Proceso de moldeado del panel bagazo-barro de 25mm en el marco	32
Figura 21: Proceso de moldeado de las muestras correspondientes a bagazo - barro de 25mm, 6mm y 12mm.....	33
Figura 22: Proceso de moldeado de las muestras correspondientes a bagazo - yeso de 25 mm, 12 mm y 6 mm	34
Figura 23: Pares de Muestras de bagazo poliuretano, bagazo goma, bagazo barro, bagazo yeso.....	34
Figura 24: Diagrama de cadena electroacústica del tubo de impedancia Kundt - medición para coeficientes de absorción sonora de materiales.....	35
Figura 25: Cadena electroacústica del tubo de impedancia kundt ubicado en el laboratorio de mediciones acústicas de la UDLA.....	36
Figura 26: Datos estándares del sistema Accu Pro 4.5 de la pestaña DAQ	37
Figura 27: Datos estándares del sistema Accu Pro 4.5 de la pestaña Setup...	38
Figura 28: Datos estándares del sistema Accu Pro 4.5 de la pestaña Calibration / TF Measurement	39
Figura 29: Primera calibración.....	40
Figura 30: Inserción de la muestra estándar de 25 mm de espuma, en el porta muestras.....	40
Figura 31: Primera calibración, resultados de magnitud, fase y coherencia. ...	41
Figura 32: Segunda calibración.....	42
Figura 33: Segunda calibración, resultados de magnitud, fase y coherencia...	42
Figura 34: Resultados de coeficiente de absorción y de valores de impedancia	43

Figura 35: Resultados de coeficientes de absorción de tercio de octava muestra de 25 mm de espuma.....	44
Figura 36: Muestra a ser medida de bagazo goma de 12 mm	45
Figura 37: Coeficiente global de absorción sonora en paneles de Bagazo - Goma.....	50
Figura 38: Comparación de la absorción global de los paneles: Bagazo - Goma.....	51
Figura 39: Coeficiente global de absorción sonora en paneles de Bagazo - Yeso	53
Figura 40: Comparación de la absorción global de los paneles: Bagazo - Yeso	54
Figura 41: Coeficiente global de absorción sonora en paneles Bagazo - Poliuretano	56
Figura 42: Comparación de la absorción global de los paneles: Bagazo – Poliuretano	57
Figura 43: Coeficiente global de absorción: Bagazo - Barro 6 mm	59
Figura 44: Comparación de la absorción global de los paneles: Bagazo - Barro.....	60
Figura 45: Comparación entre los paneles de 6mm.....	61
Figura 46: Comparación entre los paneles de 12mm.....	62
Figura 47: Comparación paneles de 25mm.....	63
Figura 48: Pérdida de transmisión en paneles de Bagazo - Goma	64
Figura 49: Coeficiente de transmisión: Bagazo - Goma 6 mm	65
Figura 50: Pérdida de transmisión en paneles de Bagazo - Yeso.....	65
Figura 51: Coeficiente de transmisión en paneles Bagazo - Yeso	66
Figura 52: Pérdida de transmisión en paneles Bagazo - Poliuretano.....	67
Figura 53: Coeficiente de transmisión en paneles Bagazo - Poliuretano	68
Figura 54: Pérdida de transmisión en paneles Bagazo - Barro	68

Figura 55: Coeficiente de transmisión en paneles Bagazo - Barro.....	70
Figura 56: Comparación de pérdida de transmisión en paneles de 6mm	70
Figura 57: Comparación de pérdida de transmisión en paneles de 12mm	71
Figura 58: Comparación de pérdida de transmisión en paneles de 25mm	72
Figura 59: Comparación de precios entre paneles de esponja Auralex vs paneles de bagazo con sus distintos aglutinantes	80
Figura 60: Comparación de precios entre lana mineral vs paneles de bagazo con sus distintos aglutinantes.....	81
Figura 61: Comparación de precios entre planchas MDF vs paneles de bagazo con sus distintos aglutinantes	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Promedio de la composición química en los tallos y jugos de la caña de azúcar.....	7
Tabla 2: Tabla con medidas microscópicas de algunos materiales fibrosos. ...	16
Tabla 3: Cantidades de bagazo, aglutinante y agua para cada panel.....	31
Tabla 4: Peso de cada muestra.....	33
Tabla 5: Masa superficial de las muestras	48
Tabla 6: Incertidumbre en muestras Bagazo - Goma.....	49
Tabla 7: Incertidumbre en las muestras de Bagazo – Yeso	52
Tabla 8: Incertidumbre de las muestras Bagazo - Poliuretano	55
Tabla 9: Incertidumbre en las muestras de Bagazo - Barro	58
Tabla 10: Costo de materiales utilizados en la construcción de los paneles....	73
Tabla 11: Costo de los aglutinantes en los paneles de bagazo de 15 x 25 cm.....	74
Tabla 12: Costo de los aglutinantes en los paneles de 1 m x 60 cm.....	75
Tabla 13: Costo de los aglutinantes en paneles de 60 cm x 60 cm.....	76
Tabla 14: Costo de los aglutinantes en paneles de 1,44 m x 2,54 m	76
Tabla 15: Precio final de los paneles de 1m x 60 cm	77
Tabla 16: Precio final de los paneles de 0,6m x 0,6m	78
Tabla 17: Precio final de los paneles de 1,44m x 2,54m	78
Tabla 18: Costo de precios de materiales acústicos comerciales en el mercado	79

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas se ha desarrollado el uso de desechos orgánicos para diferentes aplicaciones a nivel mundial, debido a la idea de mitigar la contaminación ambiental, así como también proponer alternativas de reciclaje, etc (Gutiérrez, 2012). Entre la variedad de fibras vegetales reciclables tenemos yute, cáñamo, paja, junco, bambú, que son utilizadas para aplicaciones procedentes de explotaciones agrícolas como material de construcción en la edificación sostenible (Cobrerros, 2008). Por otra parte, en la industria textil se ha verificado una alta demanda de las fibras vegetales y animales como alternativa muy viable y sustentable (FAO, 2009).

Uno de estos desechos de fibra vegetal es el bagazo de la caña de azúcar, ya que se encuentra en el primer lugar de producción a nivel mundial (FAO, 2017). El bagazo es el desecho orgánico de la caña de azúcar, al cual se le han descubierto una diversidad de aplicaciones, por ejemplo, en la generación de energía térmica. En Cuba anteriormente establecía un aprovechamiento positivo entre los desechos de la caña de azúcar y la generación de energía a través de ellos (FAO, 1991). Además, es utilizado como abono orgánico en el campo de la agricultura, con el aprovechamiento de los desechos de la caña de azúcar, estimando un alto índice de eficiencia y producción como materia prima (Cifuentes, León y Porres, 2011). Por otra parte, se lo puede utilizar como material para la construcción, donde se innova mezclar con materiales de construcción al bagazo permitiendo optimizar la eficacia a nuevos materiales constructivos (Othmani et al, 2016).

En el campo de la construcción, el bagazo se usa comúnmente en forma de paneles. Un panel es un tipo de aglomerado que se aglutina con varios compuestos químicos, en los que las partículas se adhieren. Entre algunos de los compuestos se tiene: úrea formaldehído (UF) y melamina úrea-formaldehído (MUF) (Dosst-hosseini, Reza y Elyasi, 2013).

Las propiedades físicas y mecánicas del bagazo cumplen con los estándares Europeos para materiales de construcción como: el módulo de elasticidad (MOE), el módulo de rotura (MOR); y la resistencia de unión interna (IBS), así como también las propiedades físicas en términos de absorción de agua (WA) e hinchamiento de espesor (TS). Investigando el cumplimiento de los estándares europeos Mehdi et al., (2016), analizaron la respuesta de sus propiedades físicas y mecánicas, frente al pretratamiento del ozono, usado como un método de conservación para las partículas de bagazo, y concluyeron que puede influir negativamente en las propiedades mecánicas de los paneles. Sin embargo, a pesar de que tuvieron valores menores los paneles no tratados con el método, cumplieron con las normas para MOR, MOE e IBS e incluso para fabricación de muebles.

En Ecuador existe una producción considerable de caña de azúcar. Jiménez y Ochoa (2014), proponen un uso alternativo del bagazo, como material de la construcción. En su propuesta se desarrollaron paneles de bagazo mezclados con: yeso, cemento y barro. Por lo cual mediante un método que consiste primeramente en la obtención del bagazo, este debe seguir un proceso de secado, el cual puede ser de forma natural o por medio de vapor. Una vez secado debe triturarse hasta obtener pedazos de bagazo de 2mm a 5mm de espesor. Con esto se procede a mezclar las partículas obtenidas con los distintos aglutinantes que en este caso serían: poliuretano, cemento, yeso y barro. Los porcentajes de bagazo y aglutinante en la mezcla varían, en algunos casos son iguales y en otros el bagazo predomina. Además del aglutinante también se usa un porcentaje de agua. También se toman en cuenta sugerencias de mezclado, dosificaciones de cada material, procesos de moldeado, fraguado, desmoldado y período de tiempo para cada proceso.

De estos paneles se han evaluado sus características físicas, mecánicas y químicas, se obtuvieron resultados que cumplen con la Norma INEN para materiales de construcción en el Ecuador, como por ejemplo: tiempo mínimo de

resistencia al fuego de 10 minutos y máximo 30 minutos, el 20% máximo de hinchamiento del panel en contacto con el agua establecido por la norma NTE INEN 899, la cual fue superada por un valor máximo de 12% medido en los paneles con bagazo (Medina et al., 2012).

Por otra parte, dentro de los materiales para la construcción se encuentran los materiales de carácter acústico, los cuales pueden ser absorbentes y aislantes. Se ha comparado al bagazo con materiales acústicos como el poliuretano de celda abierta, comercialmente conocida como la espuma acústica. Varias pruebas de laboratorio han comprobado que el bagazo, contiene propiedades acústicas, las cuales son muy parecidas a las propiedades de la espuma acústica comercial (Putra et al., 2013).

Un ensayo realizado por el método de Loschit, el cual consta de la fabricación de una cabina de paneles con base en bagazo de caña de azúcar, donde dentro de ella se sitúa un altavoz de alta fidelidad para generar ruido rosa a través de él. El objetivo es medir el nivel de presión sonora fuera de la cabina, y compararlo con el nivel de presión sonora del altavoz sin estar encerrado en la cabina. La medición del nivel de presión sonora se realizó con un micrófono de medición a 1 metro de distancia desde el suelo y desde la cabina de panel de bagazo. Los resultados son guardados en un software medidor de decibeles en el cual indica el nivel de presión sonora y comparación de resultados. El análisis indicó que la absorción sonora efectiva del bagazo empieza desde los 500 Hz hasta los 2000 Hz, y supera a la espuma acústica desde los 630 Hz hasta los 1000 Hz este último considerado el rango de mayor absorción sonora (Martins et al., 2015).

En las investigaciones citadas anteriormente, se presenta la construcción de los paneles, pero no existe ningún registro con respecto al coeficiente de absorción acústico del panel de bagazo mezclado con los diferentes materiales. Y tampoco presenta una comparación de la absorción acústica que puede tener un panel cien por ciento bagazo, frente a los otros paneles mezclados.

Por lo tanto, cabe destacar que resultaría eficaz realizar este tipo de comparaciones para tener una idea más clara del comportamiento acústico que presenta el panel de bagazo con sus diversos materiales mezclados. Además, clasificar los paneles como materiales absorbentes y materiales constructivos amigables con el medio ambiente.

1.2 Alcance

En este trabajo se obtendrán paneles a partir de bagazo, mezclados con barro, yeso, poliuretano y goma, los cuales son aptos para su uso en la construcción. Los paneles que se obtengan tendrán distintos espesores y porcentajes de cada aglutinante. Se obtendrá el coeficiente de absorción acústica mediante la norma UNE-EN ISO 10534-2 “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia en los tubos de impedancia” - Parte 2: Método de la función de transferencia.

Se realizará el análisis de los coeficientes de absorción de cada panel en función a su grosor y aglutinante. Un resultado relevante será el coeficiente frecuencial, coeficiente de absorción global y la pérdida de transmisión acústica de cada panel, esta última se la realizará a través de un cálculo teórico. Además, se realizará una valoración económica de los paneles de bagazo para compararlos con materiales acústicos y de construcción.

1.3 Justificación

En este estudio se obtendrá una caracterización de las propiedades acústicas de paneles de bagazo mezclado con materiales tales como: poliuretano, goma, yeso y barro. Las características acústicas obtenidas ayudaran a establecer mediante la comparación entre los paneles, cual es el aglutinante con el que se aumenta el coeficiente de absorción y la pérdida de transmisión.

Adicionalmente, con la obtención de la pérdida de transmisión, se pretende presentar al panel con base en el desecho de la caña de azúcar, como un material acústico sustentable. De tal manera, que sea una alternativa amigable con el medio ambiente que sustituya a materiales acústicos que se encuentre en el mercado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Caracterizar las propiedades de absorción sonora y pérdida de transmisión de paneles acústicos desarrollados a partir de bagazo de caña de azúcar, mediante el método de tubo de impedancia.

1.4.2 Objetivos específicos

- ❖ Aplicar una metodología de medición del coeficiente de absorción sonora a muestras de distintos espesores de fibras de bagazo en un tubo de impedancia.
- ❖ Comparar los distintos espesores de paneles con base en el desecho de caña de azúcar y de espuma acústica, en función al porcentaje de sus componentes en la mezcla como al grosor de cada panel.
- ❖ Obtener la pérdida de transmisión e índice de reducción sonora de las muestras de cada panel con sus correspondientes aglutinantes mediante un cálculo teórico.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Fibras Naturales

Se definen como sustancias de origen vegetal o animal, las cuales se hilan para obtener materia prima, por ejemplo, algodón, cáñamo, lino (entre las fibras vegetales) y lana como fibras animales. Los materiales más comunes son hilos, cordelería o algún tipo de hebra, el destino de estos materiales por lo general es textil y a su vez estos son usados de manera industrial como complementos en implantes médicos, geotextiles y agrotexiles. Además, algunas fibras crean productos usados para decorar y aislar ambientes domésticos (Bujosa textil, 2016).

En Ecuador las fibras naturales tales como, bagazo de caña de azúcar, tusa de maíz, cascarilla de arroz y café, fibra proveniente de las hojas y tallo de la planta de banano, son potenciales residuos útiles para crear materiales de construcción sustentables. Su uso está dirigido a crear materiales los cuales combinados con barro o yeso sirvan como aislantes de calor en región costa al convertirse en paneles y usarlos como cielos rasos (Velasco et al., 2015).

2.1.1 Caña de azúcar

Su nombre en latín es *Saccharum officinarum*, es una planta familia de las poáceas. Es considerado uno de los principales productos en América Latina, en Ecuador su producción no es de la mayor importancia, pero se la produce en menor grado (Barcía, 2012). En el 2012 Ecuador tuvo una producción de 7,38 millones de toneladas de caña de azúcar, ubicados en un área de 106.930 m², suma total entre la superficie de los ingenios azucareros en el país (Medina et al., 2012).

La caña de azúcar está conformada por jugo y fibra. El jugo se forma por sólidos solubles llamados brix, mientras que la fibra es la parte insoluble de la caña de azúcar que está formada por celulosa. Además de componentes como los brix en su forma porcentual, existen componentes orgánicos e inorgánicos tales como: sales, minerales, proteína y otros no azúcares. El azúcar se extrae de

forma industrial, exprimiendo la caña y cristalizando los sólidos solubles. La tabla 1 muestra la composición porcentual de la caña de azúcar (Cenicaña, 2017).

Tabla 1.

Promedio de la composición química en los tallos y jugos de la caña de azúcar

Constituyente químico	Porcentaje
En los tallos:	73 – 76
agua	24 – 27
sólidos	10 – 16
- sólidos solubles (brix)	11 – 16
- fibra seca (seca)	
En el jugo	
Azúcares	
- sacarosa	75 – 92
- glucosa	70 – 88
- fructosa	2 – 4
Sales	2 – 4
- inorgánicas	3.0 – 3.4
- orgánicas	1.5 – 4.5
Ácidos orgánicos	1 – 3
Aminoácidos	1.5 – 5.5
Otros no azúcares	1.5 – 2.5
- proteína	0.5 – 0.6
- almidones	0.001 – 0.050
- gomas	0.3 – 0.6
- ceras, grasas, etc.	0.15 – 0.50
- compuestos fenólicos	0.10 – 0.80

Tomado de (Cenicaña, 2017)

2.1.2 Bagazo de la caña de azúcar

El origen de la palabra bagazo, proviene del francés *bagasse*, se lo usó para denominar al residuo de la aceituna después de haber sido procesada para

extraer el aceite. Ahora la palabra bagazo, se la usa para nombrar al tallo de la caña de azúcar sin jugo. En Cuba se lo usa como un combustible de producción de vapor en fábricas azucareras. El bagazo se constituye de la siguiente forma: humedad (celulosa) en un 50%, sólidos solubles en un 5%, fibra cruda: 45% (Ecured, 2017).

2.2 Conceptos técnicos

2.2.1 Aislamiento acústico

El aislamiento acústico se puede definir como la acción o conjunto de acciones a favor de la atenuación del ruido de un recinto a otro, ya sea ruido aéreo, de impactos o vibración. El ruido puede transmitirse por varios elementos entre 2 salas, por ejemplo: ventanas, puertas, piso, estructuras vibrantes, etc.

La transmisión sonora que ocurre entre 2 salas depende del material aislante entre las mismas, y está dado por su coeficiente de transmisión acústica con el cual es posible calcular la pérdida de transmisión en el material (Sancho et al. 2008, pp. 121).

2.2.1.1 Pérdida de Transmisión

Relación logarítmica entre la energía sonora transmitida y la energía que incide en la superficie o canal de transmisión.

$$PT = 10 \log 1/\alpha_t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- α_t coeficiente de transmisión acústica
- $\alpha_t = \text{energía transmitida/energía incidente}$

2.2.1.2 Ley de masa y frecuencia de coincidencia en pared simple

Se define una pared simple como aquella que forma un único sistema al momento de estar sometida a vibraciones.

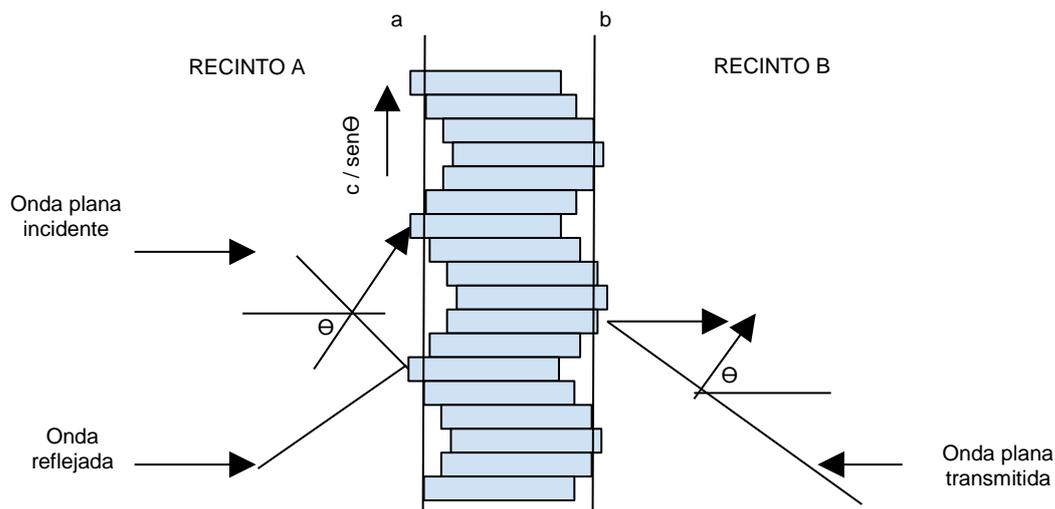


Figura 1. Transmisión de sonido en una superficie simple (pared simple)

Adaptado de (Sancho et al., 2008, pp. 283)

La ley de masas en la figura 1, muestra que el coeficiente de transmisión acústica depende del ángulo de incidencia θ y la masa superficial de la pared simple relacionándola mediante la siguiente ecuación.

$$\alpha_t = \frac{1}{1 + \left(\frac{m\pi f \cos\theta}{\rho_0 c}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 2})$$

reemplazando en ecuación 1

$$PT_\theta = 10 \log\left(1 + \left(\frac{m\pi f \cos\theta}{\rho_0 c}\right)^2\right) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Por lo que para un sistema rígido y con ángulo de incidencia de 0 grados se tiene que:

$$PT_0 = 10 \log\left(\frac{m\pi f}{\rho_0 c}\right)^2 = 20 \log(mf) - 42 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

- “m” es masa superficial de la pared simple
- “f” frecuencia de incidencia

En caso de un campo difuso, la ecuación sería:

$$PT = 10 \log \left(\frac{m\pi f}{\rho_0 c} \right)^2 - 47$$

(Ecuación 5)

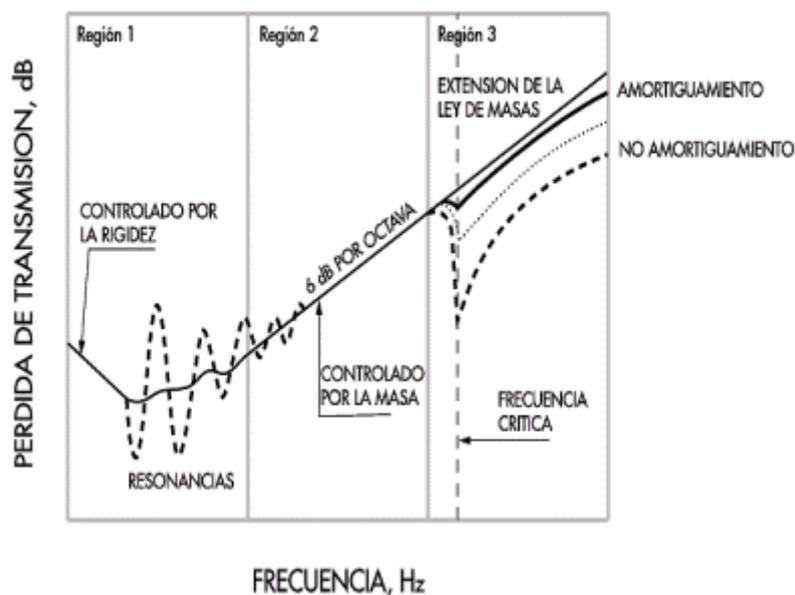


Figura 2. Comportamiento de una pared simple

Tomado de (Elruido, 2017)

La figura 2 explica como es el comportamiento de la pared simple, este comportamiento se divide en 3 regiones

- ❖ Región 1: esta región está controlada por la rigidez y a esta el sistema se comporta como una membrana produciendo resonancias a bajas frecuencias.

- ❖ Región 2: aquí se muestra cómo la pérdida transmisión es controlada por la masa, produciendo un aumento de 6 decibeles por el doble de la frecuencia, y al duplicarse la masa superficial.
- ❖ Región 3: está afectada por la frecuencia crítica, en esta la mayor parte del aislamiento ya ha sido controlado por las regiones anteriores, pero debido a la frecuencia de resonancia propia de cada material, la pérdida de transmisión disminuye y por ende el aislamiento (Elruido, 2017).

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi e} \sqrt{\frac{12\rho}{E}(1 - \mu^2)}$$

(Ecuación 6)

Donde:

- c: velocidad del sonido
- e: espesor
- p: densidad
- E: módulo de elasticidad (Young)
- u: módulo de Poisson

Para analizar el comportamiento de una pared simple, es necesario tomar en cuenta la elasticidad del sistema, en donde la figura 2 indica el comportamiento del sistema al momento de estar deformado por las ondas libres propagadas en toda la masa. Estas ondas, llamadas ondas de flexión se componen mediante una velocidad dada por:

$$c_f = c \sqrt{\frac{f}{f_c}}$$

(Ecuación 7)

Donde:

- c: velocidad del sonido
- f_c: frecuencia de resonancia
- f: frecuencia incidente

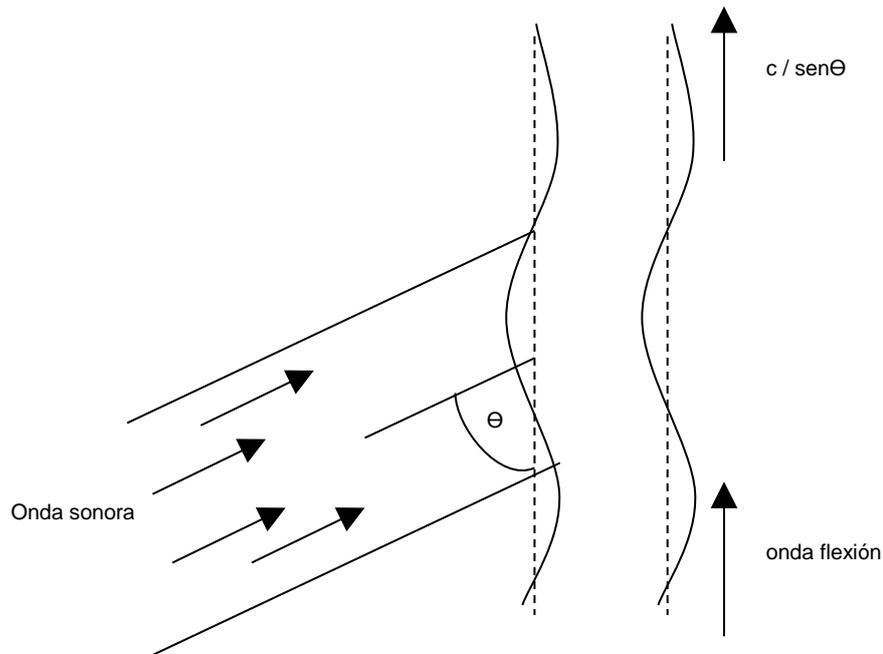


Figura 3. Celeridad de las ondas de flexión, cuando la onda de frecuencia incidente es mayor o igual a la frecuencia de resonancia.

