



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y TÉRMICA DE PANELES TIPO SÁNDUCHE OBTENIDOS A BASE DE RESIDUOS DE FIBRA DE COCO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

NICOLALDE SIMBAÑA KATHERYN VANESSA
katheryn.nicolalde@epn.edu.ec

REVELO RODRÍGUEZ ANA CECILIA
ana.revelo@epn.edu.ec

DIRECTOR:
VÍCTOR HUGO GUERRERO, Ph.D.
victor.guerrero@epn.edu.ec

Quito, agosto 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Katheryn Vanessa Nicolalde Simbaña y Ana Cecilia Revelo Rodríguez**, bajo mi supervisión.

Víctor Guerrero, Ph.D.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotras, Katheryn Vanessa Nicolalde Simbaña y Ana Cecilia Revelo Rodríguez, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Katheryn Vanessa Nicolalde S.

Ana Cecilia Revelo Rodríguez

DEDICATORIA

A mis padres, Renán y Rosa, por su infinito amor, paciencia y apoyo incondicional.

A mis hermanos, Andrés y Carlitos por estar allí en cada paso que doy con sus
ocurrencias.

Anita

A mis padres, Luisa y Humberto, porque ustedes son el motor de mi vida. Y a mi
pequeña, Alejandra, que es mi motivación para seguir.

Katty

AGRADECIMIENTO

Al culminar esta fase de mi vida agradezco a Dios por todas las bendiciones y alegrías recibidas. A mis queridos padres por apoyarme para alcanzar este objetivo, a mis hermanos y demás familiares que confiaron e hicieron de mí una mejor persona cada día. Este proyecto es resultado de un esfuerzo conjunto, por lo que agradezco a nuestro director Víctor Guerrero por sus acertadas sugerencias y a mi amiga Katheryn por el trabajo realizado. Finalmente, un eterno agradecimiento a la EPN, sus maestros y las amistades que en ella he formado.

Anita

Al alcanzar este momento de mi vida no puedo dejar de agradecer a Dios por todo lo logrado. A mis padres que día a día lucharon para darme lo mejor. A nuestro director Víctor Guerrero, que nos dio las directrices para culminar este proyecto. Y como no agradecer a mi amiga Anita, que gracias su empeño y determinación siempre nos impulsó a seguir. Gracias amigos, porque ustedes son el mejor recuerdo que me llevo de esta etapa de mi vida.

Katty

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Materiales lignocelulósicos.....	3
1.1.1. Composición de materiales lignocelulósicos.....	3
1.1.2. Pretratamientos para fibras lignocelulósicas.....	3
1.1.3. Fibras lignocelulósicas y partículas.....	4
1.1.4. Fibra de coco.....	5
1.2. Materiales compuestos con matriz polimérica.....	6
1.2.1. Matrices y refuerzos.....	6
1.2.2. Clasificación de materiales compuestos.....	7
1.2.3. Propiedades de los materiales compuestos.....	8
1.2.4. Tableros a base de residuo de coco.....	8
1.3. Paneles termoacústicos.....	13
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1. Procesos de fabricación.....	19
2.1.1. Obtención de la fibra de coco.....	19
2.1.2. Fabricación de tableros con polvillo de coco.....	22
2.1.3. Fabricación de no tejidos de fibra de coco.....	24
2.1.4. Ensamble de paneles tipo sánduche.....	25
2.2. Caracterización mecánica, térmica y acústica de paneles tipo sánduche y sus constituyentes.....	27
2.2.1. Ensayo para determinar densidad aparente.....	27
2.2.2. Ensayos de tracción y flexión.....	28
2.2.3. Ensayo de absorción de agua e incremento de espesor.....	29
2.2.4. Ensayo de dureza.....	30
2.2.5. Ensayo de resistencia última de tracción.....	31

2.2.6.	Ensayo para las propiedades de cizallamiento del núcleo de las estructuras sánduche mediante flexión	32
2.2.7.	Ensayo de conductividad térmica	32
2.2.8.	Ensayos de coeficiente de absorción acústica y pérdida de transmisión sonora.....	33
3.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
3.1.	Ensayos mecánicos de tableros a base de polvillo de coco	35
3.1.1.	Densidad aparente	35
3.1.2.	Ensayo de tracción	36
3.1.3.	Ensayo de flexión	37
3.1.4.	Ensayo de absorción de agua e incremento de espesor.....	38
3.1.5.	Ensayo de dureza.....	40
3.2.	Ensayos mecánicos de no tejidos de fibra de coco	41
3.2.1.	Densidad aparente de la fibra de coco.....	41
3.2.2.	Ensayo de resistencia última de tracción	42
3.3.	Evaluación mecánica de paneles tipo sánduche	43
3.3.1.	Ensayo de cizallamiento del núcleo en estructuras sánduche	43
3.4.	Ensayos térmicos de tableros a base de polvillo de coco, no tejido de fibra de coco y escayola.....	49
3.4.1.	Ensayo de conductividad térmica	49
3.4.2.	Resistencia térmica total para paneles tipo sánduche	49
3.5.	Ensayos acústicos de tableros a base de polvillo de coco	50
3.5.1.	Evaluación del coeficiente de absorción acústica para tablero de polvillo de coco	51
3.5.2.	Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para tablero de polvillo de coco	51
3.6.	Ensayos acústicos de no tejidos de fibra de coco	53
3.6.1.	Evaluación del coeficiente de absorción acústica para no tejido de fibra de coco	53
3.6.2.	Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para no tejido de fibra de coco	54
3.7.	Evaluación acústica de escayola.....	55
3.7.1.	Evaluación del coeficiente de absorción acústica para escayola	55
3.7.2.	Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para escayola	56
3.8.	Evaluación del coeficiente de absorción acústica para paneles tipo sánduche	57
3.8.1.	Panel tipo 1: núcleo de 15 mm	58
3.8.2.	Panel tipo 1: núcleo de 30 mm	59
3.8.3.	Panel tipo 1: núcleo de 45 mm	59

3.8.4.	Panel tipo 2: núcleo de 15 mm	61
3.8.5.	Panel tipo 2: núcleo de 30 mm	61
3.8.6.	Panel tipo 2: núcleo de 45 mm	62
3.9.	Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para paneles tipo sánduche	63
3.9.1.	Panel tipo 1: núcleo de 15 mm	63
3.9.2.	Panel tipo 1: núcleo de 30 mm	65
3.9.3.	Panel tipo 1: núcleo de 45 mm	66
3.9.4.	Panel tipo 2: núcleo de 15 mm	67
3.9.5.	Panel tipo 2: núcleo de 30 mm	69
3.9.6.	Panel tipo 2: núcleo de 45 mm	70
3.10.	Síntesis de resultados	72
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
4.1.	Conclusiones	77
4.2.	Recomendaciones	78
	Referencias Bibliográficas	80
	Anexos	82
	Anexo I.	82
	Anexo II.	86
	Anexo III.	87
	Anexo IV.	96
	Anexo V.	98
	Anexo VI.	99
	Anexo VIII.	103