Adaptado de (Sancho et al., 2008, pp. 285)

Esto torna al sistema como elástico cuando (f) es igual o mayor que (f_c), mientras que si la frecuencia incidente (f) es menor que la frecuencia crítica el sistema se comportara como no elástico (Sancho et al., 2008, pp. 283 - 287).

Por lo tanto, la pérdida de transmisión es:

$$PT = 20 \log \left(\frac{m\pi f}{\rho_0 c} \right) + 10 \log \frac{f}{f_c} - 10 \log \frac{1}{n} - 3 \quad (\text{Ecuación 8})$$

donde:

- n : es el índice de pérdidas de la pared aislante (por irradiación acústica, conducción a paredes adyacentes, pérdidas internas de la pared, etc.) suele tomar el valor entre 10^{-2} o 10^{-3}

2.2.2 Acondicionamiento acústico

Se define como cualquier tipo de intervención dentro de una sala con la que se pretenda modificar la cantidad de interacciones sonoras, que sean percibidas por los escuchas. El objetivo del acondicionamiento acústico es otorgar las características necesarias a las salas ya sean: teatros, salas de control, salas de grabación, auditorios, etc, para que el mensaje que se transmite sea perfectamente percibido por el oyente. El acondicionamiento óptimo es dependiente del tipo de mensaje que se transmite dentro de la sala pudiendo ser: mensaje oral o musical, en este último depende del tipo de música.

En toda sala en la que se comunica un mensaje y se recepta el mismo, existe una cadena de comunicación: emisor, canal de transmisión y receptor, este último define si la sala necesita o no de un acondicionamiento, basándose en la claridad del mensaje que recepta (Sancho et al., 2008, pp. 221-122).

2.2.3 Coeficiente de absorción

El coeficiente de absorción acústico es la relación entre la energía absorbida respecto a la energía incidente en un material.

$$\alpha = \frac{\text{energía absorbida}}{\text{energía incidente}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Es propio de cada material, varía por la forma del montaje en la sala y por el ángulo en el que el sonido incide sobre él.

Debido a que las ondas dentro de un material generan reflexiones sucesivas las cuales se explican en la figura 4, en el cual el sonido atraviesa 3 partes: en la 1 incide en el material (P1), en la 2 se encuentra dentro del material (P2) donde se refleja, y a consecuencia producen reflexiones sucesivas P2' en un espacio e (espesor del material), sucesivamente.

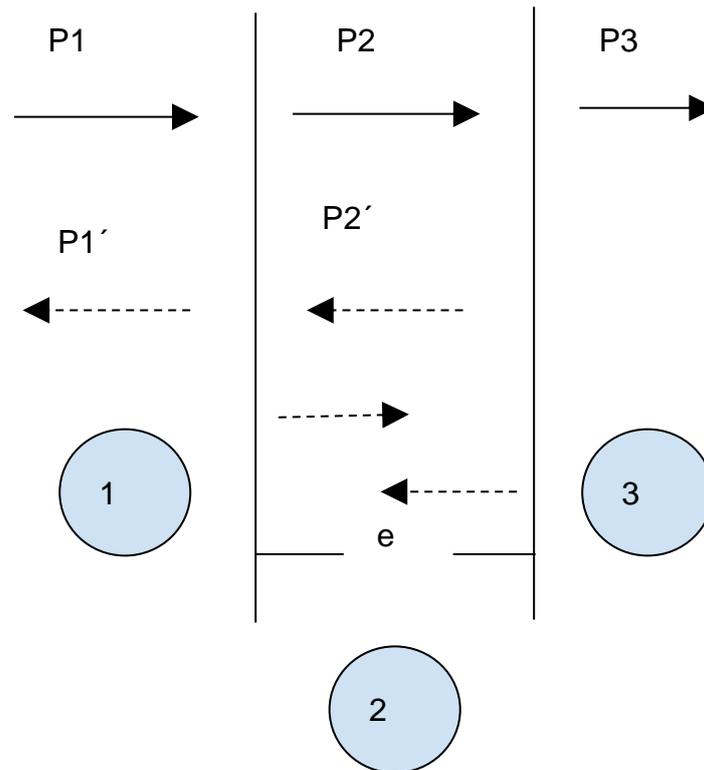


Figura 4. Reflexiones sucesivas en un medio de espesor finito

Adaptado de (Sancho et al, 2008, pp. 179)

El coeficiente de absorción permite definir la absorción superficial mediante el producto del coeficiente y la superficie, medido en metros cuadrados de ventana abierta (Sabines) (Sancho et al., 2008, pp. 178-181).

La absorción total de una sala esta expresado por:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (\text{Ecuación 10})$$

El coeficiente de absorción medio

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S_t} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

- S_t es igual a la superficie total de la sala

2.3 Tipos de materiales absorbentes

2.3.1 Materiales Absorbentes porosos

Este tipo de materiales se caracterizan por absorber una gran parte de la energía sonora que incide en ellos. Tienen varios canales y cavidades dentro de sí, en las cuales las ondas sonoras son atrapadas y por ende disipadas en el interior del material, además dentro de los materiales absorbentes existen 2 tipos de poros, abiertos y cerrados, los poros abiertos son lo que más participan en el proceso de absorción ya que por su nombre están abiertos a la superficie mientras que los cerrados se encuentran dentro (Arenas et al., 2011).

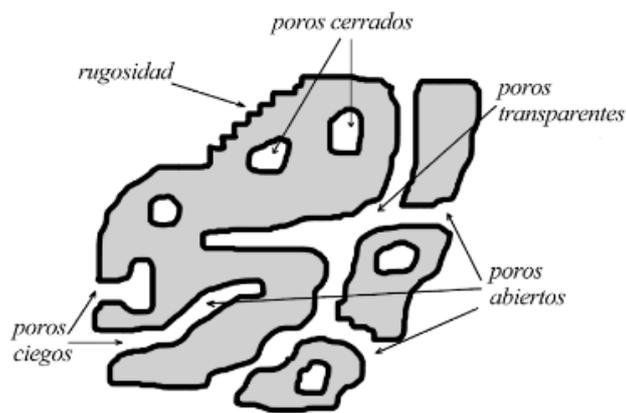


Figura 5. Estructura interna de un material poroso

Tomado de (Arenas et al., 2011)

2.3.2 Materiales Fibrosos

Los materiales porosos también pueden ser fibrosos, se caracterizan por tener filamentos en los que se atrapa el sonido, este tipo de materiales puede ser de origen vegetal o sintético, entre los vegetales algodón, kenaf, cáñamo, lino, madera, etc., entre las sintéticas se encuentran fibra de vidrio, lana mineral, grafito, cerámica o polímeros. El diámetro de las fibras es propio de cada una, pero similares en magnitud ya que es microscópico (Arenas et al., 2011).

Tabla 2.

Tabla con medidas microscópicas de algunos materiales fibrosos.

Origen	Material fibroso	Diámetro de la fibra (μm)
Sintético	Cerámico	2 – 6
	Lana mineral (Lana de roca y escoria)	3 – 10
	Fibra de vidrio (filamento continuo)	6 – 13
	Lana de vidrio	3 – 7
	Grafito	5 – 10
	Basalto	7 – 13
	Bambú	14
	Polipropileno	5 – 25
	Poliéster	3 – 15
	Kevlar	12
	Natural	Algodón
Kenaf		21
Cáñamo		22
Madera		16 – 38
Lino		19
Corteza de caña		20
Yute		20

Tomado de (Arenas et al., 2011)

2.4 Características de la variación del coeficiente de absorción sonoro de materiales porosos

2.4.1 Efecto del espesor o grosor

El coeficiente de absorción sonoro, para el caso de materiales porosos tiende a incrementar notoriamente, cuando el espesor del material aumenta progresivamente. Una manera más comprensible de entender este fenómeno, se lo puede explicar a través de dos casos.

El primer caso cuando el espesor "D" es mucho menor que la longitud de onda sonora " λ " como se observa en la figura 6. Donde a través de una pared rígida se ve cómo las partículas de aire localizadas en las inmediaciones de dicha pared tienen una absorción muy baja en todos los puntos del material absorbente. Esto permite que la fricción generada por las partículas de aire a través de los canales presentes en las paredes del material absorbente transforme una mínima cantidad de energía sonora en energía calorífica (Castillo y Costa, 2012).

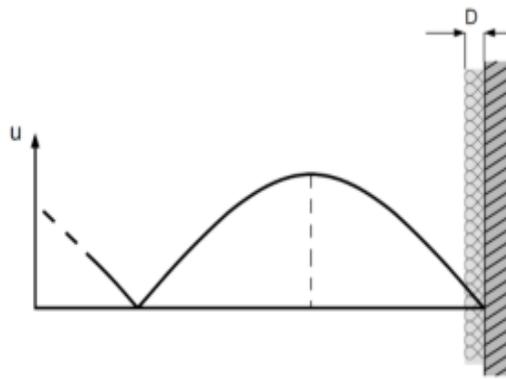


Figura 6. Comportamiento de D (espesor) mucho menor que λ (longitud de onda)
Tomado de (Castillo y Costa, 2012)

En el segundo caso se encuentra lo contrario, donde el espesor "D" es comparable con un cuarto de la longitud de onda sonora " $\lambda/4$ " en la que se presenta un máximo de energía de una onda sonora como se visualiza en la figura 7. Este caso implica que la velocidad dentro del material absorbente sea máxima, permitiendo conseguir una máxima fricción de las partículas de aire con las paredes del material, lo cual establece una máxima transformación de energía.

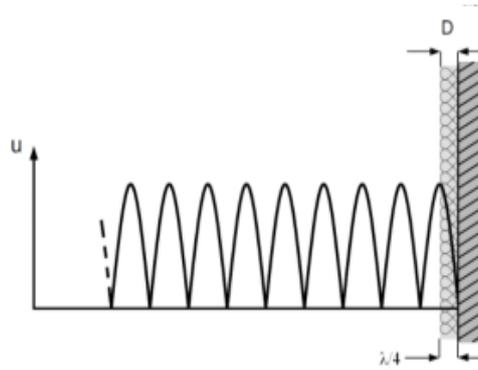


Figura 7. Comportamiento de D (espesor) con respecto $\lambda/4$ (longitud de onda, punto máximo de energía)

Tomado de (Castillo y Costa, 2012)

En la figura 8 se identifica el efecto que conlleva el aumento del espesor de un material sonoro absorbente. Cabe destacar que el mayor énfasis en cuanto a la relación del espesor de un material se destaca en las frecuencias bajas, debido a la longitud de onda que presentan y lo que conlleva el efecto del espesor. Por lo tanto, a medida que el material presenta mayor espesor tendrá una mayor absorción en frecuencias bajas (Castillo y Costa, 2012).

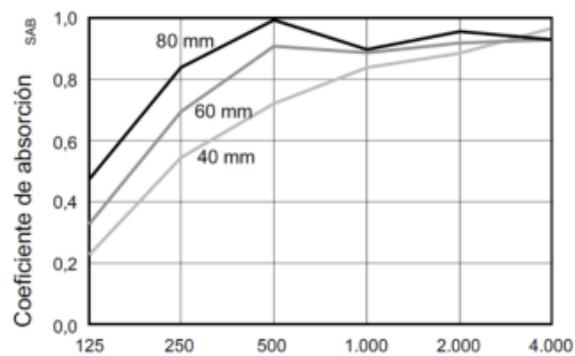


Figura 8. Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de un material absorbente de distintos espesores.

Tomado de (Castillo y Costa, 2012)

2.4.2 Efecto de la densidad límite

La densidad que posee un material es la masa por unidad de volumen que ocupa. Sin embargo, se destaca que los materiales porosos no rellenan todo el espacio que conforman, por lo que dejan huecos o vacíos que se llaman poros, como se observa en la figura 9. Cabe recalcar además que estos poros se encuentran llenos de gas o de líquido, por lo que dificultan la determinación del volumen de la masa real exacta en el momento de medir su densidad.

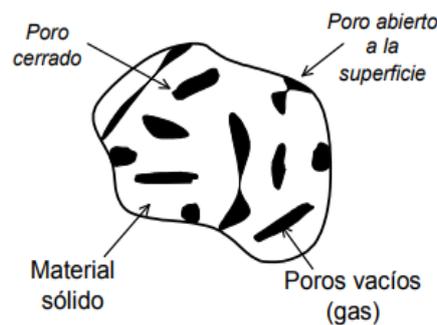


Figura 9. Estructura interna de un material poroso

Tomado de (García, 2010)

Para la comprensión de este efecto, se puede dictaminar que el aumentar la densidad de un material poroso genera mayor fricción, lo que conlleva a una mayor absorción de la onda sonora incidente. Cabe destacar que existe un límite para el caso del aumento de la densidad de un material poroso, por lo que si se sobrepasa este límite la onda sonora no podrá ingresar al material poroso, conllevando a una mayor reflexión de la energía (Castillo y Costa, 2012). En la figura 10 se muestra la relación directamente proporcional entre la densidad y el coeficiente de absorción.

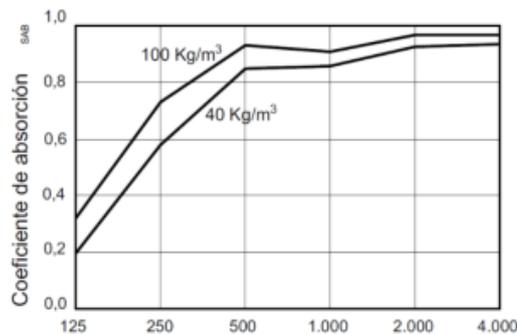


Figura 10. Coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de un material absorbente de distintas densidades.

Tomado de (Castillo y Costa, 2012)

2.4.3 Efecto de la porosidad

La porosidad es la capacidad que presenta un material para absorber ondas sonoras, gases o líquidos a través de sus huecos o espacios que presentan sus partículas. Además, es importante conocer que a medida que un material presente gran cantidad de poros será considerado poroso, como se muestra en la figura 9. Por otro lado, la mayoría de los poros presentes en la superficie de un material, no tienen misma forma ni son similares en diversos materiales, sin embargo, presentan características semejantes de absorción sonora (Quiminet, 2017).

Por otra parte, para la comprensión de este efecto, se menciona que en el instante de incrementar la porosidad de un material se genera un aumento de la absorción sonora, esto se debe a que el frente de onda incidente penetra en mayor medida dentro del material. Esto conlleva a que una mayor penetración de la onda, y por ende la fricción de aire en las paredes del material aumenten, indicando una variación del coeficiente de absorción sonora en función a un material y a la porosidad que presente, como se observa en la figura 11 (Castillo y Costa, 2012).

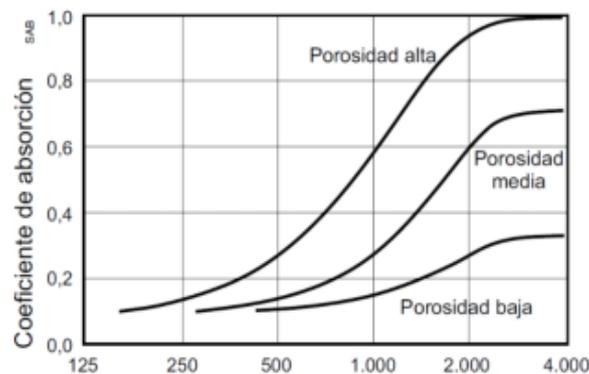


Figura 11. Variación del coeficiente de absorción sonora en función de la frecuencia de un material absorbente y de la porosidad de un material.

Tomado de (Castillo y Costa, 2012)

2.5 Obtención de la absorción acústica

2.5.1 Obtención del coeficiente de absorción acústica mediante cámara reverberante

Este método se lo realiza siguiendo las consideraciones expuestas en la norma UNE-EN ISO 354:2004, "Procedimiento para determinar el coeficiente de absorción sonora en campo difuso", la cual indica 2 métodos para medir la absorción acústica en campo reverberante, uno usando una fuente con señal de ruido interrumpida y otra con señal de ruido impulsiva.

La señal de ruido interrumpida usa un ruido de banda ancha, con el cual se mide la curva de decaimiento del ruido, la fuente a usar es una fuente omnidireccional. El de señal de ruido impulsiva usa como fuente un disparo o la explosión de un globo en distintas partes de la sala de tal manera que todas las frecuencias sean excitadas.

Los 2 tienen el mismo principio, el cual propone medir el tiempo de reverberación, primero con el material con el cual se desea medir y después sin el material, cabe destacar que el sonido incide de forma aleatoria, de esta forma mediante la ecuación de tiempo de reverberación de Sabine se obtendrá el área de absorción y por ende el coeficiente de absorción del material. (Orti, 2014)

$$T_R = \frac{0,161V}{A} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

- T_R es el tiempo de reverberación
- V es el volumen de la sala
- A es la absorción total de la sala

Ciertas condiciones para la realización de este ensayo pueden mirarse como limitantes, ya que es necesario que la muestra tenga una superficie de $10m^2$ a $12m^2$ para un volumen de sala reverberante de $200m^3$, en caso de ser de mayor volumen la muestra debe incrementarse por el factor $V/200m^3$ (Arenas et al., 2011).

2.5.2 Obtención del coeficiente de absorción usando el tubo de impedancia

En este método, está normado por la UNE-EN ISO 10534-2, se obtiene el coeficiente de absorción mediante un tubo el cual tiene en un extremo un parlante por el cual se reproducen señales de ruido, en el otro extremo se encuentra la muestra a ser medida, de tal manera que el ruido emitido incide sobre la superficie de esta muestra. La presión de las ondas que se producen dentro del tubo es captada por 2 micrófonos, el primero capta la señal emitida y la segunda la reflejada.

Dentro del tubo se originan máximos y mínimos de presión, correspondientes a todas las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte:

$$f_{co} = 1,84c/\pi d \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

- c es la velocidad del sonido
- d es el diámetro del tubo en metros

La limitación en este método se da en la obtención de los resultados para bajas frecuencias debido al diámetro del tubo. Los datos en bajas frecuencias pueden presentar errores.

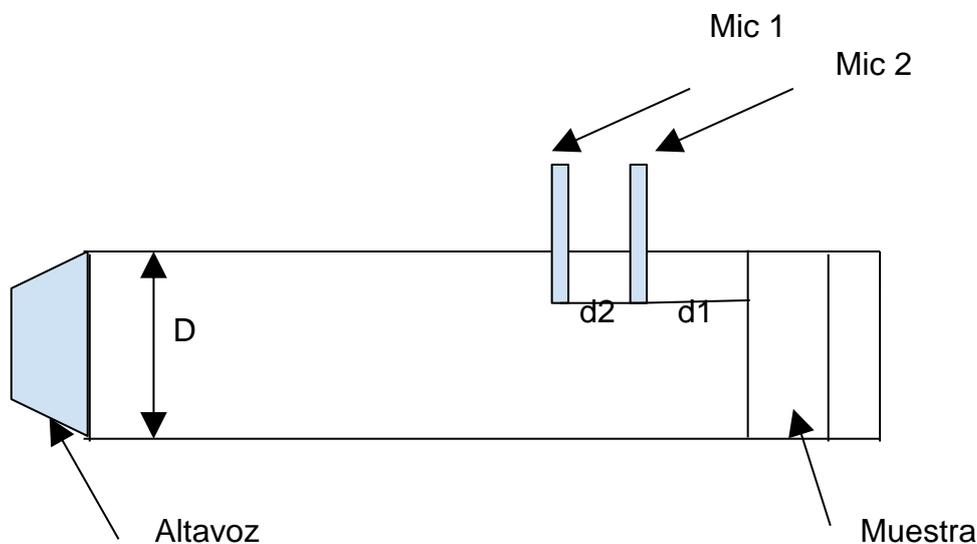


Figura 12. Partes del tubo de impedancia (Kundt)

Adaptado de (Arenas et al., 2011)

2.5.3 Obtención del coeficiente de absorción en campo libre o cámara anecoica

La norma que rige este método es la ISO-Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces in Situ - Part 1: Extended Surface Method. En ella se indica el proceso para obtener el coeficiente de absorción en superficies planas usadas para acondicionamiento de salas. La metodología se basa en la recepción de una señal de impulso frente a la superficie a estudiar, siendo esta un altavoz direccionado al material, de tal manera que el sonido incida lo más directamente posible en él material. Además, con la ayuda de un micrófono se captura la respuesta de impulso con el material absorbente y sin material absorbente. Por lo que posteriormente se procede a obtener las respuestas de impulso en el tiempo, de forma frecuencial mediante un cálculo de convolución (Orduña, 2014).

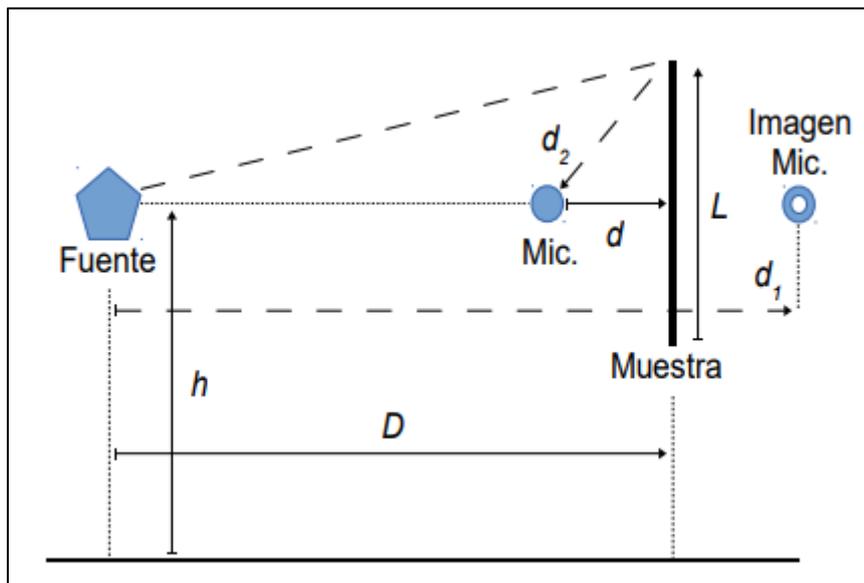


Figura 13. Diagrama de medición in situ. Trayectoria del sonido directo de la fuente al micrófono: $D-d$; trayectoria del sonido reflejado: d_1 ; trayectoria del sonido difractado en el borde de la muestra: d_2

Tomado de (Orduña ,2014)

2.6 Normativas

2.6.1 Norma UNE-EN ISO 10534-2

Esta norma describe el método de ensayo mediante el uso de un tubo de impedancia o tubo de Kundt, en este tubo de impedancia se registra simultáneamente las señales de 2 micrófonos fijos instalados en el tubo. Las cuales mediante un software que realiza un FFT para determinar la función de transferencia acústica compleja de las señales, se obtienen valores de coeficiente de absorción sonora e impedancia acústica con incidencia normal.

2.6.2 Norma UNE EN ISO 11654

La presente norma corresponde a “Absorbentes acústicos para su utilización en edificios, evaluación de la absorción acústica”. Con respecto al capítulo 4 que define los cálculos, especifica los pasos a seguir para transformar los

coeficientes obtenidos por cualquier método para la obtención de coeficientes de absorción acústica en materiales, a un valor global. Además, indica la manera de caracterizar un material en función de su absorción, la cual según la norma está dada en la frecuencia de 500hz, después de haber transformado los coeficientes de tercios de octava a bandas de una octava.

2.7 Software ACCU PRO 4.5

Es una plataforma informática desarrollada por el grupo Spectronics Accu pro, la cual permite comprender y a la vez aplicar el uso de las normativas internacionales tales como: ISO 10534-2 y ASTM E 1050-98. Su interfaz virtual es de fácil uso para el usuario, la cual consta con un bloque dedicado a la corrección de fase y amplitud de los micrófonos, también la corrección de la absorción latente que presenta el tubo. Además, otro bloque exclusivo que permite la obtención de la medida de absorción de materiales, coeficientes de reflexión compleja y admitancia compleja como se observa en la figura 14. Por otra parte, también posee otro bloque dedicado a la medición de la pérdida de transmisión sonora de los materiales a ser analizados como se observa en la figura 15.