Índice de tablas

Tabla 1.1. Clasificación de las fibras vegetales más comunes según su procedencia [11]	4
Tabla 1.2. Propiedades de tableros de madera prensada de coco, según norma IS15878 [18].	9
Tabla 1.3. Caracterización de propiedades para tableros de partículas de coco y durian [19].	11
Tabla 1.4. Comparación de propiedades para tableros de partículas de distinta naturaleza [19].	11
Tabla 1.5. Clasificación de tableros aglomerados [21].	12
Tabla 1.6. Esfuerzo de cizallamiento para diferentes muestras de núcleo de paneles sánduche a base de perlita y silicato de sodio [23].	16
Tabla 1.7. Característica técnica de panel sánduche acústico 80 mm.	16
Tabla 2.1. Ensayos mecánicos para los distintos tipos de materiales.	27
Tabla 3.1. Valores obtenidos en el ensayo de densidad aparente para el tablero de polvillo de coco.	35
Tabla 3.2. Valores obtenidos en el ensayo de tracción.	36
Tabla 3.3. Valores obtenidos en el ensayo de flexión.	37
Tabla 3.4. Medidas de pesos en muestra para ensayo de absorción de agua.	39
Tabla 3.5. Mediciones de espesor.	39
Tabla 3.6. Resultado de incremento de espesor.	40
Tabla 3.7. Resultado de contenido de humedad.	40
Tabla 3.8. Fuerza registrada en ensayo de dureza Janka.	41
Tabla 3.9. Valores obtenidos en el ensayo de densidad aparente para fibra de coco.	42
Tabla 3.10. Valores obtenidos en el ensayo tensión última, evaluación en dirección longitudinal.	42
Tabla 3.11. Valores obtenidos en el ensayo tensión última, evaluación en dirección transversal.	43
Tabla 3.12. Panel tipo 1.- Tablero de polvillo de coco y no tejido de fibra (15 mm núcleo).	44
Tabla 3.13. Panel tipo 1.- Tablero de polvillo de coco y no tejido de fibra (45 mm núcleo).	45
Tabla 3.14. Panel tipo 2.- Tablero de escayola y no tejido de fibra (15mm núcleo).	46
Tabla 3.15. Panel tipo 2.- Tablero de escayola y no tejido de fibra (45mm núcleo).	47

Tabla 3.16. Coeficiente de conductividad térmica para constituyentes de los paneles tipo sánduche.....	49
Tabla 3.17. Coeficiente de resistividad térmica para paneles tipo sánduche de núcleo espesor variable	50
Tabla 3.18. Coeficiente global de absorción acústica para tablero de polvillo de coco.....	51
Tabla 3.19. Pérdida de transmisión sonora para tablero de polvillo de coco en tercia de octavas.....	52
Tabla 3.20. Coeficiente global de absorción acústica para no tejido de coco	53
Tabla 3.21. Pérdida de transmisión sonora para no tejido de fibra de coco.	54
Tabla 3.22. Coeficiente global de absorción acústica para escayola.....	56
Tabla 3.23. Pérdida de transmisión sonora para escayola.....	56
Tabla 3.24. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 15 mm).	58
Tabla 3.25. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 30 mm).	59
Tabla 3.26. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 45 mm).	60
Tabla 3.27. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 15 mm).	61
Tabla 3.28. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 30 mm).	62
Tabla 3.29. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 45 mm).	63
Tabla 3.30. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 1 (núcleo 15 mm).....	64
Tabla 3.31. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 1 (núcleo 30 mm).....	65
Tabla 3.32. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 1 (núcleo 45 mm).....	66
Tabla 3.33. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 2 (núcleo 15 mm).....	68
Tabla 3.34. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 2 (núcleo 30 mm).....	69
Tabla 3.35. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 2 (núcleo 45 mm).....	70

Tabla 3.36. Comparación de resultados para ensayos mecánicos de tableros a base de polvillo de coco y escayola.	72
Tabla 3.37. Ensayo mecánico para paneles tipo sánduche.....	73
Tabla 3.38. Valores de conductividad térmica.....	74
Tabla 3.39. Resistencia térmica total para paneles tipo sánduche.....	75
Tabla 3.40. Resumen valores globales de caracterización acústica de distintos materiales.....	75
Tabla 3.41. Validación de caracterización mecánica, térmica y acústica para paneles sánduche tipo 1 y otros materiales.....	76

Índice de figuras

Figura 1.1. Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo.	7
Figura 1.2. Molino de martillos.	10
Figura 1.3. Panel tipo sánduche de tableros madera encalada con núcleo de poliestireno extruido.....	14
Figura 1.4. Panel tipo sánduche de chapas metálicas de Aluzinc con núcleo de poliuretano.....	14
Figura 2.1. a) Vista exterior de la desfibradora de coco. b) Vista interna, aspas de corte.	20
Figura 2.2. Molino de cuchillas. a) Vista Externa, b) Vista interna, cuchillas.	20
Figura 2.3. Tamizadora.....	21
Figura 2.4. Fibra de coco.	21
Figura 2.5. Polvillo grueso de coco, tamices normalizados ASTM E11 No.10 y No.30.....	22
Figura 2.6. Polvillo fino de coco, tamices normalizados ASTM E11 No.60 y No.100.....	22
Figura 2.7. Componentes de la resina UF empleada en el moldeo.	23
Figura 2.8. Moldeo manual de la mezcla polvillo de coco y urea UF.	23
Figura 2.9. Tablero de polvillo de coco de 1 cm de espesor.....	24
Figura 2.10. Moldeo manual de no tejido de coco.....	24
Figura 2.11. Aspersión de látex a las caras del no tejido.	25
Figura 2.12. Desmolde del no tejido.....	25
Figura 2.13. Conformación de panel sánduche tipo 1, constituido por tableros de coco y núcleo de no tejido de fibra de la misma naturaleza.	26
Figura 2.14. Panel sánduche tipo 1 con soporte metálico.	26
Figura 2.15. Panel sánduche tipo 2 con soporte metálico.	26
Figura 2.16. Balanza analítica.....	28
Figura 2.17. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen, modelo H25KS.....	29
Figura 2.18. Ensayo Janka.	31
Figura 2.19. Ensayo de esfuerzo ultimo de tracción para no tejido de fibra de coco.	31
Figura 2.20. Ensayo de flexión a tres puntos para panel sánduche tipo 2 con núcleo de 15 mm.	32
Figura 2.21. Medidor de conductividad térmica de placa caliente, Lambda-Messtechnik, modelo λ -Meter EP500e, Versión C.	33
Figura 2.22. Tubo de impedancia ACUPRO.	34
Figura 3.1. Probetas ensayadas a tracción de tableros con 30 % de UF y 2,82 MPa de presión.....	37

Figura 3.2. Probetas ensayadas a flexión de tableros con 30 % de UF y 2,82 MPa de presión.....	38
Figura 3.3. Muestra de tablero sumergido en agua.....	39
Figura 3.4. Probeta para ensayo de dureza Janka.....	41
Figura 3.5. Muestras de panel tipo 1 (15 mm de núcleo) ensayadas.....	44
Figura 3.6. Muestras de panel tipo 1 (45 mm de núcleo) previo al ensayo.....	45
Figura 3.7. Muestras de panel tipo 1 (45 mm de núcleo) ensayadas, se aprecia fisura....	46
Figura 3.8. a) Muestras de panel tipo 2 (15 mm de núcleo) ensayadas. b) Fractura en cara perpendicular a la carga.	47
Figura 3.9. a) Muestras de panel tipo 2 (45 mm de núcleo) ensayadas. b) Fractura.	48
Figura 3.10. Muestras de tablero de polvillo de coco.	51
Figura 3.11. Frecuencia vs. pérdida de transmisión sonora para el tablero de polvillo de coco	52
Figura 3.12. Muestras de no tejido de fibra de coco.....	53
Figura 3.13. Frecuencia vs. pérdida de transmisión sonora, No tejido de fibra de coco ...	55
Figura 3.14. Muestras de escayola.	55
Figura 3.15. Frecuencia vs. pérdida de transmisión sonora, Escayola.....	57
Figura 3.16. Muestras de panel tipo 1.....	58
Figura 3.17. Muestras de panel tipo 1 con núcleo de 15 mm.	58
Figura 3.18. Muestras de panel tipo 1 con núcleo de 30 mm.	59
Figura 3.19. Muestras de panel tipo 1 con núcleo de 45 mm.	60
Figura 3.20. Muestras de panel tipo 2.....	60
Figura 3.21. Muestras de panel tipo 2 con núcleo de 15 mm.	61
Figura 3.22. Muestras de panel tipo 2 con núcleo de 30 mm.	62
Figura 3.23. Muestras de panel tipo 2 con núcleo de 45 mm.	62
Figura 3.24. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 1 (Núcleo 15 mm).....	64
Figura 3.25. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 1 (Núcleo 30 mm).....	66
Figura 3.26. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 1 (Núcleo 45 mm).....	67
Figura 3.27. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 2 (Núcleo 15 mm).....	68
Figura 3.28. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 2 (Núcleo 30 mm).....	70
Figura 3.29. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 2 (Núcleo 45 mm).....	71
Figura 3.30. Curva esfuerzo vs deformación del tablero de polvillo de coco con 30% de resina UF.....	73
Figura 3.31. Curva esfuerzo vs deformación del tablero de polvillo de coco con 30% de resina UF.....	74