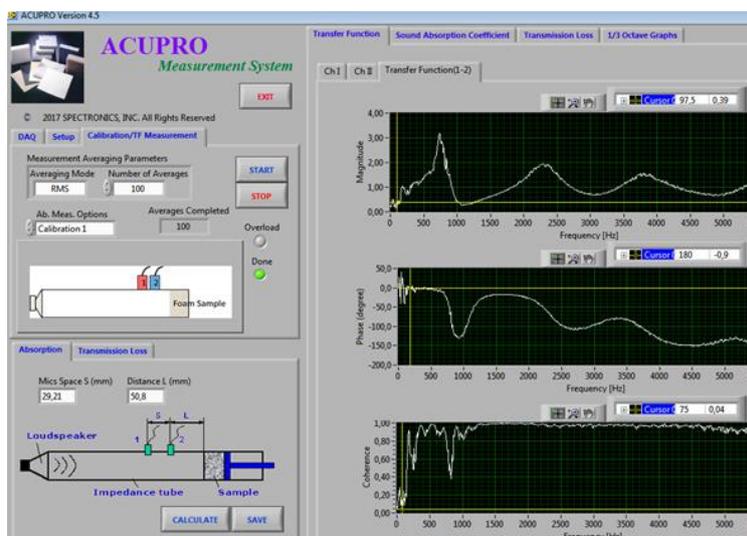


Figura 14. Interfaz virtual Acupro 4.5, calibración de micrófonos y coeficientes de absorción

Tomado de (Software Acupro 4.5, 2008)

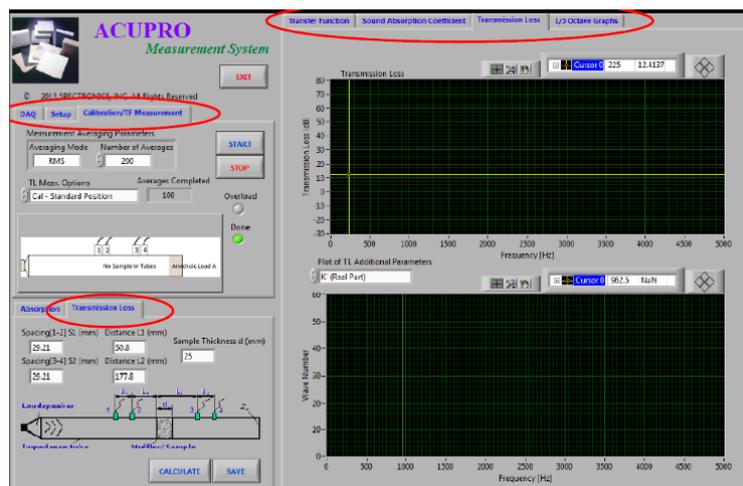


Figura 15. Interfaz virtual Acupro 4.5, pérdida de transmisión
Tomado de (Software Acupro 4.5, 2008)

3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Producto de fibra vegetal caña de azúcar

3.1.1 Recolección de la materia prima

Primeramente, cabe destacar que la distribución del sembrío de la caña de azúcar, se encuentra distribuida porcentualmente en las siguientes provincias: el 72.4% en el Guayas, 19.60% en el Cañar, el 4.20% en el Carchi e Imbabura, el 2.4% en Los Ríos, y el 1.40% en Loja (INEC, 2015).

Debido a esto para el proceso de la recolección de la materia prima, se recurrió a lugares donde los desechos de la caña de azúcar son abundantes, en nuestro caso y por cercanía se optó por la provincia de Imbabura. En esta provincia existen lugares donde se extrae el zumo de la caña de azúcar a través de máquinas exprimidoras y eventualmente sus desechos son descartados a la basura. El desecho de la caña de azúcar fue recolectado en el mercado municipal de la ciudad de Ibarra de manera gratuita, debido a que las personas que laboran con la caña de azúcar optaron en regalar sus desechos.



Figura 16. Máquina exprimidora de zumo de caña de azúcar.



Figura 17. Fibras de la caña de azúcar

3.1.2 Tratamiento de la materia prima

Para el proceso del tratamiento de la materia prima, se optó por dejar secar al bagazo a la intemperie durante un tiempo de dos días, permitiendo que las fibras de bagazo no tengan ningún zumo, sobrante sobre la su superficie. Una vez que las fibras se hayan secado en su totalidad, se procede a retirar las fibras del bagazo de sus cortezas, logrando separar la materia prima entre la fibra que se requiere y las cortezas, desechos inutilizables.

A continuación, se procede a tomar las fibras de bagazo obtenidas a través de la separación anteriormente mencionada. Es donde se toma cada una de las fibras y se empieza a cortar con una longitud de aproximadamente entre tres a cinco milímetros cada fibra obteniendo trozos pequeños de la fibra del bagazo, los cuales posteriormente serán utilizadas para la elaboración de los paneles.

3.2 Elaboración de muestras de paneles de bagazo con distintos aglutinantes

Para la obtención de los paneles se usó la metodología mostrada por Jiménez y Ochoa (2014). Partiendo de esta metodología se construyeron marcos de 15x25cm con espesores de 6, 12 y 25 mm, en los cuales se moldeó la mezcla entre el bagazo y los distintos aglutinantes.

Para la obtención de los paneles con base de bagazo, Jiménez y Ochoa indican cantidades exactas medidas con respecto a la conformación de los paneles con diferentes aglutinantes, lo cual facilita recrear los mismos paneles con las mismas características. Por esta razón y debido a que el objetivo principal implícito en el presente trabajo es conocer las propiedades acústicas del bagazo combinado con un aglutinante, siendo el bagazo el que predomine en la construcción del panel, se considera necesario medir la cantidad de bagazo y aglutinante que conforman cada panel.

Para obtener una cantidad predominante del bagazo en el panel se experimenta con la proporción entre bagazo y aglutinante de 3 a 1 en la mayoría de los casos, y por otra parte de 2 a 1 en el panel de goma y poliuretano. Para conseguir que el proceso sea lo más exacto posible, para cada panel se siguieron los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se debe cernir el bagazo que se obtuvo en la separación de las fibras del bagazo, a través de un cernidor metálico obteniendo filamentos más pequeños de bagazo.



Figura 18. Tamizado del bagazo

2. Luego se procede a rellenar de los filamentos de bagazo tamizados hacia los marcos de 15x25 cm, consiguiendo que abarquen completamente el ras del grosor del marco, para posteriormente pesar la cantidad de bagazo usada en este proceso.



Figura 19. Llenado de fibra de bagazo en el molde

3. Para el caso donde se tiene los marcos de yeso y barro, se divide al marco en 3 partes y se procede a llenar 1/3 del marco con el aglutinante para después pesarlo. De esta manera se cumple con las proporciones indicadas 3 a 1 en los paneles de barro y yeso.

4. Para los paneles de goma y poliuretano se experimentó con el mismo proceso que para los de barro y yeso, pero el resultado fue un panel poco compacto y frágil, por lo cual se tomó la decisión de mezclar el bagazo con este tipo de aglutinante hasta que se obtenga una mezcla homogénea, los valores de poliuretano y goma se miden de forma aproximada en mililitros para posteriormente hacer una relación con un su valor correspondiente en gramos mediante una regla de 3.
5. Una vez realizados los paneles se obtuvieron los siguientes datos que se observan a continuación en la tabla 3.

Tabla 3.

Cantidades de bagazo, aglutinante y agua para cada panel

TIPO	ESPESOR	BAGAZO (gr)	AGLUTINANTE (gr)	AGUA (gr)
BAGAZO-GOMA	6mm	20	60	0
	12mm	30	80	0
	25mm	60	140	0
BAGAZO-YESO	6mm	20	60	250
	12mm	30	120	500
	25mm	60	260	750
BAGAZO-POLIURETANO	6mm	20	20	0
	12mm	30	30	0
	25mm	60	50	0
BAGAZO BARRO	6mm	20	150	250
	12mm	30	190	500
	25mm	60	500	750

6. Con los pesos de los elementos establecidos a conformar para cada panel, se procede a realizar la mezcla, para situarlas en los respectivos moldes, como se logra apreciar en la figura 20. Los paneles tuvieron un proceso de

secado de 48 horas aproximadamente y presentan una característica de ser rígidos y compactos. Por lo cual se deduce que el método propuesto cumple de manera óptima.



Figura 20. Proceso de moldeado del panel bagazo-barro de 25mm en el marco

7. Una vez demostrado que las proporciones de los elementos son óptimas para los paneles, se procede a obtener el peso necesario para crear las muestras que se colocaran en el tubo de Kundt. Para obtener estas muestras se crearon moldes acordes al diámetro permitido por el tubo de Kundt que es de aproximadamente 35 mm. Las muestras fueron pesadas en una balanza digital y se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.

Peso de cada muestra

TIPO	ESPESOR (mm)	PESO (gr)
BAGAZO-GOMA	6	8,40
	12	3,51
	25	2,14
BAGAZO-YESO	6	8,37
	12	4,25
	25	2,69
BAGAZO- POLIURETANO	6	6,43
	12	4,19
	25	2,40
BAGAZO BARRO	6	9,10
	12	3,91
	25	2,83



Figura 21. Proceso de moldeado de las muestras correspondientes a bagazo - barro de 25mm, 6mm y 12mm



Figura 22. Proceso de moldeado de las muestras correspondientes a bagazo - yeso de 25 mm, 12 mm y 6 mm

8. Finalmente se obtiene 36 muestras en las cuales se dividen en los cuatro aglutinantes combinados con el bagazo teniendo: 9 muestras de bagazo poliuretano, 9 muestras de bagazo goma, 9 muestras de bagazo barro, y 9 muestras de bagazo yeso. Estableciendo 3 muestras similares de cada uno con los espesores de 6, 12 y 25 mm, como se observa en la figura 23, cabe recalcar que son tres muestras, en la figura se encuentran dos. En la siguiente tabla 4 se expresa el peso de cada muestra.



Figura 23. Pares de Muestras de bagazo poliuretano, bagazo goma, bagazo barro, bagazo yeso

3.3. Procedimiento de medición de las muestras

A continuación, se presenta los pasos a seguir para la caracterización de las propiedades de absorción sonora de las muestras del material de bagazo con los distintos aglutinantes, según lo establecido en la normativa UNE EN ISO 10534-2: 2002, mencionada en el apartado 2.6.1.

3.3.1 Proceso de conexión de los componentes del Tubo de Kundt

Primeramente, antes de empezar con los ensayos de medición, se debe proceder con la interconexión del sistema Spectronics de Acupro, como se muestra a continuación su cadena electroacústica.

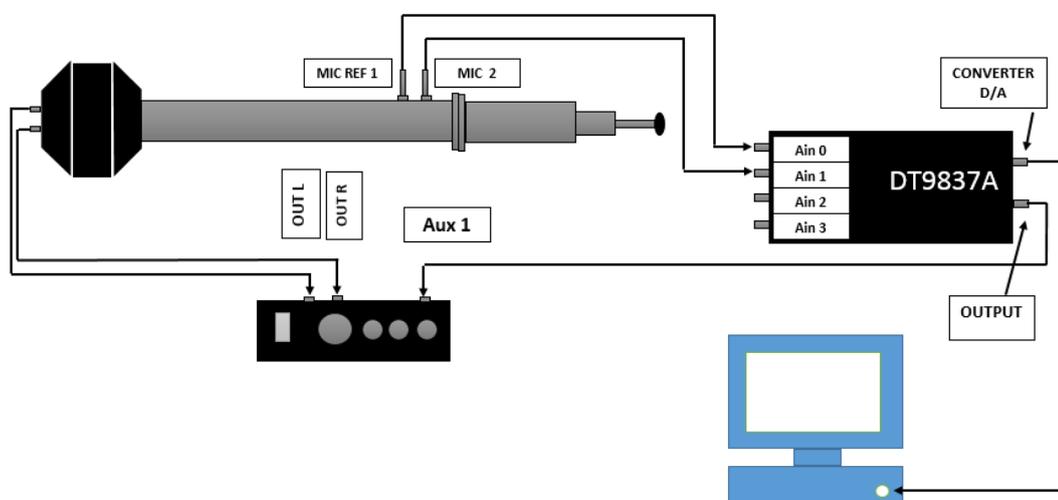


Figura 24. Diagrama de cadena electroacústica del tubo de impedancia Kundt - medición para coeficientes de absorción sonora de materiales



Figura 25. Cadena electroacústica del tubo de impedancia Kundt ubicado en el laboratorio de mediciones acústicas de la UDLA

3.3.2 Proceso de ejecución del software Accu Pro 4.5

El proceso de obtención del coeficiente de absorción consta de las siguientes etapas:

1. Una vez interconectado toda la cadena electroacústica del sistema, se abre el software Accu Pro 4.5 instalado en la computadora, para iniciar con el seteo del sistema, con la finalidad de conseguir resultados más precisos.
2. En primer lugar, se visualiza el software de la plataforma, donde se identifican dos bloques los cuales constan uno de absorción y el otro de pérdida de transmisión. Para ello se pondrá mayor énfasis en el de absorción y de su correspondiente seteo.
3. Una vez colocado en el bloque de absorción, se procede al seteo de las opciones que presenta el software. Se procede con la primera pestaña denominada DAQ como se observa en la figura 26, por lo que se debe verificar los valores estándares presentes en el sistema y concuerden.

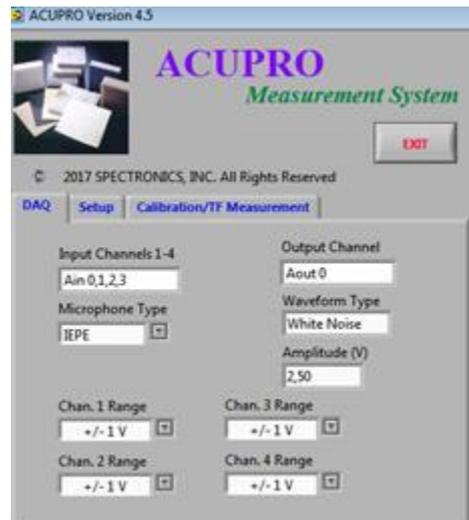


Figura 26. Datos estándares del sistema Accu Pro 4.5 de la pestaña DAQ
Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

4. En la siguiente pestaña denominada “Setup” se coloca los siguientes valores estándares como son:

- **Analysis frequency:** expresa el límite hasta el cual se realizará el barrido de frecuencias se colocará un valor de 6000 Hz.
- **Number of lines:** indica el número de líneas generadas en el barrido para el análisis de las muestras, se ubica un valor de 800.
- **Frequency resolution:** es la cantidad de puntos de muestreo que se colocan para poder modelar una señal de onda, valor de 7500 Hz.
- **Sampling length:** longitud del sampleo entre punto y punto en el modelado de la muestra, valor de 0.133 segundos.
- **Ambient Temperature:** temperatura ambiente del entorno natural de la sala de medición, en nuestro caso temperatura ambiente 20 grados centígrados.
- **Ambient Pressure:** presión ambiente del tubo de Kundt de funcionamiento a 101.33 kPa.

Cabe recalcar que si hay otros valores se deberá cambiar por los especificados anteriormente e igualmente verificar todos los valores.

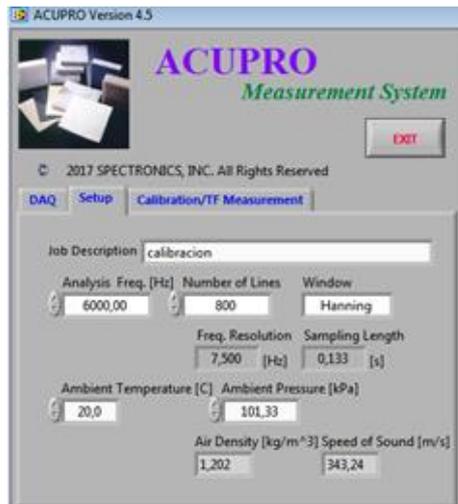


Figura 27. Datos estándares del sistema Accu Pro 4.5 de la pestaña Setup Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

- Finalmente, la última pestaña denominada “Calibration / TF Measurement”, es donde se procede a la calibración del sistema como también a la adquisición y cálculo de los coeficientes de absorción de los materiales a ser analizados, como se visualiza en la figura 28. Cabe recalcar que para obtener una mayor eficiencia en la adquisición de datos, el software realiza un proceso de muestreo de 100 tomas permitiendo precisar los datos. Por lo que mientras más valor de muestreo se coloque, mayor y exacto serán los resultados.

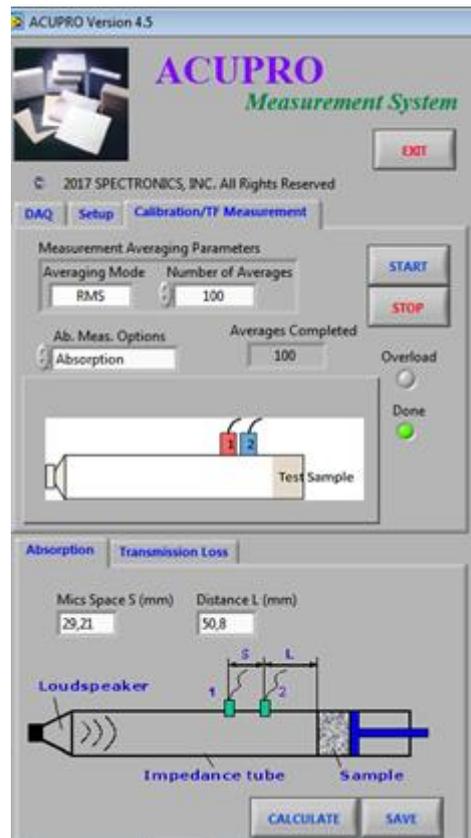


Figura 28. Datos estándares del sistema Accu Pro 4.5 de la pestaña Calibration / TF Measurement

Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

6. Establecido todos los valores de configuración de los pasos 3, 4 y 5 se procede con la calibración del sistema. Para ello se coloca en la pestaña de Calibration y se ubicará dentro de ella la opción "Ab. Meas. Options" en la cual se coloca la opción de "Calibration 1", como se visualiza en la figura 28. Hay que tomar en cuenta que la posición de los micrófonos visualizados en la imagen del software coincida con los ubicados en el tubo de Kundt.



Figura 29. Primera calibración

Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

- Una vez configurado y calibrado el sistema se procede a ubicar en la porta muestras del tubo de Kundt la muestra estándar de espuma de 25 mm, para la calibración 1 y 2, como se visualiza en la figura 30. Luego se presiona el botón “START” para iniciar con el proceso de cálculo de las 100 muestras.



Figura 30. Inserción de la muestra estándar de 25 mm de espuma, en el porta muestras

- A continuación, aparece una visualización de la magnitud, fase y coherencia que presenta los resultados de la primera calibración, se debe verificar si las gráficas tienen una similitud a la presentada en figura 31.

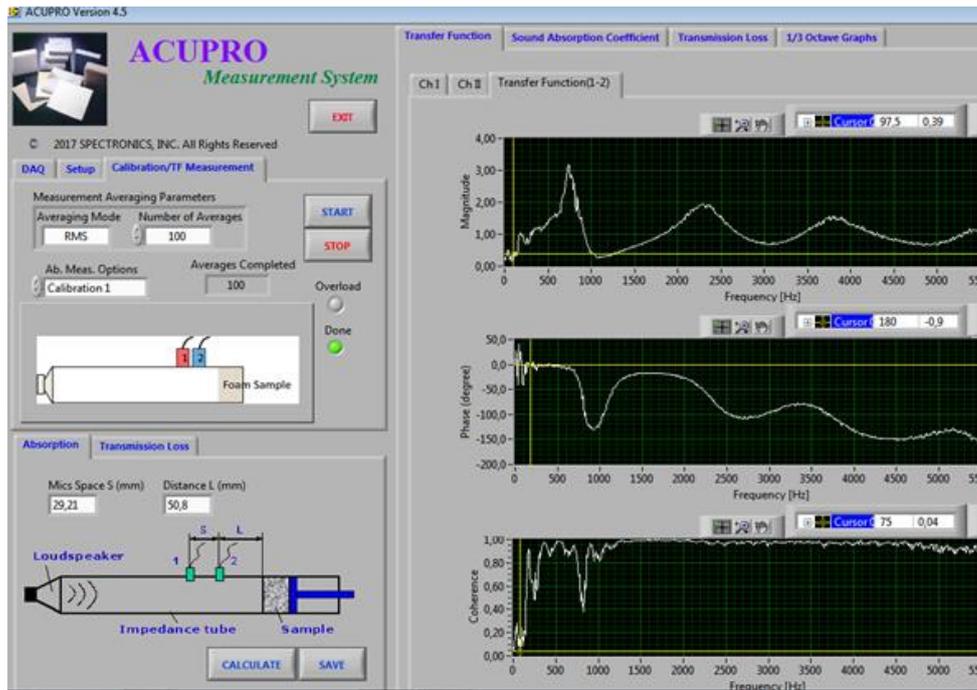


Figura 31. Primera calibración, resultados de magnitud, fase y coherencia.

Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

9. Después se procede con la siguiente calibración donde de igual manera en la opción de “Ab. Meas. Options” se coloca la “Calibration 2”, como se visualiza en la figura 32. Luego se intercambia el posicionamiento de los micrófonos como se visualiza en el software. Para posteriormente presionar botón “START” para iniciar con el proceso de cálculo de las 100 muestras.

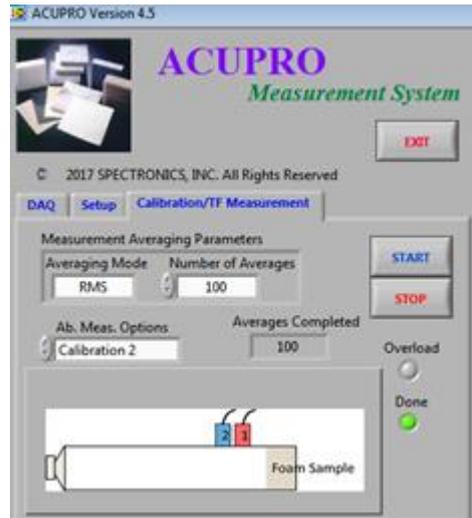


Figura 32. Segunda calibración

Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

10. De igual manera aparece una visualización de la magnitud, fase y coherencia que presenta los resultados de la segunda calibración, de igual forma se debe verificar si las gráficas tienen una similitud a la presentada en figura 33.

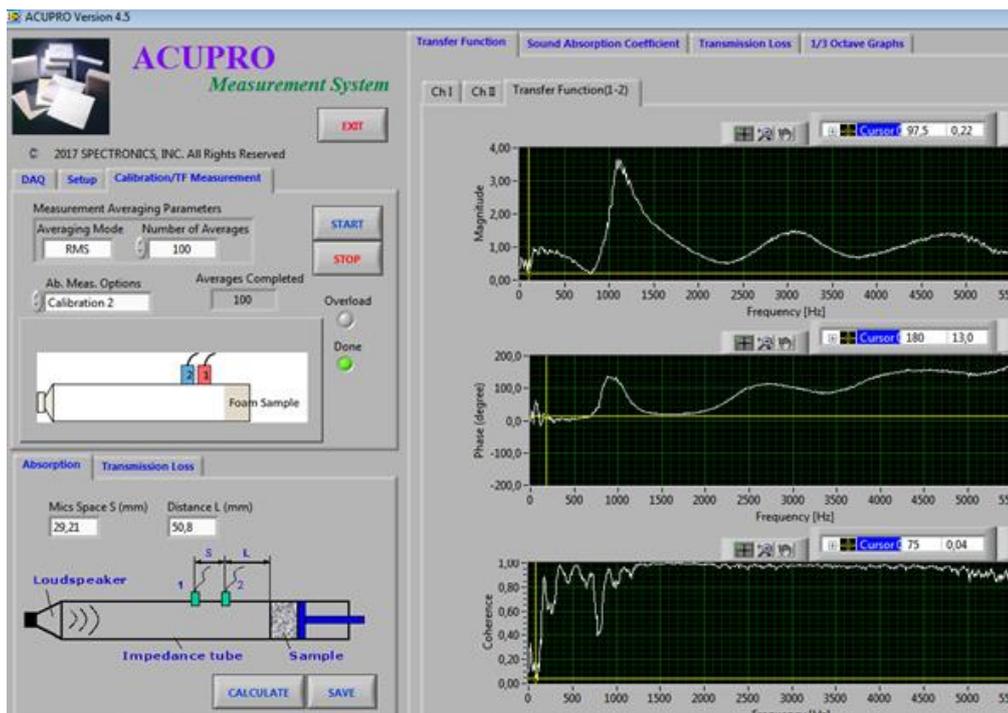


Figura 33. Segunda calibración, resultados de magnitud, fase y coherencia

Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

11. Finalmente, con las dos calibraciones establecidas se procede nuevamente a retornar a las posiciones iniciales a los micrófonos y además cambiar en la pestaña de “Ab. Meas. Options” a la opción de Absortion. Con ello se empieza con la primera medición de la muestra estándar de 25mm. Por lo cual, se procede a colocar “START” y esperar el cálculo del muestreo. Una vez obtenido el muestreo se presiona el botón de “CALCULATE” para poder generar los resultados de los coeficientes de absorción de la muestra, como se visualiza en la figura 34. Y también presenta las gráficas de tercio de octava presentes en la pestaña superior del software como se observa en la figura 35.