RESUMEN

Ante la inminente necesidad de disminuir la acumulación de residuos sólidos de origen vegetal, y contribuir al desarrollo de nuevos materiales como aislantes termoacústicos, el presente estudio tiene como finalidad caracterizar de forma mecánica y térmica paneles tipo sánduche y sus constituyentes obtenidos a partir de residuos de fibra de coco. Además, se realizó la caracterización acústica de los distintos materiales, como son: los tableros sólidos a base de polvillo de coco y resina urea formaldehído (UF), estructuras de no tejido de fibra de coco con látex natural y paneles tipo sánduche de espesor variable con núcleos de material no tejido fibra de coco y soporte de tableros de polvillo o escayola. Para ello se desarrolló el trabajo de forma experimental desde la fase de obtención de materia prima de manera mecánica, preparación de tableros y no tejidos, así como el ensamblaje de paneles tipo sánduche. Para los tableros se realizó evaluaciones previas donde los parámetros como tiempo y temperatura de procesamiento fueron constantes, pero las concentraciones másicas de resina y presión variaron hasta alcanzar la combinación de 30 % UF y 2,82 MPa como la de mejores resultados a nivel mecánico y aspecto visual. A nivel térmico y acústico, los paneles constituidos por tableros de polvillo de coco y núcleo de 45 mm brindan mejores prestaciones puesto que alcanzan una resistividad térmica de 1,479 m²K/W y una disminución de 49 dB. Esto les confiere características semejantes a las de materiales aislantes disponibles en el mercado que en su mayoría son de origen petroquímico. Estos resultados, evidencian el alto potencial que tienen estos productos ecoamigables. De manera que, se podría continuar el estudio de este tipo de productos para buscar aplicaciones innovadoras.

Palabras clave: conductividad térmica, no tejido de fibra, panel tipo sánduche, pérdida de transmisión, tableros de polvillo de coco, urea formaldehído, aislante termoacústico.

ABSTRACT

To satisfy the necessity of reducing the vegetal origin solid wastes and the development of novel materials thermo-acoustic isolations, this work characterizes the mechanic and thermal properties of coconut fiber flat sandwich panels, and its components. Furthermore, it is performed the acoustic characterization of diverse materials such as: UF resin compact boards reinforced with coconut powder, coconut nonwoven structures and natural latex, and sandwich panels of variable thickness made with nonwoven coconut fiber cores and powder or plaster board laminae. With this purpose, this work has an experimental focus involving the process of mechanical extraction from raw materials, the construction of boards and nonwovens, as well as the assembly of sandwich panels. A parametric study was performed for the board manufacturing process. In this study, the time and temperature processing conditions were fixed, and the resin mass fraction and pressure were changed the optimal combination of 30 % UF and 2,82 MPa was found, which resulted in the best mechanical properties and appearance. The sandwich panel with coconut powder boards and a 45 mm thickness core provides the best performance for thermal and acoustic isolation with a thermal resistivity of 1,478 m²K/W and an acoustic reduction of 49 dB. These properties compete with those of petrochemical insulating materials and prove the efficiency of this eco-friendly alternative. These results also show the possibility of continuing this study aiming at innovative applications for these products.