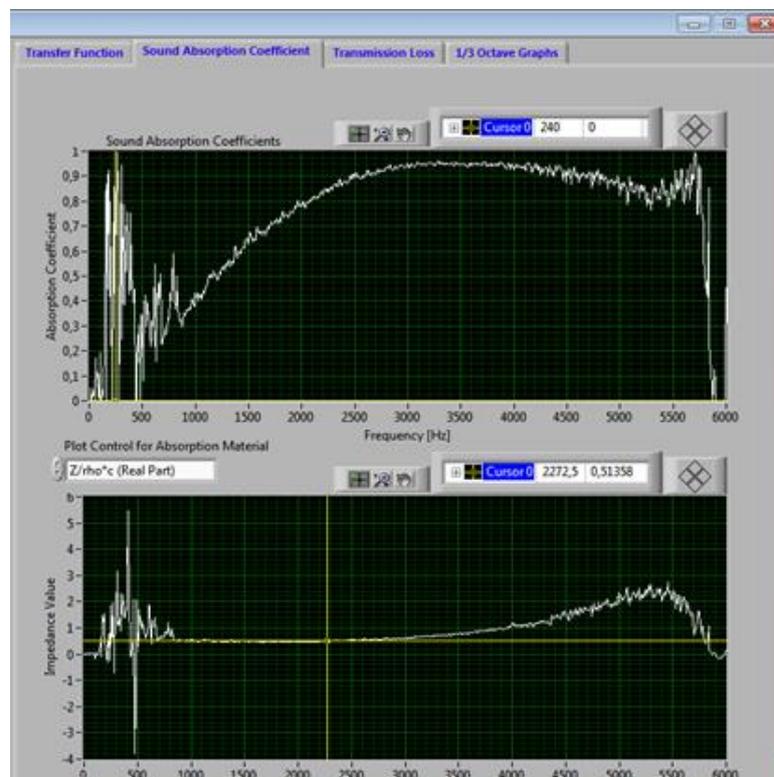


Figura 34. Resultados de coeficiente de absorción y de valores de impedancia
Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

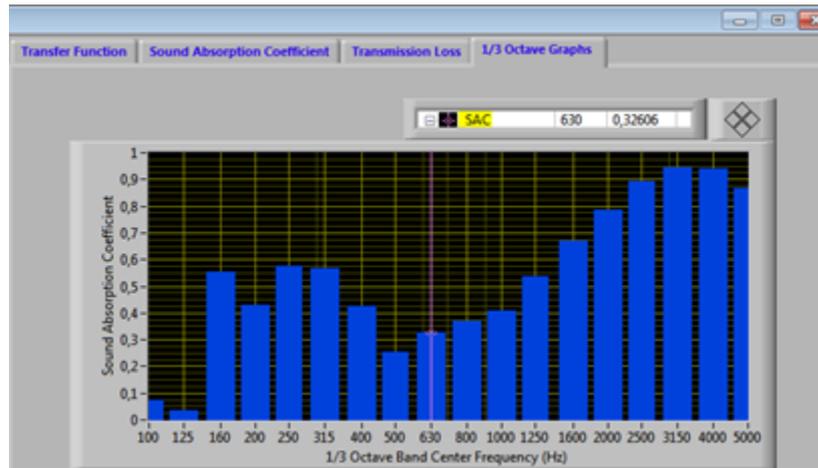


Figura 35. Resultados de coeficientes de absorción de tercio de octava muestra de 25 mm de espuma

Tomado de (Software Accu Pro 4.5, 2008)

12. Una vez obtenido los resultados se procede a guardar los archivos de programa del software como los archivos que se generan en una hoja de tabla excel con los resultados calculados por banda y por tercio de octava.
13. A continuación, con todos los pasos mencionados anteriormente tanto de calibración, colocación de las muestras en el tubo de impedancia y además con el manejo de la plataforma del software Accu Pro 4.5, se procede a medir los coeficientes de absorción de las correspondientes muestras de los paneles de bagazo yeso, bagazo goma, bagazo poliuretano y bagazo barro, como se observa una muestra en la figura 36.

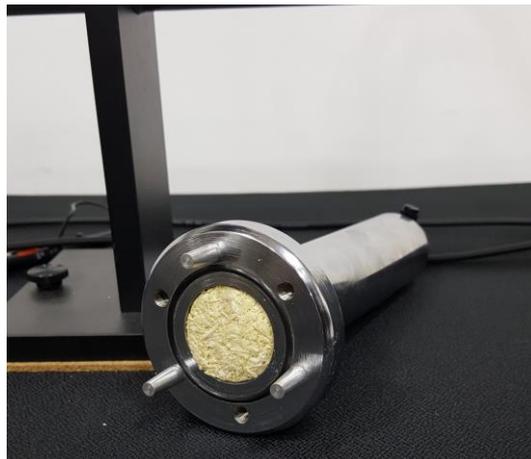


Figura 36. Muestra a ser medida de bagazo goma de 12 mm

14. Las muestras que analizar y medidas son tres muestras de cada uno de los paneles con sus correspondientes aglutinantes y sus espesores 6, 12 y 25 mm respectivamente como se observó en la figura 23. Cabe puntuar que de cada uno de los espesores como de las muestras se debe medir cinco veces de cada uno, dando un total de 180 mediciones.

3.3.3 Cálculo de incertidumbre entre las muestras

Basándose en el documento: “Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida”, se obtuvo la incertidumbre que existen en entre las mediciones de las 3 muestras por tipo de panel. El tipo de incertidumbre usada fue la incertidumbre típica: Tipo A, para obtener esta incertidumbre es necesario, primero obtener la varianza.

Una vez obtenida la incertidumbre, esta se multiplica por 100 para obtener un valor en porcentaje (%).

3.3.4 Cálculo de la obtención global del coeficiente de absorción

El desarrollo para lograr obtener el valor global del coeficiente de absorción de muestras es el siguiente:

1. Una vez obtenido los resultados del software con respecto a los coeficientes de absorción de las muestras. Se recurre al proceso de la obtención de los valores globales del coeficiente de absorción de las muestras, referenciando a la normativa UNE EN ISO 11654.
2. Antes que nada, se toma los registros obtenidos de las ciento ochenta mediciones, separando las mediciones por espesor y aglutinante obteniendo un total de quince mediciones, teniendo en cuenta que se tiene tres muestras por cada uno.
3. Una vez recolectada las quince mediciones, se procede a realizar un promedio aritmético de todas ellas. Hay que tomar en cuenta que este promedio se lo hace por cada tercio de octava.
4. Después con la normativa mencionada anteriormente, en primera instancia se procede a calcular el coeficiente de absorción sonoro práctico. Donde se recalca que se calcula para cada banda de octava un valor medio aritmético entre los tres coeficientes de absorción acústica en las bandas de tercio de octava.
5. Además, en este proceso se debe redondear los valores obtenidos en pasos de 0,05 con respecto a sus decimales, poniendo hincapié en el segundo decimal. Este segundo decimal tendrá condiciones tales como si es menor a dos se redondea a cero, si es mayor a tres se redondea a cinco, si es menor a siete se redondea a cinco y si es mayor a ocho se redondea a 0,1.
6. Una vez establecido los valores redondeados del anterior punto mencionado, se procede de inmediato con el coeficiente de absorción sonora ponderada. En donde la normativa establece una curva de referencia, la cual va a tomarse en cuenta como punto referencial. Debido a que los valores de esta curva referencial serán restados menos la desviación que se está desplazando, cabe entender que este desplazamiento se lo realiza en pasos de 0,05. Con este resultado se obtiene los valores de la curva desplazada.
7. Después se obtiene los valores de suma de la desviación desfavorable a través de la sustracción entre los valores de absorción redondeados mencionados en el punto 5 y los valores de la curva desplazada obtenidos en el punto 6. Con ello se obtendrá sumas desfavorables es decir valores

negativos, esto se resuelve con el fin de obtener el valor global de suma desfavorable.

8. Además, en la normativa establece que este valor global de suma desfavorable debe ser menor o igual a 0,10. Si no se cumple con esto, se realiza una translación de la curva de referencia por pasos de 0,05, hasta poder cumplir con la normativa.
9. Establecido una vez el cumplimiento de la normativa, se obtendrá el valor global del coeficiente de absorción del material plasmado sobre la frecuencia de 500 Hz, ubicada en los valores frecuenciales de la curva desplazada. Además, se debe colocar en el valor global el indicador de forma, el cual simboliza sobre qué frecuencias excede el valor de la curva de referencia desplazada en un 0,25 o más.
10. Para poder colocar el indicador de forma mencionado anteriormente en el punto 9, se coloca después del valor global obtenido en cuanto a los valores obtenidos en la curva desplazada, estos símbolos se los coloca entre paréntesis. Se indicará por medio de letras para ubicar sobre qué frecuencias el valor excede, entonces tenemos (L) si el valor de exceso en la frecuencia de 250 Hz, (M) si el valor de exceso está entre las frecuencias de 500 Hz o 1000 Hz y (H) si el valor de exceso está entre las frecuencias de 2000 Hz a 4000 Hz.

3.3.5 Cálculo de la pérdida de transmisión y el coeficiente de transmisión

Antes de entrar al proceso, es necesario aclarar que todos los valores de pérdida de transmisión y coeficiente de absorción no fueron obtenidos en el tubo de Kundt debido a que en el laboratorio no se cuentan con los 4 micrófonos necesarios para este ensayo. Por lo que se optó por obtener dichos valores de las muestras mediante un cálculo aproximado, basado en la teoría de ley de masas, este no representa un valor exactamente real, debido a que en el cálculo se considera a cada muestra como rígida, por lo cual no se toma en cuenta la frecuencia de resonancia (f_c). Para obtenerla, es necesario realizar pruebas de

elasticidad de cada muestra en laboratorio. El cálculo se lo establece únicamente en octavas de frecuencia hasta 4Khz.

De esta manera los pasos para la obtención de la pérdida de transmisión son los siguientes.

1. Con el peso de las muestras, se procede a obtener la masa superficial en kg/m² de cada muestra

Tabla 5.

Masa superficial de las muestras

TIPO	ESPESOR (mm)	PESO (gr)	MASA SUPERFICIAL (k/m²)
BAGAZO-GOMA	6	8,40	8,73
	12	3,51	3,65
	25	2,14	2,22
BAGAZO-YESO	6	8,37	8,70
	12	4,25	4,42
	25	2,69	2,80
BAGAZO- POLIURETANO	6	6,43	6,68
	12	4,19	4,36
	25	2,40	2,49
BAGAZO BARRO	6	9,10	9,46
	12	3,91	4,06
	25	2,83	2,94

2. Una vez obtenidos los datos anteriores se procede a usar la ecuación 5 de pérdida de transmisión, en campo difuso, ubicada en el apartado 2.2.1.3.
3. Para la obtención del coeficiente de transmisión, éste deberá ser despejado de la ecuación 1 que se encuentra en el apartado 2.2.1.1.

4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 Absorción Panel Bagazo - Goma

4.1.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Goma

Para calcular la incertidumbre de los paneles se realiza 3 mediciones de absorción para cada panel.

Tabla 6.

Incertidumbre en muestras Bagazo - Goma

Frecuencia (hz)	Panel 6mm	Panel 12mm	Panel 25mm
100	0,014	0,025	0,015
125	0,028	0,015	0,020
160	0,023	0,023	0,032
200	0,022	0,033	0,039
250	0,019	0,027	0,025
315	0,019	0,028	0,021
400	0,018	0,027	0,015
500	0,023	0,022	0,023
630	0,014	0,016	0,025
800	0,010	0,009	0,022
1000	0,009	0,007	0,009
1250	0,008	0,025	0,028
1600	0,011	0,033	0,025
2000	0,018	0,037	0,023
2500	0,023	0,033	0,023
3150	0,021	0,022	0,019
4000	0,021	0,019	0,024
5000	0,020	0,013	0,019

La tabla 6 presenta rangos de incertidumbre entre 0.0079 a 0.0279 obtenidos en las tres mediciones del panel de 6mm, siendo la de mayor realce la frecuencia de 2,5 khz en 2%. Para el panel de 12mm se presentan rangos de incertidumbre

entre 0.0071 a 0.0369 obtenidos en las tres mediciones, siendo la de mayor realce la frecuencia de 2 khz en 3%. Finalmente, para el panel de 25mm presenta rangos de incertidumbre entre 0.0087 a 0.0393 obtenidos en las tres mediciones, siendo la de mayor realce la frecuencia de 200 Hz en 3%.

4.1.2 Valores globales del coeficiente de absorción del panel Bagazo-Goma

En el cálculo del coeficiente de absorción sonora global de los paneles se obtuvieron los siguientes valores mostrados a continuación en la figura 37.

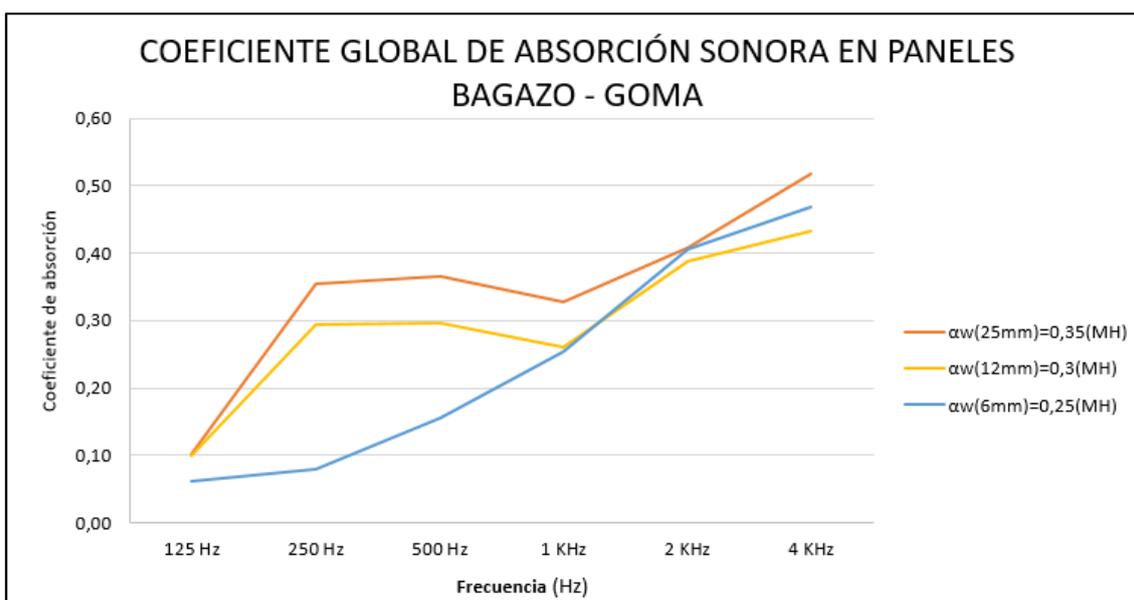


Figura 37. Coeficiente global de absorción sonora en paneles de Bagazo - Goma

Para el panel de bagazo - goma de 6 mm de espesor se obtuvo un valor de 0.25 (MH). En el panel de bagazo - goma de 12 mm de espesor se obtuvo un valor de 0.3 (MH). Finalmente, en el panel de bagazo - goma de 25 mm de espesor se obtuvo un valor de 0.35 (MH). Por lo que se manifiesta un crecimiento de absorción desde medias frecuencias (M) hacia altas frecuencias (H), a medida que el espesor de la muestra aumenta.

4.1.3 Comparación entre los paneles de Bagazo - Goma y sus espesores

En la figura 38 se indica una notoria diferencia de aumento de absorción, en cuanto a las frecuencias medias bajas. Lo que permite comprender el efecto que causa un material poroso como el bagazo conjuntamente unido con la goma como material aglutinante, en el momento de aumentar su espesor.

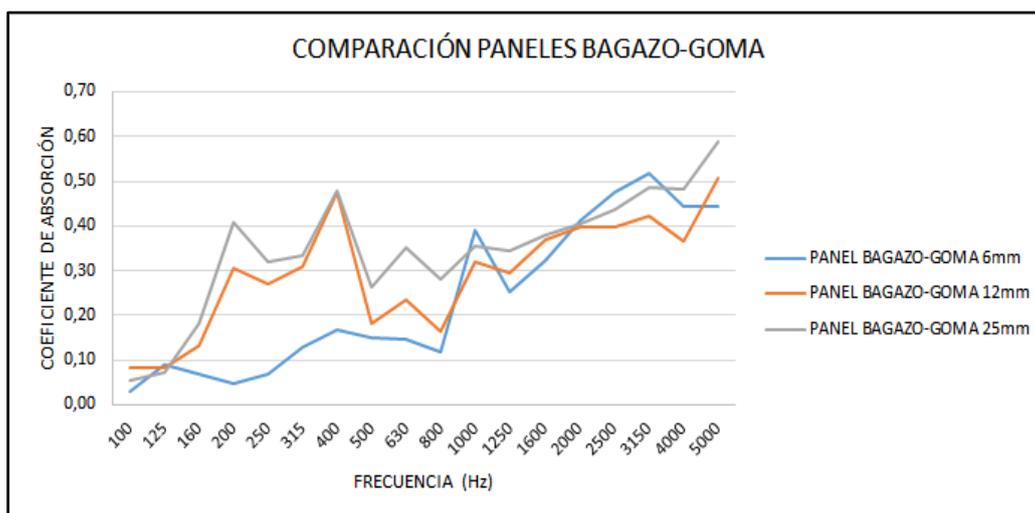


Figura 38. Comparación de la absorción medida de los paneles: Bagazo - Goma

La figura 38 muestra, que el resultado del panel de 6 mm en las frecuencias bajas aparentemente tiene una alta absorción. Esto es un error generado a partir de una deficiente curva de coherencia captada por el software Acupro, la cual se produce por el poco espesor de la muestra dentro del tubo, lo que conlleva a tener un resultado erróneo en la medición final. Este tipo de respuesta será también visible en los demás paneles de bagazo de espesor similar.

4.2 Absorción Panel Bagazo - Yeso

4.2.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Yeso

La siguiente tabla muestra la incertidumbre calculada en las muestras de bagazo – yeso en los distintos espesores.

Tabla 7.

Incertidumbre en las muestras de Bagazo – Yeso

Frecuencia (hz)	Panel 6mm	Panel 12mm	Panel 25mm
100	0,011	0,011	0,007
125	0,013	0,019	0,018
160	0,021	0,031	0,036
200	0,030	0,034	0,036
250	0,031	0,024	0,026
315	0,027	0,033	0,023
400	0,020	0,028	0,033
500	0,018	0,023	0,026
630	0,016	0,013	0,019
800	0,008	0,009	0,020
1000	0,013	0,003	0,007
1250	0,017	0,027	0,021
1600	0,026	0,035	0,022
2000	0,034	0,036	0,021
2500	0,031	0,037	0,020
3150	0,040	0,035	0,017
4000	0,049	0,041	0,020
5000	0,022	0,033	0,020

En la tabla 7 se presenta rangos de incertidumbre para la muestra de 6mm entre 0.0110 a 0.0490 obtenidos en las tres mediciones, siendo la de mayor realce la frecuencia de 4 khz en 4%. Para la muestra de 12mm se observan rangos de incertidumbre entre 0.0091 a 0.0490 obtenidos en las tres mediciones, siendo la de mayor realce la frecuencia de 4 khz en 4%. Finalmente, la muestra de 25mm presenta rangos de incertidumbre entre 0.0074 a 0.0361 obtenidos en las tres mediciones, siendo la de mayor realce la frecuencia de 160 Hz en 3%.

4.2.2 Valor global del coeficiente de absorción del panel Bagazo-Yeso

La figura 39 muestra los coeficientes globales de absorción sonora en los paneles de Bagazo – Yeso, con un vistazo general los paneles de Bagazo – Yeso, presentan un coeficiente más elevado que el panel de Bagazo – Goma.

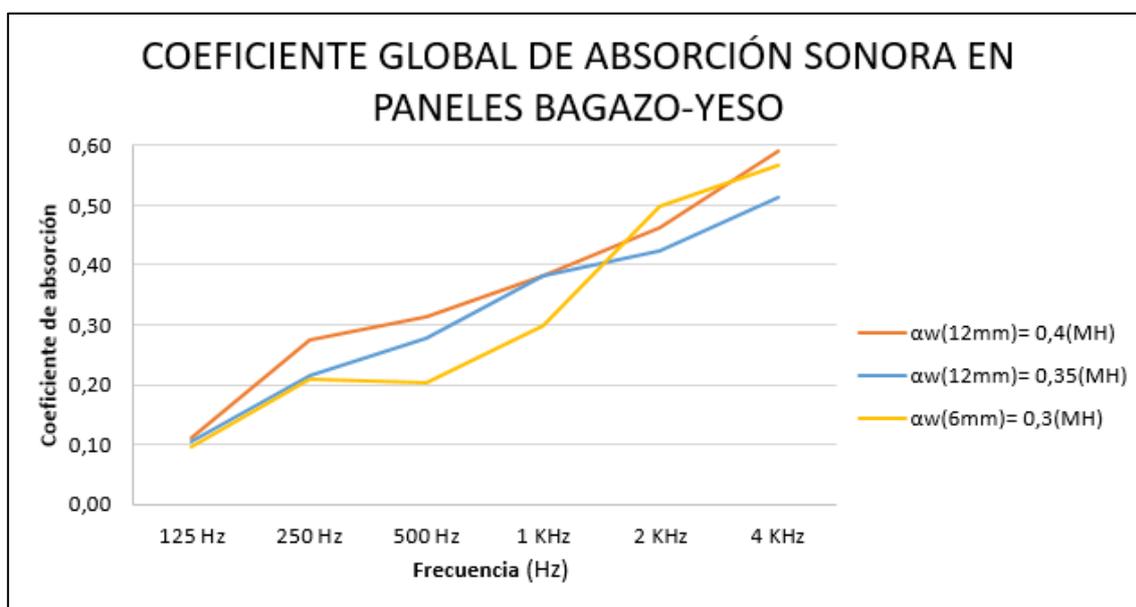


Figura 39. Coeficiente global de absorción sonora en paneles de Bagazo - Yeso

En los datos obtenidos correspondientes al coeficiente de absorción sonora global de bagazo - yeso de 6 mm de espesor se obtuvo un valor de 0.3 (MH), presentando una diferencia más de 0.05 en cuanto a la muestra de bagazo - goma con el mismo espesor, debido a que el yeso presenta mayor densidad que la goma. Para los paneles de bagazo - yeso de 12 mm de espesor se obtuvo un valor de 0.35 (MH). Finalmente, en el panel de bagazo - yeso de 25 mm de espesor se obtuvo un valor de 0.4 (MH).

4.2.3 Comparación entre los paneles de Bagazo -Yeso y sus espesores

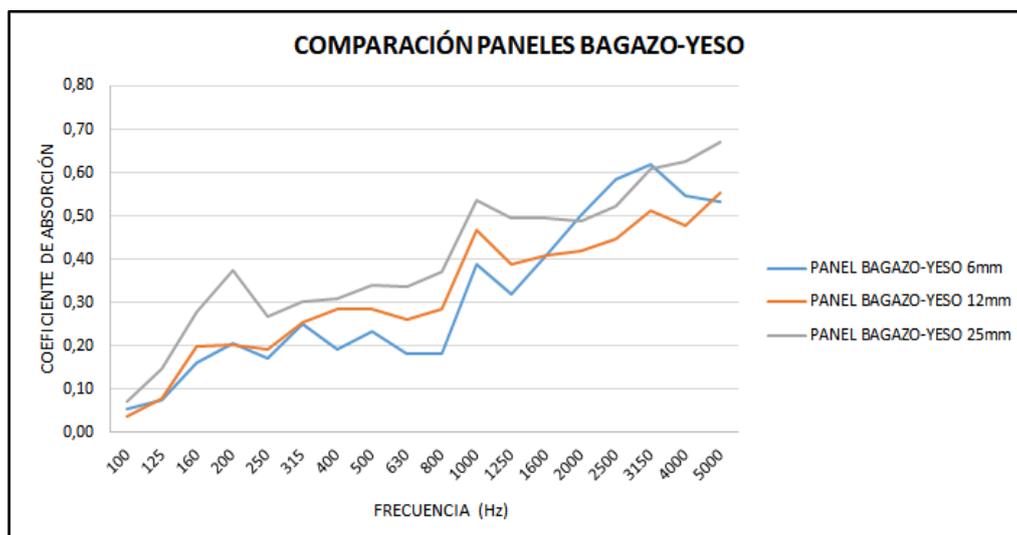


Figura 40. Comparación de la absorción medida de los paneles: Bagazo - Yeso

La figura 40 muestra la comparación de las tres muestras, se denota el efecto de alto grado de densidad que las muestras de bagazo juntamente con el yeso presentan a diferencia que tiene el bagazo con la goma. Además, la adherencia que presenta el yeso permite rellenar la porosidad que presenta el bagazo, debido a este fenómeno la gran parte de los poros son rellenados generando una diferente absorción en todo el espectro sonoro. En cuanto a las bajas frecuencias en especial cuando se aumenta el espesor, hay una variación de absorción en el mayor espesor de 25mm.

4.3 Absorción Panel Bagazo - Poliuretano

4.3.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Poliuretano

La tabla 8 muestra la incertidumbre calculada, después de las 3 mediciones respectivas en cada muestra.

Tabla 8.

Incertidumbre de las muestras Bagazo - Poliuretano

Frecuencia (hz)	Panel 6mm	Panel 12mm	Panel 25mm
100	0,013	0,015	0,019
125	0,022	0,023	0,039
160	0,026	0,029	0,060
200	0,032	0,033	0,051
250	0,022	0,028	0,039
315	0,026	0,023	0,023
400	0,019	0,019	0,034
500	0,010	0,017	0,033
630	0,012	0,012	0,026
800	0,010	0,007	0,039
1000	0,006	0,008	0,037
1250	0,030	0,007	0,070
1600	0,036	0,008	0,071
2000	0,035	0,014	0,064
2500	0,031	0,014	0,057
3150	0,023	0,013	0,054
4000	0,010	0,015	0,060
5000	0,012	0,014	0,040

Para el panel de 6mm se obtuvo una incertidumbre de 0,006 a 0,0360 entre las 3 muestras medidas, de donde la máxima corresponde a la frecuencia de 1.6 KHz en 3,6%. En el panel de 12 mm, se obtuvo una incertidumbre de 0,0067 a 0,0329, correspondiendo la máxima a la frecuencia 200hz en 3,2%. En el panel de mayor grosor 25 mm se obtuvo una incertidumbre de 0,0188 a 0,0710, la frecuencia de mayor en la cual existe mayor incertidumbre es 1,6khz con 7,1%.

4.3.2 Valores globales del coeficiente de absorción del panel Bagazo - Poliuretano

La figura 41 muestra el coeficiente global de absorción de los paneles de bagazo poliuretano, estos exceden los coeficientes de los paneles de Bagazo - Goma y Bagazo - Yeso.

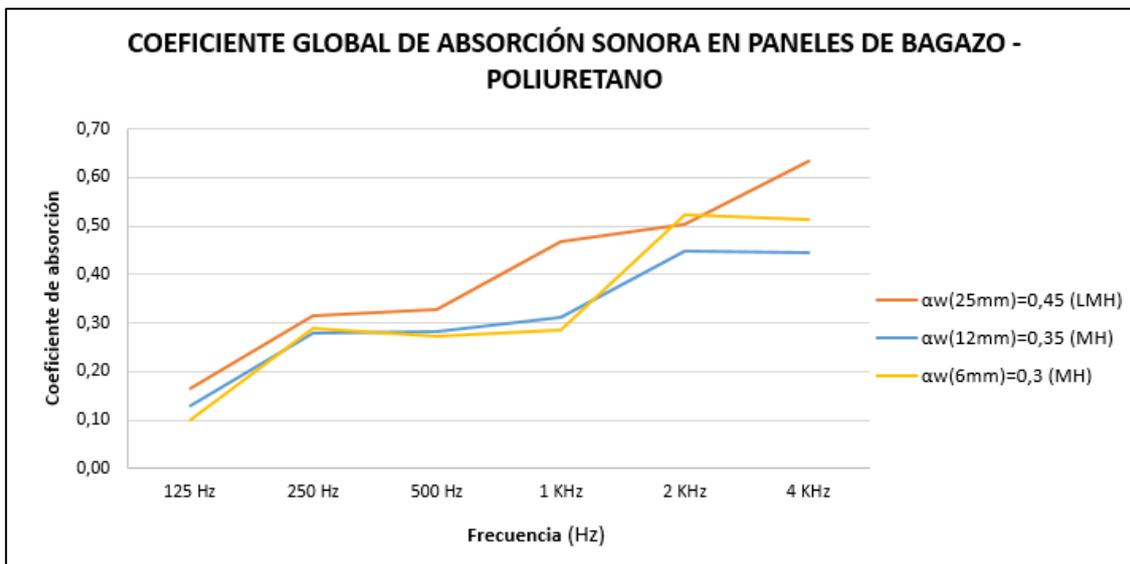


Figura 41. Coeficiente global de absorción sonora en paneles Bagazo - Poliuretano

Para el panel de Bagazo-Poliuretano de 6mm, presenta un coeficiente de absorción sonora global máxima de 0,5 aproximadamente desde 2 khz y una absorción global de 0,3(MH) predominante en medias frecuencias (M) y altas frecuencias (H). El panel de Bagazo-Poliuretano de 12mm muestra un coeficiente de absorción sonora de 0,45 en altas frecuencias y un coeficiente global de absorción correspondiente a 0,35(MH). Finalmente, el panel de Bagazo - Poliuretano con mayor espesor, 25 mm, se obtuvo un coeficiente global de absorción sonora de 0,45(LMH) con buena absorción en bajas (L), medias (M) y altas frecuencias (H). El máximo valor de absorción es 0,6 aproximadamente.

4.3.3 Comparación entre los paneles de Bagazo - Poliuretano y sus espesores

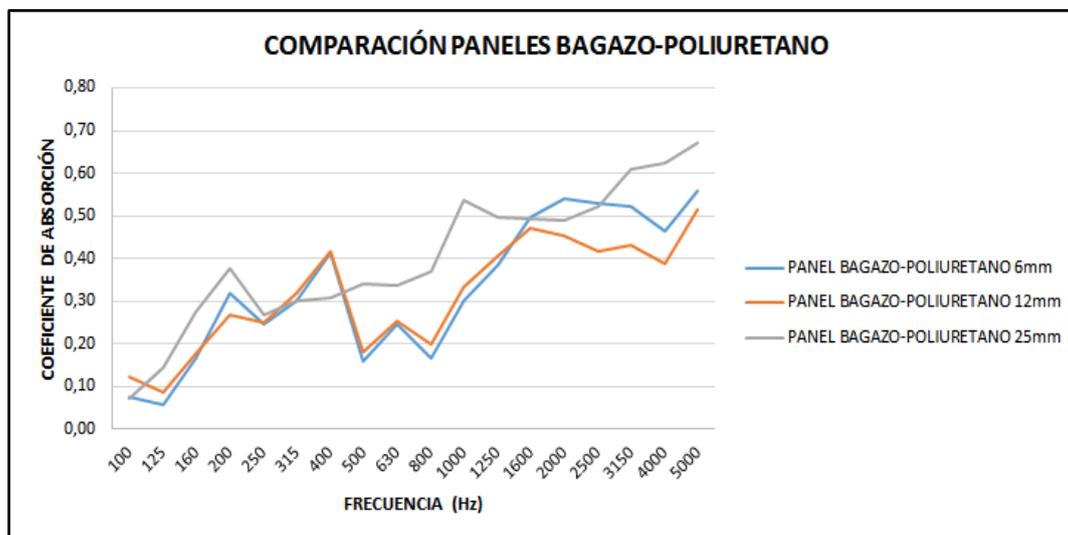


Figura 42. Comparación de la absorción medida de los paneles: Bagazo – Poliuretano

La figura 42 muestra la absorción en los 3 paneles con espesores de 6, 12 y 25 mm, teniendo los paneles de 6 y 12 mm con una curva similar, lo que implica que utilizando el poliuretano como aglutinante y con un espesor del doble no hace diferencia notable en la energía que se absorbe en su interior. La causa de este efecto podría ser expansibilidad del aglutinante, lo cual podría estar tapando cada pequeño espacio de aire dentro del panel, se vuelve predominante a comparación del bagazo.

En cambio, con el panel de 25 mm se puede notar que desde 400 hz la curva de absorción es ascendente y casi uniforme. Además, es notable que la cantidad de absorción con respecto a los 2 paneles anteriores es mayor.

4.4 Absorción Panel Bagazo - Barro

4.4.1 Incertidumbre calculada en las muestras de Bagazo - Barro

Finalmente, se muestra en la tabla 9, la incertidumbre calculada en las muestras de los paneles de Bagazo - Barro

Tabla 9.

Incertidumbre en las muestras de Bagazo - Barro

Frecuencia (Hz)	Panel 6mm	Panel 12mm	Panel 25mm
100	0,016	0,014	0,006
125	0,013	0,018	0,037
160	0,024	0,030	0,028
200	0,029	0,031	0,045
250	0,028	0,028	0,029
315	0,027	0,032	0,025
400	0,035	0,027	0,026
500	0,022	0,021	0,022
630	0,011	0,011	0,005
800	0,006	0,003	0,016
1000	0,005	0,002	0,014
1250	0,007	0,008	0,021
1600	0,012	0,012	0,023
2000	0,017	0,010	0,024
2500	0,017	0,012	0,024
3150	0,014	0,015	0,026
4000	0,014	0,016	0,028
5000	0,010	0,004	0,020

En la tabla 9 se presenta una incertidumbre, para el panel de 6mm desde 0,0047 a 0,0349, siendo la máxima incertidumbre correspondiente a la frecuencia de 400 hz en 3,4%. Para el panel de 12mm, va desde 0,0021 a 0,0320, siendo la frecuencia de 315 hz la que presenta la máxima incertidumbre con 3.2%. Para el panel de 25mm, va desde 0,0046 a 0,0455, donde la máxima es de 4,5% que

corresponde a la frecuencia de 200 hz, ya que este es un valor muy bajo frecuencialmente, se lo puede atribuir a un error dado por el pequeño espesor de la muestra, que genera un error en la curva de coherencia del software de medición.

4.4.2 Valores globales del coeficiente de absorción del panel Bagazo - Barro

Finalmente se presenta en la figura 43 el coeficiente de absorción global calculado en los paneles de Bagazo – Barro.

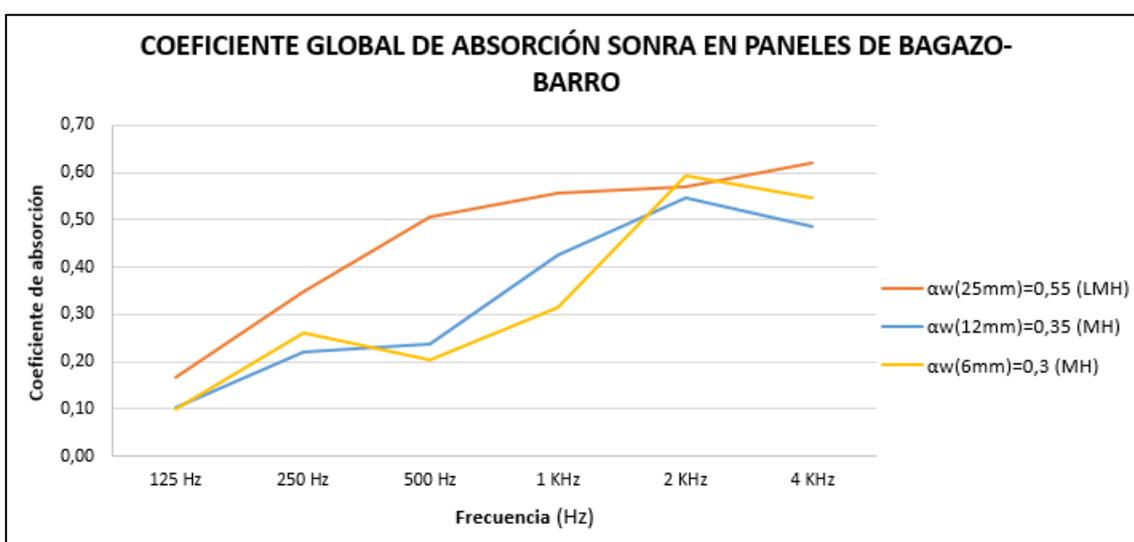


Figura 43. Coeficiente global de absorción: Bagazo - Barro 6 mm

En el panel de 6mm, se obtuvo un coeficiente de absorción sonora global de 0,3(MH) predominante en medias (M) y altas (H) frecuencias, siendo el punto aproximado máximo de absorción en 2 khz. La curva es ascendente desde 1 khz. Para el panel de 12 mm, se obtuvo un valor global de 0,35(MH), siendo el punto aproximado máximo de absorción en 2 khz con 0,5. Además la curva presenta valores ascendentes de absorción desde 500hz. En el panel de 25 mm, se obtuvo un coeficiente de absorción global de 0,55(LMH) bueno en bajas (L), medias (M) y altas (H) frecuencias, es el panel más absorbente en este estudio,

tiene un coeficiente de absorción sonora aproximada máxima de 0,6 en 4 khz y una curva ascendente desde 0,5 en 500 hz.

4.4.3 Comparación entre los paneles de Bagazo - Barro y sus espesores

En la figura 44, se muestra una comparación de todos los paneles de Bagazo – Barro.

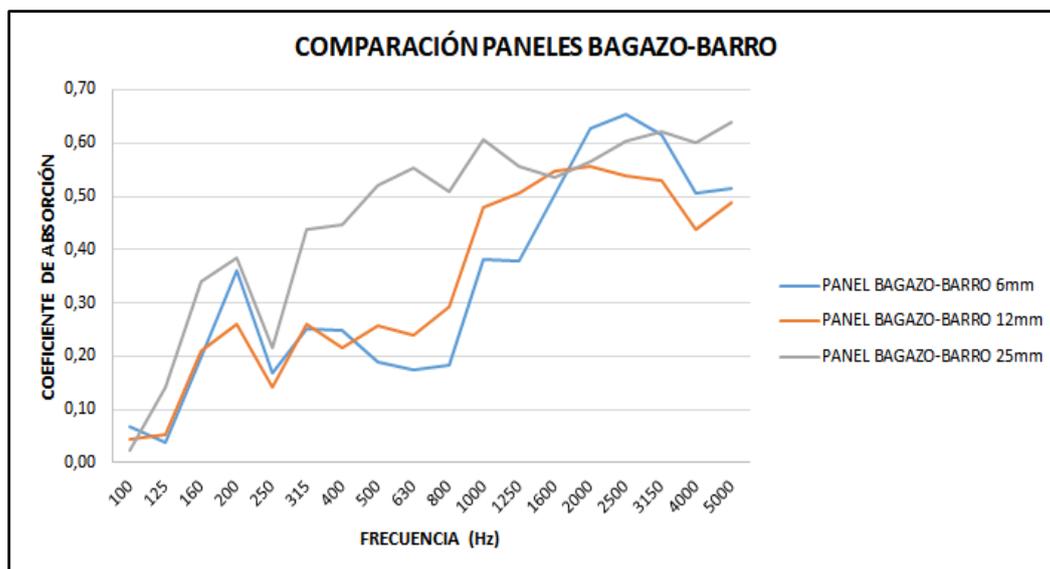


Figura 44. Comparación de la absorción medida de los paneles: Bagazo - Barro

Para los paneles de Bagazo - Barro de 6 y 12 mm se puede notar que el de 12 mm presenta mayor absorción desde 1 khz, aun así tiene una curva similar que el de 6 mm, los 2 presentan una absorción ascendente desde 1 khz.

El panel de 25 mm presenta una curva de absorción muy por encima de los paneles de 6 y 12 mm, existe una diferencia relativamente grande en 10% en bajas y 20% en medias frecuencias. Los paneles en general se caracterizan por ser muy buenos absorbentes por lo que se puede argumentar este resultado, ya que el barro es un aglutinante que posee buenas propiedades acústicas para aislamiento y absorción.

4.5 Comparación entre paneles del mismo espesor con distinto aglutinante.

4.5.1 Comparación paneles de 6mm

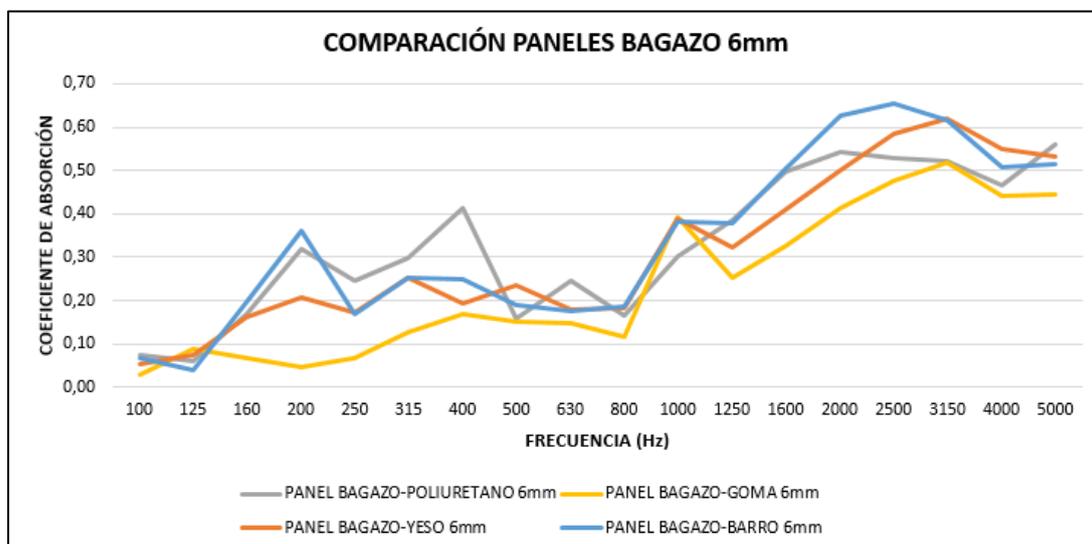


Figura 45. Comparación entre los paneles de 6mm

Para analizar la figura 45, es necesario omitir los valores en baja frecuencia ya que están influenciados por el error que presenta la curva de coherencia, debido a espesores pequeños de las muestras, del sistema Acupro al momento de calibrarlo. Por otro lado, se puede observar que la absorción aumenta desde 1kHz, y el aglutinante con el cual la absorción aumenta es con el barro, seguido del yeso, en tercer lugar, el poliuretano y al final la goma. Las curvas son cercanas, pero existe una diferencia considerable de 1% aproximadamente entre el panel de barro que sitúa su máxima absorción en 0,65 y el de goma en 0,52.

4.5.2 Comparación paneles de 12mm

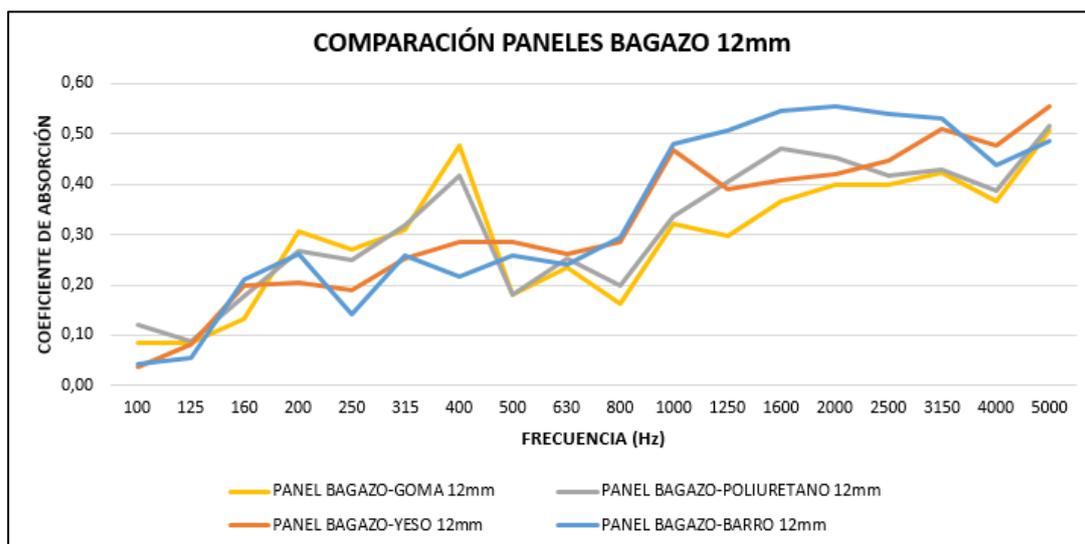


Figura 46. Comparación entre los paneles de 12mm

Para los paneles de bagazo de 12mm de espesor, se puede observar en la figura 66, que la absorción es considerable y aumenta desde los 800hz. Para este caso el aglutinante con el cual se obtiene más absorción sigue siendo el barro. El yeso y poliuretano no tienen mayor diferencia y la goma se sitúa en último lugar. El coeficiente de absorción sonora máxima no es mayor a 0,6 y el mínimo, perteneciente al panel de goma no sobrepasa los 0,5.

4.5.3 Comparación entre los paneles de 25mm

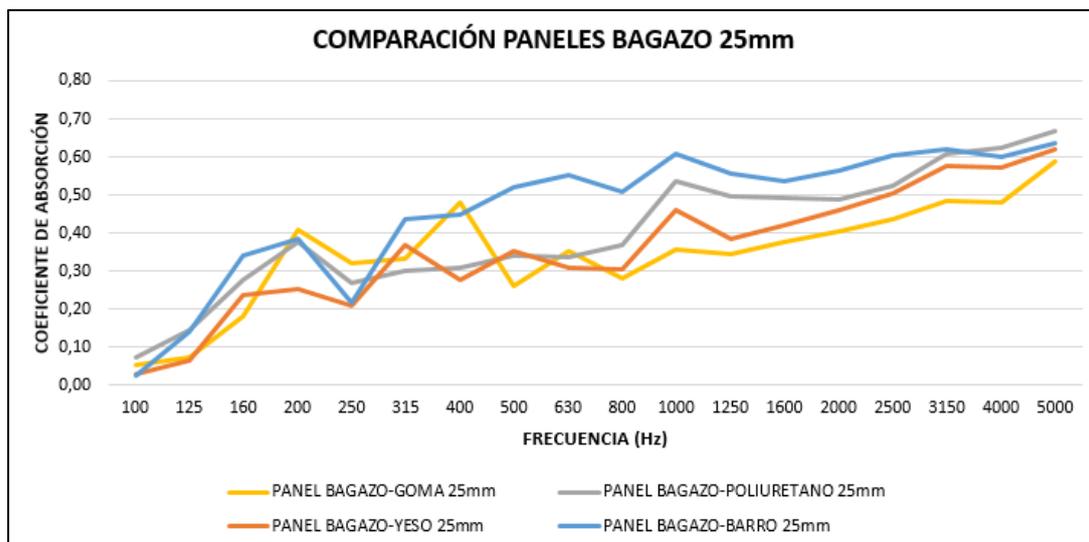


Figura 47. Comparación paneles de 25mm

Se puede notar en la figura 47, que la absorción es considerable desde los 300hz donde la curva muestra ser estable. Los resultados en cuestión de coeficiente de absorción sonora por aglutinante no han cambiado en comparación con los otros espesores, el panel de barro una vez más presenta mayor absorción, seguido por el de yeso, el de poliuretano en tercer lugar y al final el panel de goma. La absorción máxima no sobrepasa los 0,6 pero es mejor en bajas frecuencias a comparación de los otros espesores.

4.6 Pérdida de transmisión paneles de Bagazo

4.6.1 Paneles Bagazo – Goma

A continuación, se muestra la pérdida de transmisión calculada en paneles de bagazo – Goma, en la figura 48.

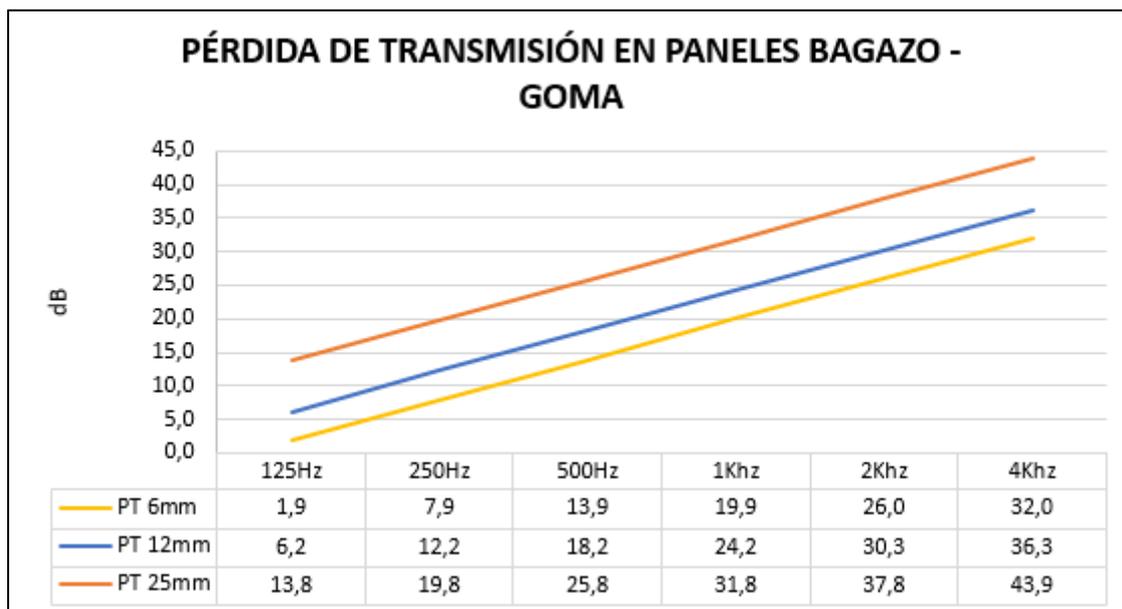


Figura 48. Pérdida de transmisión en paneles de Bagazo - Goma

La pérdida de transmisión en frecuencias de bandas de octava calculada para el panel de Bagazo – Goma de 6mm, no exceden 32 dB en 4 khz, presenta una pérdida de 13 dB considerable desde 500 hz, por su espesor no se espera una pérdida superior a 8 dB en bajas frecuencias. En el panel de 12 mm de Bagazo - Goma se puede observar que, debido al aumento de espesor al doble, comparado con el de 6mm, se aumentó aproximadamente 6 dB en los valores de pérdida de transmisión. La pérdida de transmisión para este caso es considerable desde 500 hz al igual que la de 6 mm y en baja frecuencia no excede los 12 dB. Para el panel de 25 mm de grosor, se obtuvo niveles altos de pérdida de transmisión hasta 43 dB en 4 khz. Los niveles de pérdida de transmisión son considerables desde 250 hz ya que llegan a 20 dB aproximadamente. Se puede notar que los niveles se duplicaron con respecto al panel de 12 mm.