Keywords: coconut powder board, fiber nonwoven, sandwich panel, thermal conductivity, transmission loss, urea formaldehyde, thermoacoustic insulation.

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y TÉRMICA DE PANELES TIPO SÁNDUCHE OBTENIDOS A BASE DE RESIDUOS DE FIBRA DE COCO

INTRODUCCIÓN

La innovación en todos los ámbitos de la industria va de la mano con el crecimiento tecnológico, pero a su vez se apuesta cada vez más en propuestas que sean orientadas a la preservación y cuidado ambiental. El campo de la construcción es uno de los muchos donde se plantean propuestas para que se reemplacen materiales “tradicionales” por materiales compuestos, es decir, una matriz y un refuerzo, de manera que se satisfagan las necesidades actuales de los usuarios. La preocupación por encontrar materiales más resistentes y que aporten comodidad y confortabilidad ha llevado a investigadores a inclinarse por el uso de refuerzos, ya sean naturales como las fibras vegetales o animales, o sintéticos como las fibras de carbono. Este sector de la industria emplea ampliamente paneles tipo sánduche que se consideran materiales compuestos para la insonorización y climatización de oficinas, departamentos y estancias varias.

En el mercado existen materiales termoacústicos que se emplean en el acondicionamiento de viviendas, los materiales más empleados son la lana de vidrio, espumas poliuretánicas y la lana de roca, donde su mayor ventaja es que son materiales no inflamables y de fácil aplicación. Sin embargo, mayormente los materiales termoacústicos provienen de procesos petroquímicos que durante su producción requieren alto consumo de energía, y durante su utilización y desecho producen altos niveles de contaminación. Actualmente, se busca la utilización de materiales lignocelulósicos con prestaciones térmicas y acústicas efectivas, como: césped, partículas de madera, cascarilla de arroz, entre otros; que se consideran desecho. Desde este punto de vista, tomar materiales que comúnmente podrían ser desechados y reutilizarlos para diversas aplicaciones sería el fin óptimo de los materiales.

Hoy en día la comercialización de productos en base de coco ha cobrado mayor fuerza, considerando que mayormente se utiliza el endospermo comúnmente conocido como pulpa; el bonote o cáscara exterior es considerado desecho que en el mejor de los casos es empleado como abono agrícola (tela de embalaje, cepillos, felpudos, tapices, colchones) e ignorando sus características como aislante térmico y acústico.

En nuestro país por su privilegiada ubicación geográfica los cultivos de coco en la región litoral van en aumento, alcanzándose una producción promedio anual de nuez de coco de 23 990 toneladas entre 2012 y 2016¹.

En este trabajo se plantea aprovechar los residuos vegetales provenientes del fruto del cocotero para emplearlos como refuerzos en materiales compuestos, puesto que no existe a nivel de país entidad alguna que lo procese industrialmente, motivo por el cual este material se considera como una potencial base para la elaboración de múltiples productos. Se elaboraron paneles tipo sánduche constituidos por tableros de polvillo de coco y escayola, en ambos casos el núcleo está conformado por no tejido de fibra de coco aglutinada con látex. Por lo que se evaluaron las características mecánicas y térmicas de los paneles y sus componentes individuales mediante el método experimental, puesto que se puede controlar las variables para delimitar relaciones entre ellas, con la finalidad de recopilar datos que permitan comparar mediciones. Además, se compararon los resultados obtenidos con el desempeño que presentan paneles tipo sánduche comúnmente comercializados hoy en día y empleados en la insonorización y climatización de oficinas, casas o departamentos, puesto que existe una demanda inminente de este tipo de productos en Ecuador.