Para la pérdida de transmisión calculada en los paneles, los coeficientes de transmisión acústica son los siguientes:

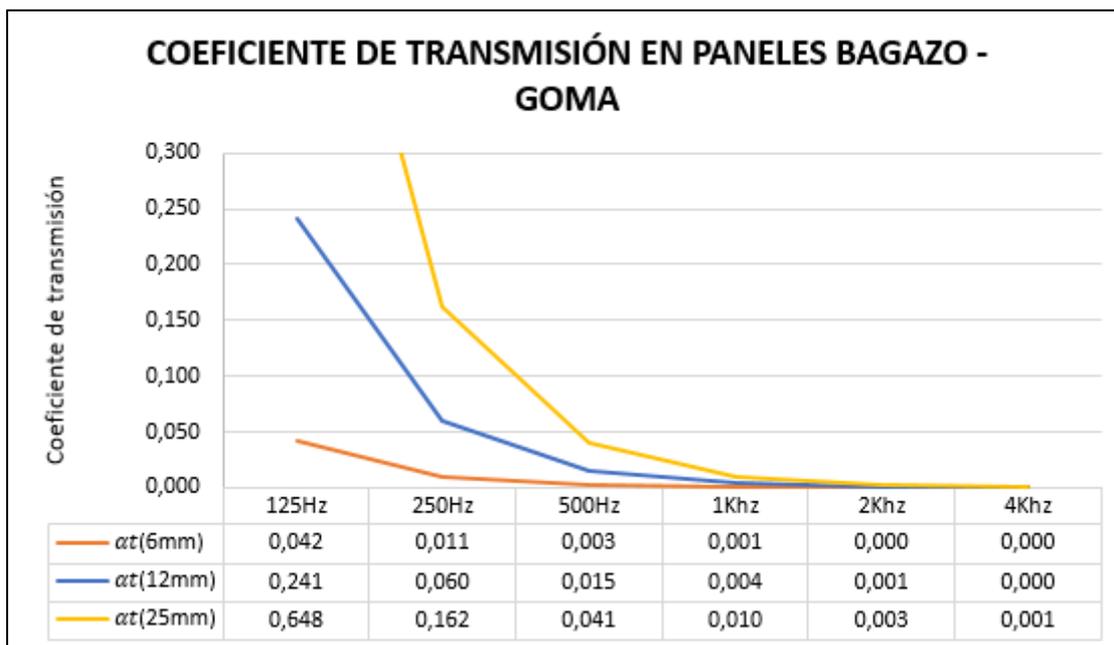


Figura 49. Coeficiente de transmisión: Bagazo - Goma 6 mm

4.6.2 Pérdida de transmisión muestra Bagazo – Yeso

La figura 50 muestra la pérdida de transmisión en paneles de Bagazo – Yeso.

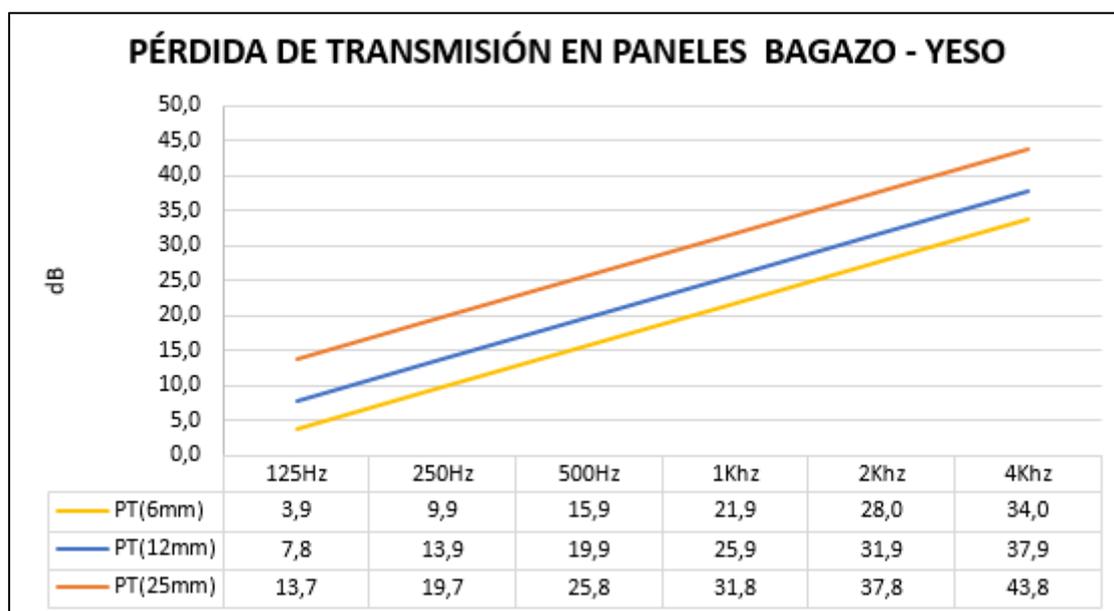


Figura 50. Pérdida de transmisión en paneles de Bagazo - Yeso

En el panel de bagazo - yeso con un espesor de 6mm presenta un alto nivel de pérdida de transmisión máxima de 34 dB en 4 khz, además posee valores considerables de 16dB desde los 500 Hz. Para el caso donde el panel es de 12 mm de espesor, se tiene un incremento de 3dB en cuanto a la pérdida de transmisión a comparación del de 6mm. Además de presentar un alto nivel de pérdida de transmisión máxima de 37 dB en 4 khz, además posee valores considerables de 19 dB desde los 500 Hz. En el caso donde el panel es de 25 mm de espesor de Bagazo - Yeso, se obtuvo un incremento de 6 dB en cuanto a la pérdida de transmisión a comparación del de 12 mm. Además de presentar un alto nivel de pérdida de transmisión máxima de 43 dB en 4 khz, además posee valores considerables de 25 dB desde los 500 Hz.

Para la pérdida de transmisión calculada, los coeficientes de transmisión acústica son los siguientes:

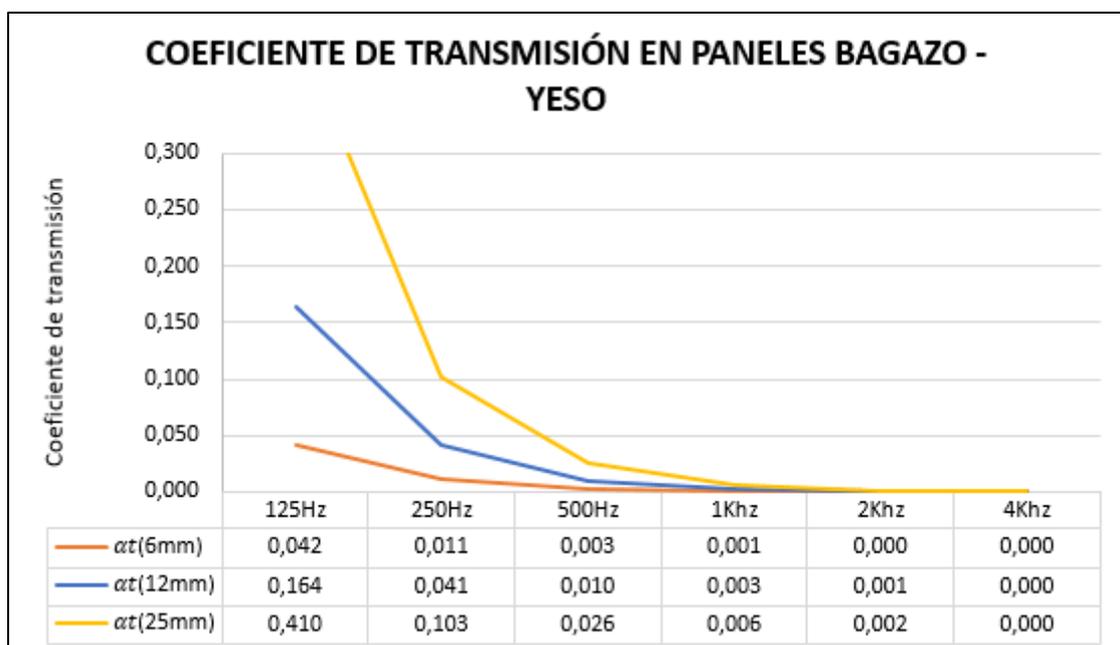


Figura 51. Coeficiente de transmisión en paneles Bagazo - Yeso

4.6.3 Pérdida de transmisión muestra Bagazo - Poliuretano

La figura 52 muestra la pérdida de transmisión calculada en los paneles de Bagazo – Poliuretano.

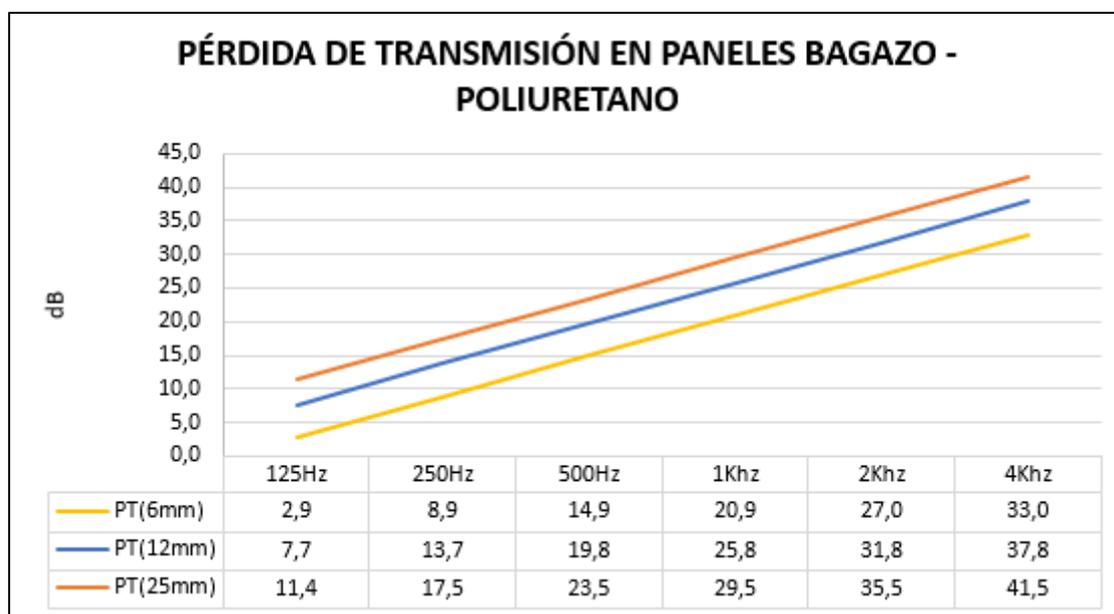


Figura 52. Pérdida de transmisión en paneles Bagazo - Poliuretano

Para el panel de Bagazo - Poliuretano 6mm, se obtuvo una pérdida de transmisión máxima de 33 dB en 4 khz, teniendo valores considerables desde 15 dB empezando en 500 hz. En el panel de 12 mm se obtuvo un nivel máximo de 37 dB en 4 khz, siendo aproximadamente 5 dB más alto que el de 6 mm. Los niveles de pérdida de transmisión considerable se presentan desde 500 hz con 19 dB. Para el panel de 25 mm se obtuvo valores de pérdida de transmisión considerables desde 250 hz con 17 dB, con un valor máximo en 4 khz de 41 dB, de esta manera se ubica por debajo del panel de Bagazo - Goma de 25 mm.

Para la pérdida de transmisión calculada, los coeficientes de transmisión acústica son los siguientes:

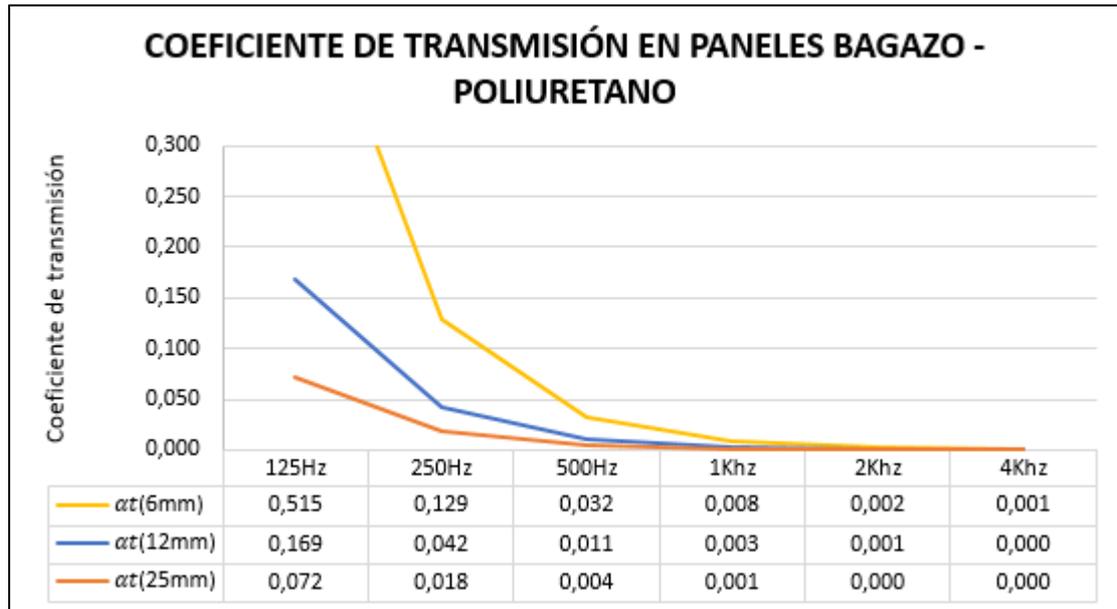


Figura 53. Coeficiente de transmisión en paneles Bagazo - Poliuretano

4.6.4 Pérdida de transmisión muestra Bagazo - Barro

Finalmente se muestra en la figura 54 la pérdida de transmisión calculada en los paneles de Bagazo – Barro.

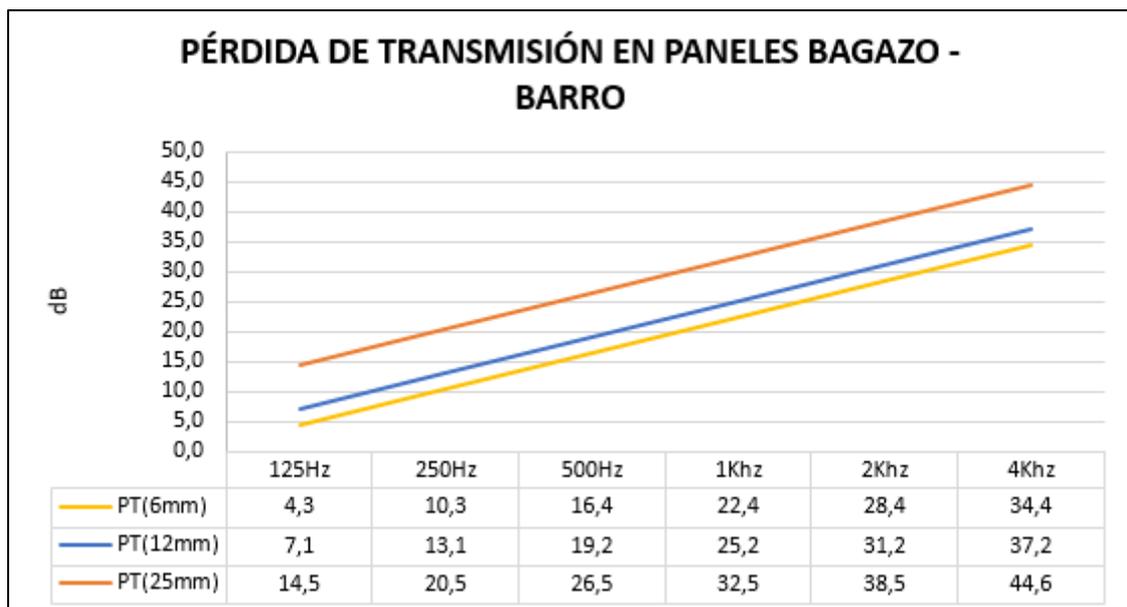


Figura 54. Pérdida de transmisión en paneles Bagazo - Barro

En el panel de bagazo - barro con un espesor de 6 mm se tiene un alto nivel de pérdida de transmisión máxima de 34 dB en 4 khz, además posee valores considerables de 16dB desde los 500 Hz. Dando a conocer que tiende a tener valores similares al panel de bagazo - yeso. Tomando en cuenta que ambos materiales tienen una densidad rígida que con el bagazo se conglomeran para tener una diferencia de 2 dB con el mismo espesor, pero con respecto a materiales como la goma o el poliuretano. Para el panel de 12 mm de espesor de Bagazo - Barro, se tiene un incremento de 3dB en cuanto a la pérdida de transmisión a comparación del de 6mm. Además de presentar un alto nivel de pérdida de transmisión máxima de 37 dB en 4 khz, por lo que posee valores considerables de 19 dB desde los 500 Hz. Por otra parte, para el caso de bagazo - goma la diferencia es de 1 dB con el mismo espesor y de 2 dB en el caso de bagazo - poliuretano, todas estas diferencias son de las pérdidas de transmisión. Finalmente, en el panel de 25 mm de espesor de bagazo - barro, se obtuvo un incremento de 7 dB en cuanto a la pérdida de transmisión a comparación del de 12 mm. Además de presentar un alto nivel de pérdida de transmisión máxima de 43 dB en 4 khz, además posee valores considerables de 25 dB desde los 500 Hz. En este caso se suscita la misma variación de diferencia en cuanto a bagazo - goma de 1 dB con el mismo espesor y de 2 dB en el caso de bagazo - poliuretano.

Para la pérdida de transmisión calculada, los coeficientes de transmisión acústica son los siguientes:

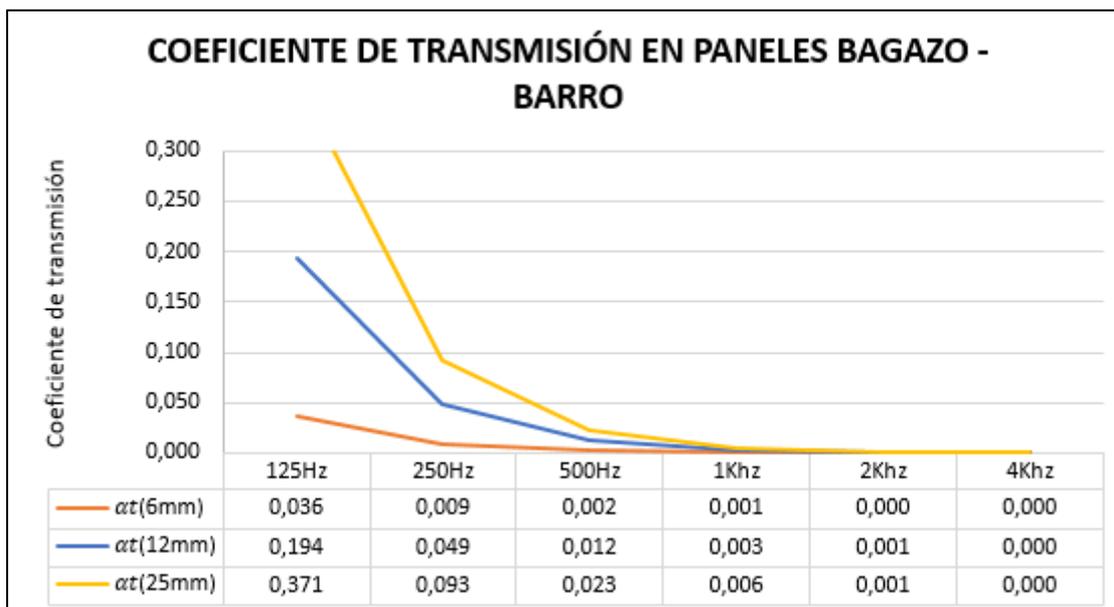


Figura 55. Coeficiente de transmisión en paneles Bagazo - Barro

4.7 Comparación de pérdida de transmisión entre paneles del mismo espesor

4.7.1 Comparación de la pérdida de transmisión en paneles de 6mm

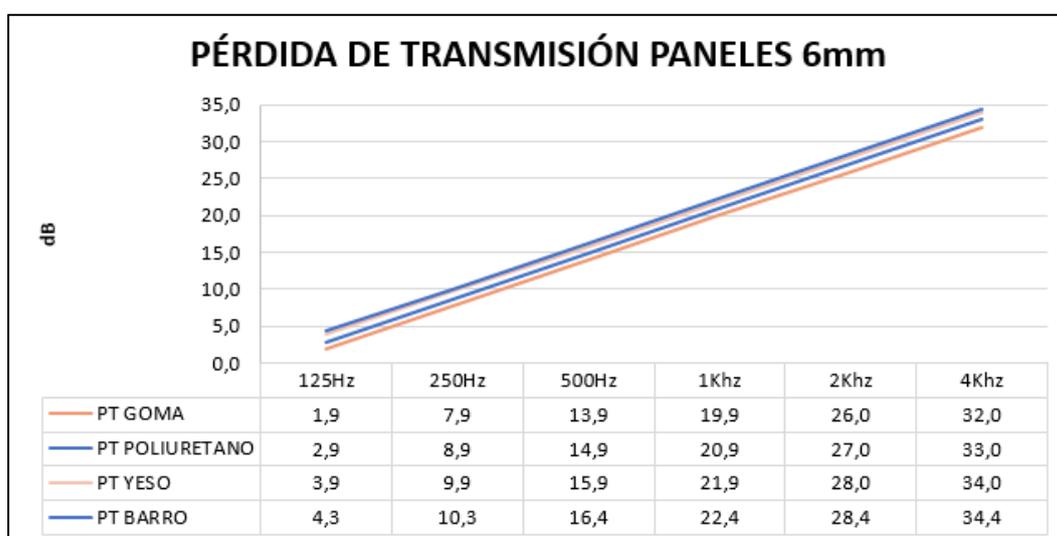


Figura 56. Comparación de pérdida de transmisión en paneles de 6mm

En el análisis de pérdida de transmisión de 6 mm, se destaca entre todos, el panel de bagazo - barro, debido a que presenta una mayor pérdida por el mayor

peso que constituye este panel a comparación del yeso, poliuretano y goma. Además, los resultados presentados en este análisis se basan en resultados teóricos, debido a ello hay un crecimiento parcialmente lineal en cuanto al espectro frecuencial para cada panel.

4.7.2 Comparación de la pérdida de transmisión en paneles de 12mm

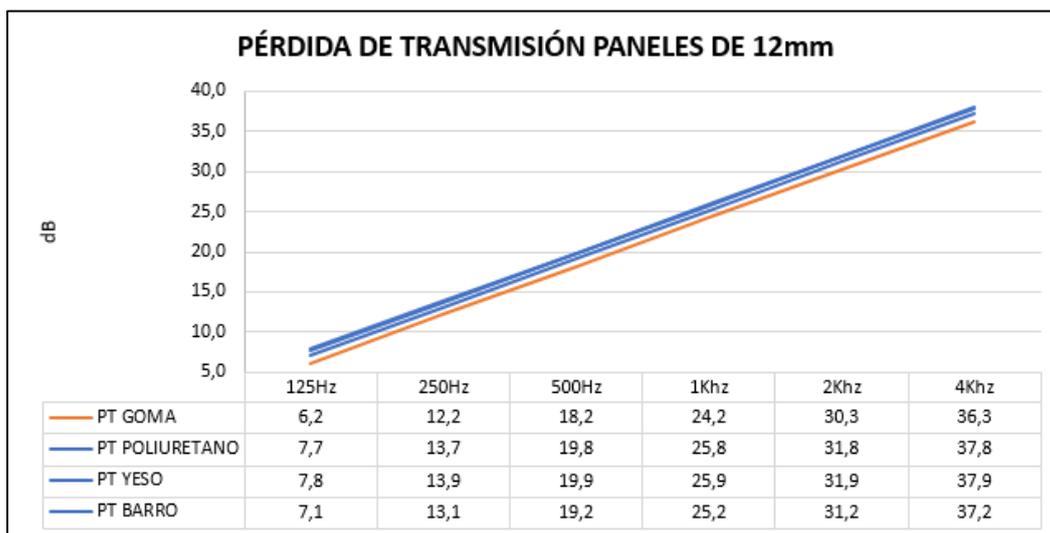


Figura 57. Comparación de pérdida de transmisión en paneles de 12mm

La pérdida de transmisión para paneles de 12 mm de espesor, se obtiene resultados de un aumento de pérdida de 3 dB para todos los casos en cada panel correspondiendo al espectro frecuencial. De igual manera el crecimiento es lineal en cuanto al espectro frecuencial de cada panel, pero cabe destacar que en este caso el panel de bagazo - yeso de 12 mm de espesor presenta mayor pérdida a diferencia del panel bagazo - barro. Este posible acontecimiento se debiera a que el panel de barro no haya presentado una compactación más fuerte, lo que conlleva a un peso menor al del yeso.

4.7.3 Comparación de la pérdida de transmisión en paneles de 25mm

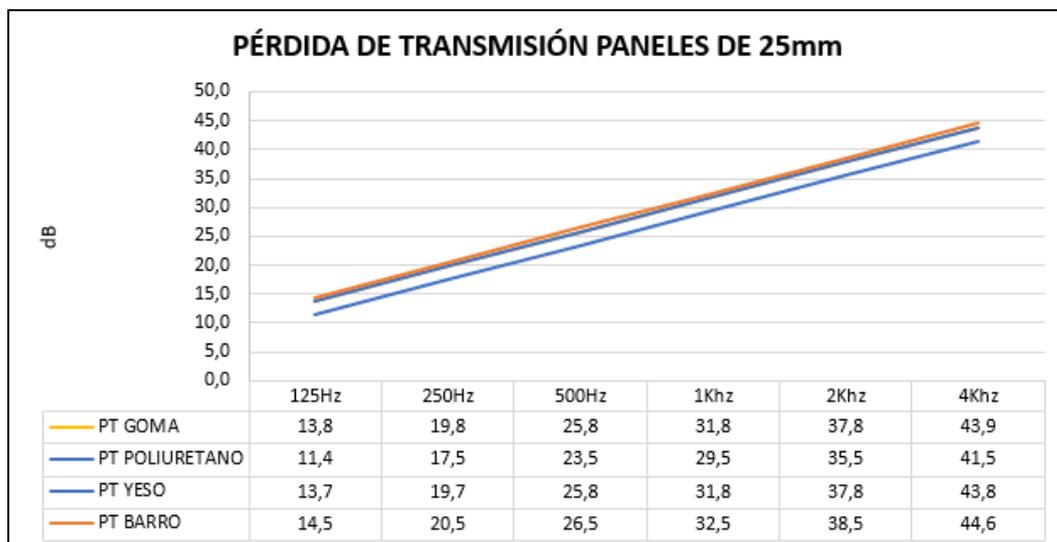


Figura 58. Comparación de pérdida de transmisión en paneles de 25mm

Finalmente, para el caso de la pérdida de transmisión para paneles de 25 mm de espesor, se obtiene resultados de un aumento de pérdida de 7 dB para todos los casos en cada panel correspondiendo al espectro frecuencial en comparación a los paneles de 12 mm y un aumento de pérdida de transmisión de 10 dB en comparación a paneles de 6 mm. De igual forma el panel que mayor pérdida de transmisión presenta es el de bagazo - barro, el cual presenta una mayor pérdida debido a su peso.

5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1 Costo total de materiales usados en la fabricación de los paneles.

En la tabla 6 se presentan los costos de los paneles acústicos de bagazo combinados con los distintos aglutinantes que son de materiales constructivos, tenemos la siguiente tabla que confiere al costo de estos.

Tabla 10.

Costo de materiales utilizados en la construcción de los paneles

CANTIDAD	MATERIAL	PRECIO UNITARIO
1	Libra de yeso blanco	\$ 0,45
1	Libra de barro	\$ 0,50
1	Tarro de espuma de poliuretano	\$ 10,00
1	Tarro de goma blanca mediano	\$ 2,00
1	Tablero molde de 15x25 cm	\$ 1,50
1	Rollo papel transparente	\$ 2,00
1	Guantes	\$ 1,00
1	Balanza analógica peso en gramos	\$ 20,00
	Subtotal	\$ 37,45
	IVA 12%	\$ 4,49
	TOTAL	\$ 41,49

El bagazo o caña de azúcar fue gratuito, cabe aclarar que fue una gran ventaja con respecto a la reducción de costos, además es un beneficio ecológico para la reducción de la contaminación. La gran mayoría de caña de azúcar es utilizada para la extracción del zumo de la planta y su bagazo es desechado a la basura, lo cual sería beneficioso su obtención gratuita en lugares donde se dedican a la labor.

5.2 Análisis económico del precio de los diferentes aglutinantes en los paneles de bagazo

Para obtener el costo de cada panel realizado, se tomó en cuenta únicamente el costo del aglutinante, partiendo de este valor se obtuvo el valor de cada panel a través de una relación entre el costo total del aglutinante por el peso de aglutinante sobre el peso del aglutinante total.

En la construcción de los paneles de bagazo con los distintos aglutinantes y de dimensiones de 15 x 25 cm, se tiene el siguiente costo indicando el precio que se establecería del aglutinante utilizado en los diferentes paneles.

Tabla 11.

Costo de los aglutinantes en los paneles de bagazo de 15 x 25 cm

TIPO	ESPESOR (mm)	BAGAZO (gr)	AGLUTINANTE (gr)	COSTO EN MERCADO	COSTO EN EL PANEL
BAGAZO - GOMA	6	20	60	\$ 2 EQUIVALE	\$ 0,13
	12	30	80	¼ DE GALON	\$ 0,17
	25	60	140	DE GOMA	\$ 0,29
BAGAZO – YESO	6	20	60	\$ 0,45	\$ 0,06
	12	30	120	EQUIVALE A 1	\$ 0,12
	25	60	260	LIBRA DE YESO	\$ 0,26
BAGAZO - POLIURETANO	6	20	20	\$ 10 EQUIVALE	\$ 0,20
	12	30	30	A 1 LITRO DE	\$ 0,30
	25	60	50	POLIURETANO	\$ 0,60
BAGAZO - BARRO	6	20	150	\$ 0,50	\$ 0,17
	12	30	190	EQUIVALE A 1	\$ 0,21
	25	60	500	LIBRA DE BARRO	\$ 0,55

Esta medida inicial de los paneles es el punto de partida para conocer el costo de paneles con otras dimensiones. En lo cual se podría recrear 3 dimensiones distintas de: 0,60 x 0,60m, 1 x 0,60m y 1,44 x 2,54 m. Para compararlos después

con el valor comercial de espuma acústica Auralex, lana mineral y aglomerado mdf respectivamente.

1. Para el caso donde los paneles se han fabricados con una dimensión de 1 metro por 0.60 cm, se tendría el siguiente costo.

Tabla 12.

Costo de los aglutinantes en los paneles de 1 m x 60 cm

TIPO	ESPESOR (mm)	BAGAZO (gr)	AGLUTINANTE (gr)	COSTO EN MERCADO	COSTO EN EL PANEL
BAGAZO - GOMA	6	320	960	\$ 2 EQUIVALE	\$ 2,08
	12	480	1280	¼ DE GALON DE GOMA	\$ 2,72
	25	960	2240		\$ 4,64
BAGAZO - YESO	6	320	960	\$ 0,45	\$ 0,96
	12	480	1920	EQUIVALE A	\$ 1,92
	25	960	4160	1 LIBRA DE YESO	\$ 4,16
BAGAZO - POLIURETANO	6	320	320	\$ 10	\$ 3,20
	12	480	480	EQUIVALE A	\$ 4,80
	25	960	800	1 LITRO DE POLIURETAN O	\$ 9,60
BAGAZO - BARRO	6	320	2400	\$ 0,50	\$ 2,72
	12	480	3040	EQUIVALE A	\$ 3,36
	25	960	8000	1 LIBRA DE BARRO	\$ 8,80

2. Por otro lado, se obtiene un costo de precios si las dimensiones de los paneles fueran de 60 cm por 60 cm.

Tabla 13.

Costo de los aglutinantes en paneles de 60 cm x 60 cm

TIPO	ESPEJOR (mm)	BAGAZO (gr)	AGLUTINANTE (gr)	COSTO EN MERCADO	COSTO EN EL PANEL
BAGAZO - GOMA	6	192	576	\$ 2 EQUIVALE	\$ 1,25
	12	288	768	¼ DE GALON	\$ 1,63
	25	576	1344	DE GOMA	\$ 2,78
BAGAZO - YESO	6	192	576	\$ 0,45	\$ 0,58
	12	288	1152	EQUIVALE A 1	\$ 1,15
	25	576	2496	LIBRA DE YESO	\$ 2,50
BAGAZO - POLIURETANO	6	192	192	\$ 10	\$ 1,92
	12	288	288	EQUIVALE A 1	\$ 2,88
	25	576	480	LITRO DE POLIURETANO	\$ 5,76
BAGAZO - BARRO	6	192	1440	\$ 0,50	\$ 1,63
	12	288	1824	EQUIVALE A 1	\$ 2,02
	25	576	4800	LIBRA DE BARRO	\$ 5,28

3. Para el coste de precios, si las dimensiones de los paneles fueran de 1,44 m por 2,54 m.

Tabla 14.

Costo de los aglutinantes en paneles de 1,44 m x 2,54 m

TIPO	ESPEJOR (mm)	BAGAZO (gr)	AGLUTINANTE (gr)	COSTO EN MERCADO	COSTO EN EL PANEL
BAGAZO - GOMA	6	1978,03	5934,08	\$ 2 EQUIVALE	\$ 12,86
	12	2967,04	7912,11	¼ DE GALON	\$ 16,81
	25	5934,08	13846,19	DE GOMA	\$ 28,68
BAGAZO - YESO	6	1978,03	5934,08	\$ 0,45	\$ 5,93
	12	2967,04	11868,16	EQUIVALE A	\$ 11,87
	25	5934,08	25714,35	1 LIBRA DE YESO	\$ 25,71
BAGAZO - POLIURETANO	6	1978,03	1978,03	\$ 10	\$ 19,78
	12	2967,04	2967,04	EQUIVALE A	\$ 29,67
	25	5934,08	4945,07	1 LITRO DE POLIURETANO	\$ 59,34

BAGAZO - BARRO	6	1978,03	14835,20	\$ 0,50	\$ 16,81
	12	2967,04	18791,25	EQUIVALE A	\$ 20,77
	25	5934,08	49450,67	1 LIBRA DE BARRO	\$ 54,40

5.3 Comparación del valor de los paneles de bagazo frente al valor comercial de otros materiales acústicos y de construcción.

Antes de proceder a comparar los valores entre paneles de bagazo y otros materiales acústicos utilizados en la construcción, se debe tomar en cuenta que los valores calculados anteriormente corresponden al costo, mas no al valor comercial. Por esta razón es necesario otorgarle un valor comercial a cada panel, de esta manera se realizaría una comparativa justa entre los distintos materiales, el precio contiene el 30% de margen de ganancia.

Los materiales con los cuales se realiza la comparativa tienen un espesor de 50 mm, por lo tanto, es necesario simular un costo de los paneles de bagazo en el caso de que sean de este espesor, por lo cual el costo de los paneles de 25 mm se multiplica por 2.

A continuación, se presenta el valor comercial para cada panel con sus distintas medidas a lo que confiere los paneles de bagazo, como se establece en las tablas 15, 16 y 17:

Tabla 15.

Precio final de los paneles de 1m x 60 cm

TIPO	ESPESOR (mm)	COSTO	PRECIO
BAGAZO-GOMA	6	\$ 2,08	\$ 2,97
	12	\$ 2,72	\$ 3,89
	25	\$ 4,64	\$ 6,63
	50	\$ 9,28	\$ 13,26
BAGAZO-YESO	6	\$ 0,96	\$ 1,37

	12	\$ 1,92	\$ 2,74
	25	\$ 4,16	\$ 5,94
	50	\$ 8,32	\$ 11,89
BAGAZO-POLIURETANO	6	\$ 3,20	\$ 4,57
	12	\$ 4,80	\$ 6,86
	25	\$ 9,60	\$ 13,71
	50	\$ 19,20	\$ 27,43
BAGAZO - BARRO	6	\$ 2,72	\$ 3,89
	12	\$ 3,36	\$ 4,80
	25	\$ 8,80	\$ 12,57
	50	\$ 17,60	\$ 25,14

Tabla 16.

Precio final de los paneles de 0,6m x 0,6m

TIPO	ESPEJOR (mm)	COSTE	PRECIO
BAGAZO-GOMA	6	\$ 1,25	\$ 1,79
	12	\$ 1,63	\$ 2,33
	25	\$ 2,78	\$ 3,97
	50	\$ 5,56	\$ 7,94
BAGAZO-YESO	6	\$ 0,58	\$ 0,83
	12	\$ 1,15	\$ 1,64
	25	\$ 2,50	\$ 3,57
	50	\$ 5,00	\$ 7,14
BAGAZO- POLIURETANO	6	\$ 1,92	\$ 2,74
	12	\$ 2,88	\$ 4,11
	25	\$ 5,76	\$ 8,23
	50	\$ 11,52	\$ 16,46
BAGAZO - BARRO	6	\$ 1,63	\$ 2,33
	12	\$ 2,02	\$ 2,89
	25	\$ 5,28	\$ 7,54
	50	\$ 10,56	\$ 15,09

Tabla 17.

Precio final de los paneles de 1,44m x 2,54m

TIPO	ESPEJOR (mm)	COSTE	PRECIO
BAGAZO-GOMA	6	\$ 12,86	\$ 18,37
	12	\$ 16,81	\$ 24,01

	25	\$ 28,68	\$ 40,97
	50	\$ 57,36	\$ 81,94
BAGAZO-YESO	6	\$ 5,93	\$ 8,47
	12	\$ 11,87	\$ 16,96
	25	\$ 25,71	\$ 36,73
	50	\$ 51,42	\$ 73,46
BAGAZO - POLIURETANO	6	\$ 19,78	\$ 28,26
	12	\$ 29,67	\$ 42,39
	25	\$ 59,34	\$ 84,77
	50	\$ 118,68	\$ 169,54
BAGAZO - BARRO	6	\$ 16,81	\$ 24,01
	12	\$ 20,77	\$ 29,67
	25	\$ 54,40	\$ 77,71
	50	\$ 108,80	\$ 155,43

A continuación, se presenta a detalle tanto el apartado de su espesor como del precio de los materiales a comparar y son los siguientes:

Tabla 18.

Costo de precios de materiales acústicos comerciales en el mercado

TIPO	DIMENSIONES (m)	ESPESOR (mm)	PRECIO
ESPUMA ACUSTICA (AURALEX)	0,60 x 0,60	50	\$ 27,29
LANA MINERAL DE ROCA	1 x 0,60	50	\$ 13,00
AGLOMERADO MDF	1,44 x 1,54	12	\$ 50,00

Se procede a la comparación de los paneles de bagazo elaborados de manera artesanal, frente a materiales acústicos industrializados.

1. En la primera comparación se encuentra los paneles de auralex que son esponjas acústicas. Al comparar los paneles de bagazo con los productos de auralex con las mismas dimensiones de este material, se tiene unos costos bastante reducidos en cuanto a un 71% bagazo - goma, 73% bagazo - yeso,

39% bagazo - poliuretano y 44% bagazo - barro, todos ellos en comparación con el precio comercial.

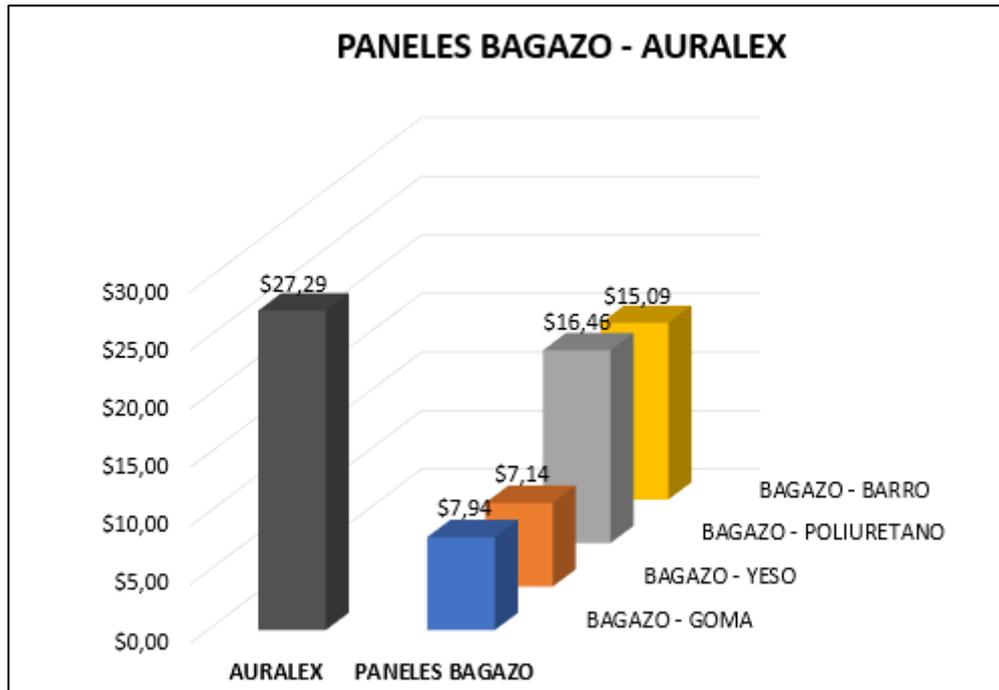


Figura 59. Comparación de precios entre paneles de esponja Auralex vs paneles de bagazo con sus distintos aglutinantes

- En la siguiente comparación se encuentra la lana mineral que es un material idóneo para aislamiento acústico. Por lo que comparados con los paneles de bagazo con las mismas dimensiones de este material, se tiene un costo reducido en cuanto a un 8% bagazo - yeso. Pero para los otros casos tenemos un aumento de precio de los paneles de bagazo a comparación del comercial estando en 2% bagazo - goma, 52% bagazo - poliuretano y 48% bagazo barro. Evidenciando claramente que la lana mineral es un material muy barato en el mercado y fácil de conseguir.

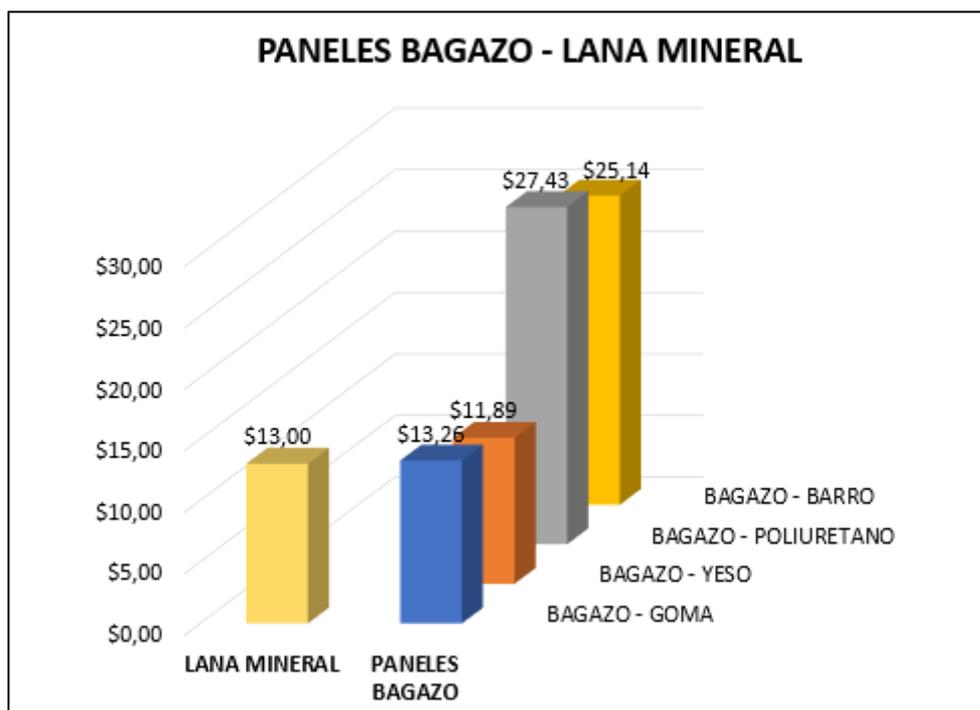


Figura 60. Comparación de precios entre lana mineral vs paneles de bagazo con sus distintos aglutinantes

- Y finalmente se tiene la comparación de las planchas MDF que actúan como materiales acústicos que, al compararlo con los paneles de bagazo de las mismas dimensiones, se tiene un costo bastante reducido en cuanto a un 52% bagazo - goma, 66% bagazo - yeso, 15% bagazo - poliuretano y 40% bagazo - barro, todos ellos en comparación con el precio comercial.

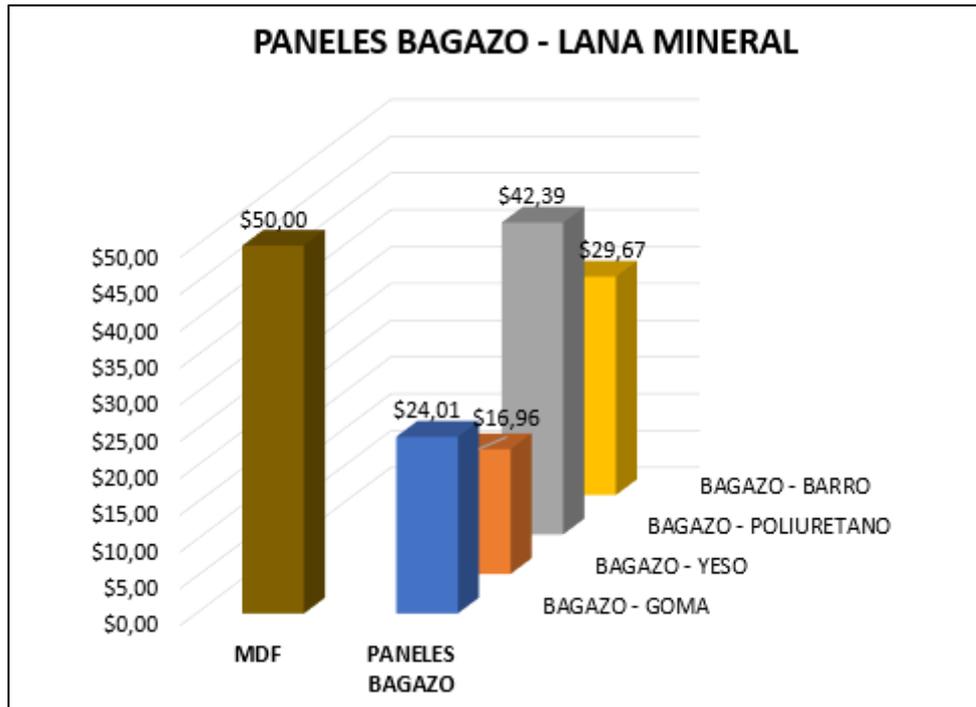


Figura 61. Comparación de precios entre planchas MDF vs paneles de bagazo con sus distintos aglutinantes

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La gran funcionalidad que se logra en esta investigación es calcular la función de transferencia acústica compleja de las señales, en las cuales se consiguió obtener valores de coeficiente de absorción sonora e impedancia acústica en incidencia normal, para las muestras de bagazo con sus diferentes aglutinantes.

En cuanto a la metodología para determinar el coeficiente de absorción acústica de materiales, se recurrió a la normativa UNE-EN ISO 10534-2 la cual confiere al cálculo de absorción sonora de materiales a través del tubo de Kundt. Además, el uso didáctico y fácil de la instrumentación de la compañía Spectronics Acupro, juntamente con su software acupro 4.5 son herramientas de gran utilidad.

La producción de bagazo de caña de azúcar tiene un alto índice de producción en nuestro país Ecuador. Por otra parte, los desechos de la caña de azúcar son descartados a la basura, lo cual las obtenciones de sus desechos no tienen ningún costo. A través de nuestra investigación se logró conseguir una alternativa mucho más ecológica y rentable en cuanto a obtener paneles absorbentes acústicos a través de las fibras de desecho del bagazo.

En cuanto al cálculo del grado de incertidumbre de las diversas muestras de bagazo con sus respectivos aglutinantes, presentaron resultados con un grado muy bajo de incertidumbre entre 1% a 5% como máximo para las muestras de 6 mm, 12 mm y para el caso de 25 mm estuvo entre 1% a 7%. Destacando que el grado máximo de incertidumbre presente en los micrófonos de medición es hasta un 8%. Con ello se confirma que los resultados son fiables de todos los paneles analizados, debido a ser inferiores a la incertidumbre máxima.

Con los coeficientes globales obtenidos en cada panel, se puede concluir que no existe una diferencia considerable entre los paneles de 6mm de espesor con los

de 12mm ya que presentan una absorción únicamente en altas frecuencias. En cambio, con los paneles de 25mm se nota un aumento considerable de absorción en frecuencias medias bajas en comparación a los paneles de 12mm.

El panel Bagazo - Yeso es el panel más conveniente usar en relación absorción - precio comparado con los demás paneles con base de bagazo y con los materiales acústicos en el mercado. Su absorción es considerable en bajas frecuencias y es superado únicamente por el panel bagazo - barro, el cual lo supera en precio, siendo la relación absorción-precio no conveniente.

La transmisión se resolvió calculando de manera teórica a partir de la ley de masas. Comprobando que, para las muestras de goma, poliuretano, yeso y barro, se evidenció que a medida que se aumenta el espesor la diferencia de crecimiento en cuanto a la pérdida de transmisión es de 3 dB de 6 a 12 mm y de 6 dB de 6 a 12 mm. Con ello se comprueba que al aumentar el espesor de la muestra también obviamente aumentará el peso de la misma, por consiguiente, la pérdida de transmisión aumentará, debido a que son directamente proporcionales.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda para estudios posteriores realizar paneles de 50mm de espesor de tal manera que se pueda comparar con la absorción con materiales acústicos comerciales y establecer una comparación absorción-precio.

Para el apartado de las mediciones hay que tomar en cuenta los micrófonos de medición a utilizar, las cuales tengan las mismas características de gran respuesta en frecuencia, así como similar voltaje de entrada. Con todas estas características se evitará sobrecargar al software y evitar respuestas de mediciones que no sean fiables.

En cuanto a la creación de los paneles es recomendable para futuras investigaciones idear un proceso de manufacturación estándar, con ayuda de maquinaria apta para realización de aglomerados, con el fin de reducir la incertidumbre de cada muestra y obtener un coeficiente de absorción que no esté afectado por el proceso de manufacturación.

En este estudio la materia prima constó de trozos de bagazo que contienen fibra y almidón, para estudios posteriores sería de gran interés crear paneles únicamente con fibra y con almidón de tal manera de comparar cuál de estas 2 características ayuda más a la absorción en cada panel.

Se recomienda para investigaciones futuras, realizar el ensayo de elasticidad para cada panel, de tal forma de corroborar los datos de pérdidas de transmisión obtenidos teóricamente en este estudio, y además obtener el coeficiente de transmisión por medio del método de función de transferencia.

Finalmente se recomienda realizar ensayos de absorción en cámara reverberante para conocer el comportamiento de cada panel, frente al sonido con incidencia aleatoria.

REFERENCIAS

- Arenas, J., Alba, J. Del Rey, R., Ramis, J. y Suárez, E. (2011). *Materiales absorbentes ecológicos para pantallas acústicas*. Valdivia, Chile: Ediciones Universidad Austral de Chile.
- Argotti, M. (2017). *Evaluación de las propiedades acústicas de diferentes muestras de un material no tejido de fibras naturales compuestas de un gran porcentaje de musaceae*. Tesis de pregrado. Universidad de las Américas. Quito - Ecuador.
- Barcia, W. (2012). *Producción de la caña de Azúcar en el Ecuador*. Ámbito económico. Recuperado el 29 noviembre de 2017 de: <http://ambitoeconomico.blogspot.com/2012/10/produccion-de-la-cana-de-azucar-en-el.html>
- Bujosa textil. (2016). Fibras naturales. Los beneficios que aportan las fibras naturales. *Bujosa artesanía textil*. Recuperado el 29 noviembre de 2017 de: <http://www.bujosatextil.com/las-telas/fibras-naturales/>
- Castillo, J., Costa, A. (2012). *Características físicas de materiales absorbentes sonoros porosos*. Recuperado el 29 noviembre de 2017 de: <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0412E1-Castillo-Costa.pdf>
- Cenicaña. (2017). *El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia* [PDF file]. Recuperado el 1 diciembre de 2017 de: http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p3-394.pdf
- Cifuentes, R., León, R. y Porres, C. (2011). *Producción de abono orgánico a partir de cachaza y tallos de azúcar recuperados de la carretera*. Recuperado el 15 diciembre de 2017 de:

http://www.uvg.edu.gt/publicaciones/revista/volumenes/numero-23/REVISTA_23_pag_8-17.pdf

Cobrerros, C. (2008). *Uso de fibras vegetales procedentes de explotaciones agrícolas en la edificación sostenible*. Recuperado el 20 de diciembre 2017 de: <http://www.aie.upc.edu/maema/wp-content/uploads/2016/06/18-Carlos-Cobrerros-Rodriguez-Uso-de-fibras-vegetales-en-la-edificacion-sostenible.pdf>

Dosst-hosseini, K., Reza, H., y Elyasi, A. (2013). Correlation between sound absorption coefficients with physical and mechanical properties of insulation boards made from sugar cane bagasse. Recuperado el 20 de diciembre de 2017 de: http://www.academia.edu/10497766/Correlation_between_sound_absorption_coefficients_with_physical_and_mechanical_properties_of_insulation_boards_made_from_sugar_cane_bagasse

Ecured. (2017). Bagazo de caña. *EcuRed conocimiento con todos y para todos*. Recuperado de: https://www.ecured.cu/Bagazo_de_ca%C3%B1a

Elruido. (2017). Pérdida por transmisión. *Elruido.com*. Recuperado de: <http://www.elruido.com/portal/web/guest/perdida-por-transmision>

FAO. (1991) Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba. Cuba: *Deposito de documentos de la FAO*. Recuperado el 29 noviembre de 2017 de: <http://www.fao.org/docrep/T2363s/t2363s0n.html>

FAO. (2009). International of natural fibres. Roma. Recuperado el 30 noviembre 2017 de: <http://www.naturalfibres2009.org/es/index.html>

FAO. Statistical Yearbook. (2017). 1st ed. [ebook] Bangkok: FAO, p.90. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i3590e.pdf>

- García, M. (2010). Densidad relativa y densidad aparente de un material en polvo. Universidad de Almería. Almería - España. Recuperado el 7 diciembre de 2017 de: <https://w3.ual.es/~mjgarcia/practica2.pdf>
- Gerges, S. (1998). *Ruido: Fundamentos y control*. Brasil: Edeme.
- Gutiérrez, M. (2012). Interempresas. Alternativa de tratamiento de residuos orgánicos. Guipúzcoa: Interempresas.net. Recuperado el 8 diciembre de 2017 de: <http://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/103059-Alternativas-de-tratamiento-de-residuos-organicos.html>
- INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). Boletín situacional caña de azúcar. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Recuperado el 12 diciembre de 2017 de: http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/cultivo/2016/bol-etin_situacional_cana_azucar_2015.pdf
- ISO, UNE. 10534-2: 2002 Acústica. "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia", *parte, 2*, 10534-2.
- Jiménez, M. y Ochoa, G. (2014). *Reutilización del bagazo de la caña de azúcar, en la elaboración de tableros y su aplicación en paredes, pisos y cielos falsos*. Recuperado el 20 octubre de 2017 de: <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/11061>
- Martins, S., Mendesa, L., Da Silva, A., Blanco, J. y Akira, F. (2015). Acoustic characterization of sugarcane bagasse particleboard panels. Recuperado el 15 de octubre de 2017 de: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v18n4/1516-1439-mr-18-4-821.pdf>
- Mehdi, J., Masood, G., Alireza, A., y Ghanbar, E. (2016). Effect of ozone pretreatment on the physical and mechanical properties. Recuperado el 21 de octubre de 2017 de: <https://kundoc.com/pdf-effect-of-ozone->

pretreatment-on-the-physical-and-mechanical-properties-of-partic.html

- Medina, A., Valdivieso, R., Hernández, X., Zúñiga, F., y Suárez, A. (2012). Reutilización de residuos de tipo orgánico, en la elaboración de composites sostenibles y ecoeficientes. Recuperado el 15 de octubre de 2017 de: <http://docplayer.es/56536017-Reutilizacion-de-residuos-de-tipo-organico-en-la-elaboracion-de-composites-sostenibles-y-eco-eficientes-resumen.html>
- Othmani, C., Taktak, M., y Zein, A., Hentati, T., Elnady, T., Fakhfakh, T., y Haddar, M. (2016). *Experimental and theoretical investigation of the acoustic performance of sugarcane wastes based material*. Recuperado el 26 de octubre de 2017 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X16300214>
- Orduña, F. (2014). *Método para medición in-situ del coeficiente de absorción acústica de materiales utilizando un solo micrófono y deconvolución regularizada*. Recuperado el 10 de enero de 2018 de: <http://somi.ccadet.unam.mx/somi29/memoriassomi29/PDFS/Intrumentacion/24-XASOMI-36-24.pdf>
- Orti, C. (2014). *Medida del coeficiente de absorción acústica en agua*. Recuperado el 10 de enero de 2018 de: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/47268/TFG_Carlos%20Ort%C3%AD%20Angl%C3%A9s.pdf?sequence=1
- Putra, A., Abdullah, Y., Efendy, H., Farid, W., Ayob, M. y Sajidin.(2013). Utilizing sugarcane wasted fibers as a sustainable acoustic absorber. Recuperado el 15 de noviembre de 2017 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813002002>

Quiminet. (2017). Determine con precisión la porosidad de sus materiales. *QuiminiNet.com*. Recuperado el 30 noviembre 2017 de: <https://www.quiminet.com/articulos/determine-con-precision-la-porosidad-de-sus-materiales-3377637.htm>

Sancho, J., Llinares, J. y Llopis, A. (2008). *Acústica arquitectónica y urbanística*. México: Limusa.

Velasco, L., Goyos, L., Freire, L. e Ibarra A. (2015). Potencial de aprovechamiento de la biomasa vegetal como aislamiento en climas extremos del Ecuador. Recuperado el 18 de noviembre de 2017 de: <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/index.php/revista/article/view/76/80>

ANEXOS

ANEXO 1

TRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

1. Proceso de separación de la fibra de la corteza



2. Cortes de los trozos de la fibra del bagazo



3. Obtención de trozos de las fibras de bagazo



ANEXO 2

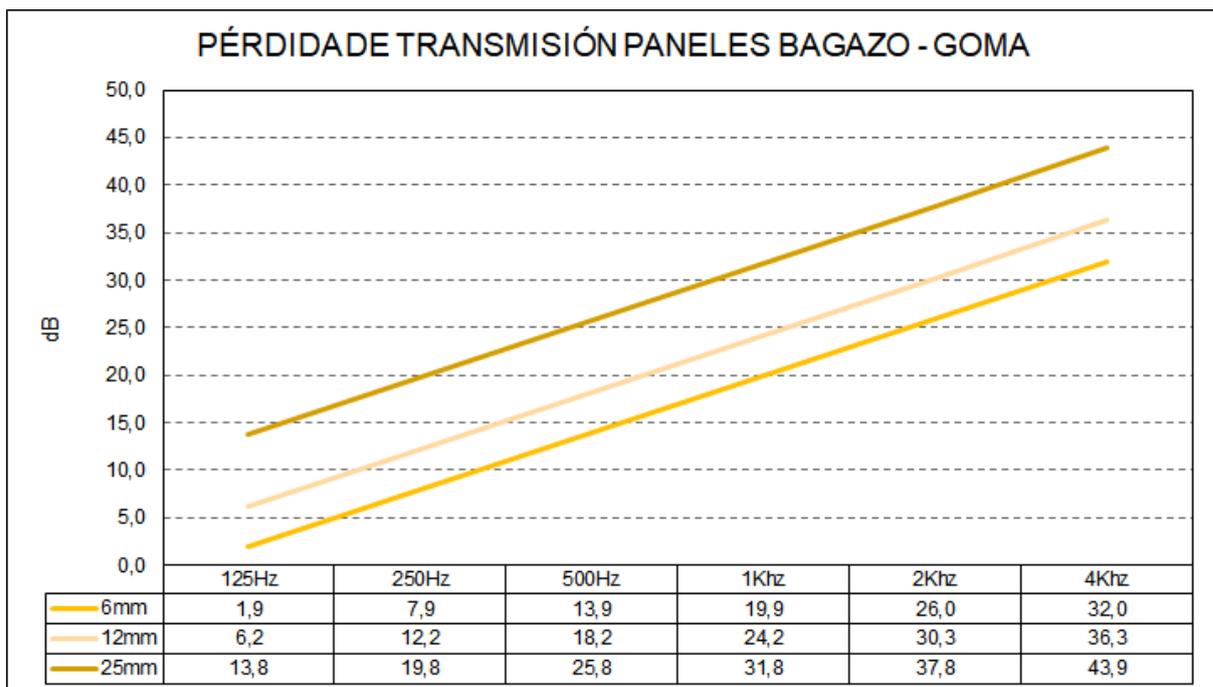
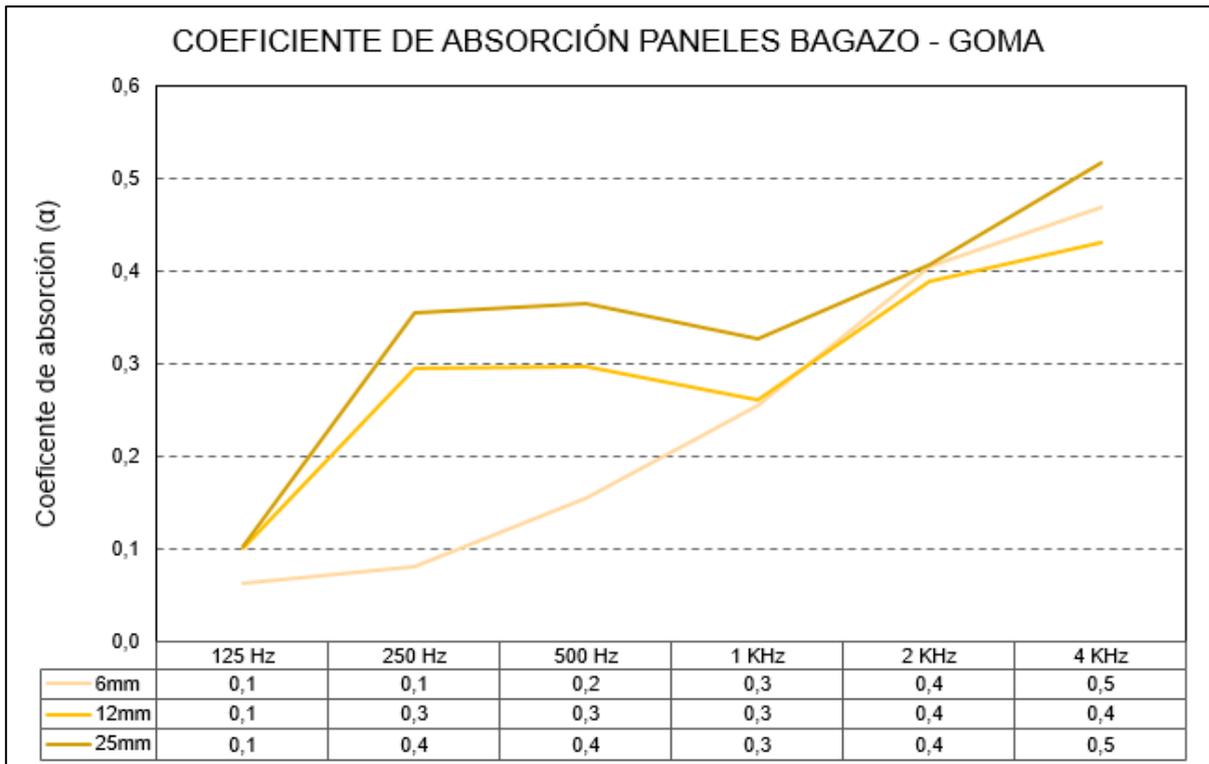
Elaboración de muestras de paneles de bagazo con distintos aglutinantes

1. Llenado de yeso en la tercera parte del molde



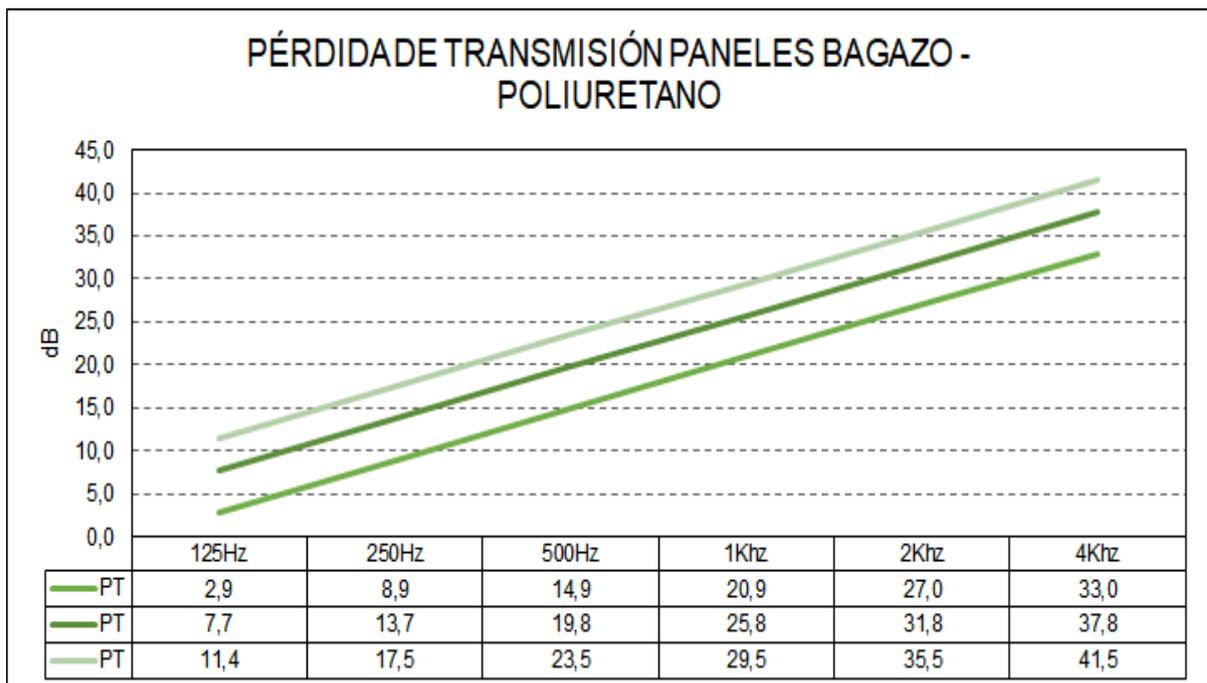
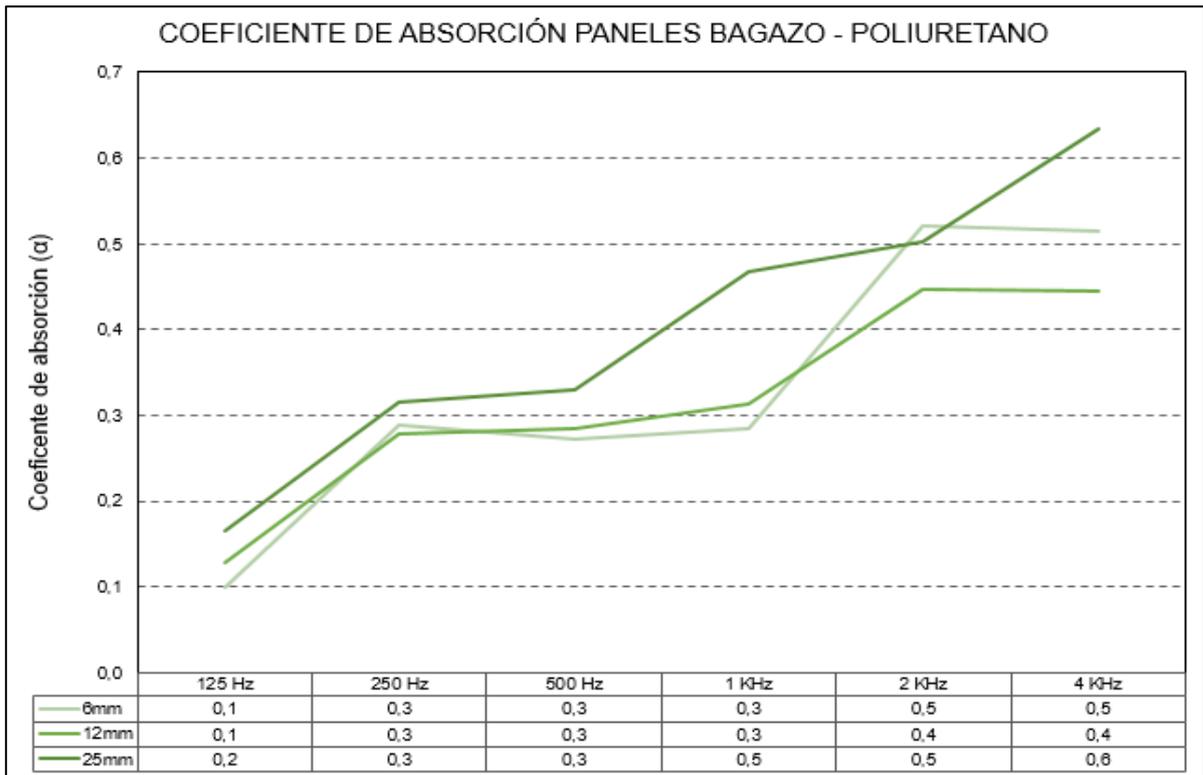
ANEXO 3

Ficha técnica panel Bagazo - Goma



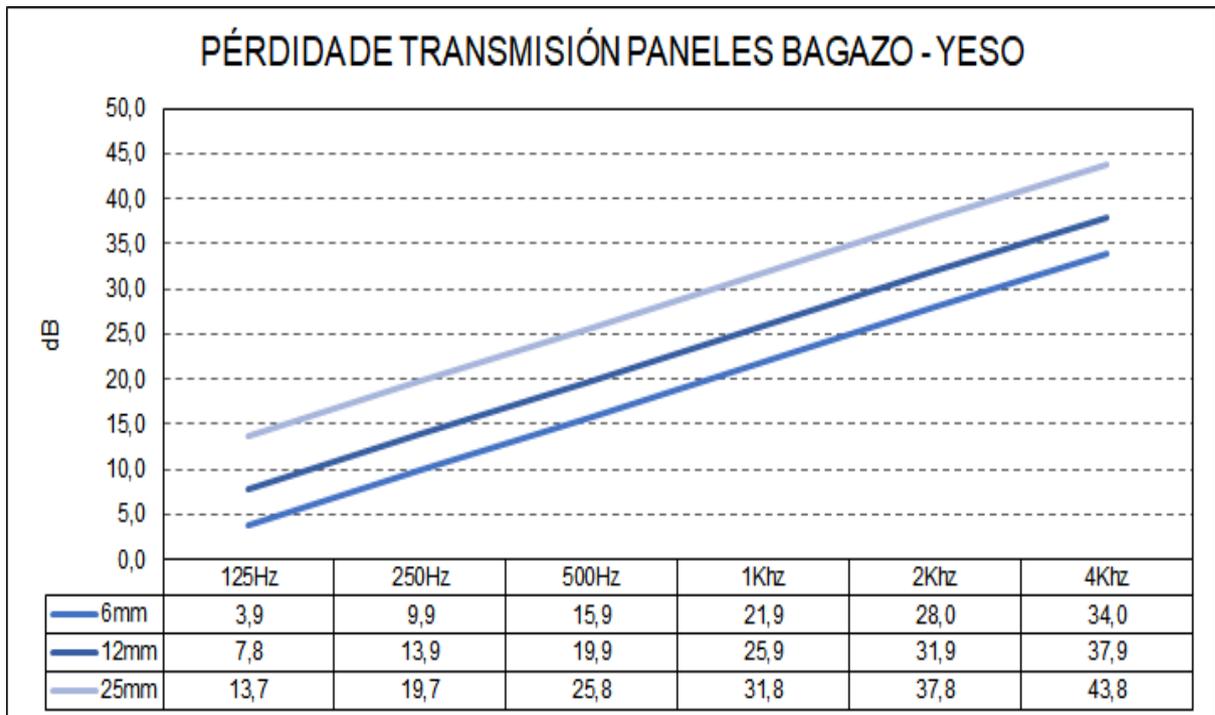
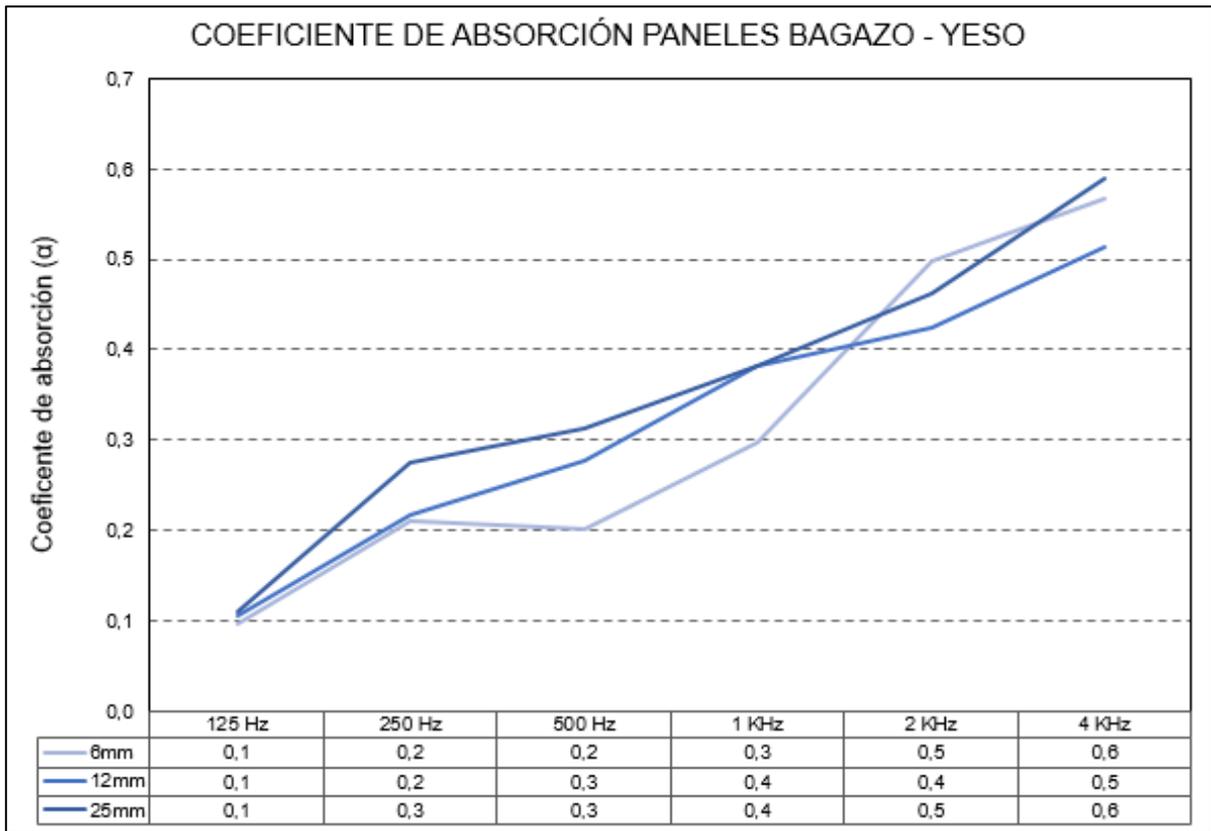
ANEXO 4

Ficha técnica panel Bagazo - Poliuretano



ANEXO 5

Ficha técnica panel Bagazo - Yeso



ANEXO 6

Ficha técnica panel Bagazo - Barro