Objetivo general

Caracterizar de forma mecánica y térmica paneles tipo sánduche y sus constituyentes obtenidos a partir de residuos de fibra de coco.

Objetivos específicos

- Obtener estructuras de no tejidos de fibra de coco aglutinados con látex.
- Obtener tableros de material compuesto con una matriz de urea formaldehído y polvillo de coco.
- Desarrollar paneles tipo sánduche conformados por no tejido, tableros de compuesto y placas de escayola.
- Realizar ensayos para caracterizar mecánica y térmicamente los paneles y tableros previamente elaborados.

¹ FAO. Disponible: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos dominan la mayoría de los ecosistemas naturales y se manejan ampliamente como fuentes de madera y forraje animal [1]. Están constituidos en su mayoría por tres biopolímeros, hemicelulosa, celulosa y lignina, de estos, los dos últimos son los más abundantes en el mundo vegetal. La celulosa es el componente mayoritario en los materiales lignocelulósicos y es la base estructural de las células vegetales que actualmente se emplea para muchos productos por su interés industrial (papel, fibras, aditivos, etc.) [2]. Es así, que las fibras vegetales pueden considerarse como compuestos de fibrillas de celulosa cohesionadas por una matriz constituida de lignina y hemicelulosa.

1.1.1. Composición de materiales lignocelulósicos

- **Celulosa.-** Es un biopolímero lineal compuesto por unidades de glucosa y conformado por enlaces internos de puentes de hidrógeno que le otorgan una estructura altamente cristalina. Esto, influye en su morfología, rigidez, orientación, resistencia y reactividad. La principal aplicación de la celulosa es en la industria del papel, donde se trabaja con celulosas de fibra larga y fibra corta. Esta diferencia influye de manera particular en la resistencia del material, y depende básicamente de las uniones moleculares que se establecen entre las fibras [3].
- **Hemicelulosa.-** Es un polisacárido, es decir una agrupación de azúcares. Constituye el segundo componente mayoritario de la pared celular de las células vegetales, puesto que comprenden alrededor del 30-35 % del peso seco de la misma. Su función es brindar resistencia [4].
- **Lignina.-** Después de los polisacáridos, es el biopolímero ramificado más abundante del reino vegetal [5]. Cumple con la función de dar soporte estructural a la célula vegetal. Además, brinda impermeabilidad y resistencia a ataques microbianos. En las fibras es el elemento aglomerante [6].

1.1.2. Pretratamientos para fibras lignocelulósicas

Para muchas aplicaciones, y sobre todo para que las fibras sean compatibles con los materiales con los cuales se van a combinar, estas son sometidas a pretratamientos que

modifican sus propiedades tanto físicas como químicas. Por ejemplo, se modifica el grado de polimerización, el estado cristalino de la celulosa o se busca eliminar la lignina de la fibra [7].

Algunas técnicas de modificación química de la fibra incluyen tratamientos de acetilación, mercerización, benzoilación, así como con plasma, ozono e injerto, clorito de sodio, metacrilato, isocianato, silano, peróxido de dicumilo [8]. También existen pretratamientos mecánicos, como el molido de fibras para homogenizar su tamaño, empleando molinos de cuchillas [9]. Para eliminar todo rastro de polvo u otros agentes presentes en la fibra se utilizan lavados con agua desmineralizada, para ello se cumplen ciclos de remojo y secado, a 80°C por 24 horas en una estufa o a cielo abierto si las condiciones ambientales son favorables [6].

1.1.3. Fibras lignocelulósicas y partículas

Las fibras vegetales pueden clasificarse en función de la parte de la planta de la cual fueron extraídas: del tronco o tallo, de la hoja y del fruto o la semilla [10]. En la Tabla 1.1 se presentan algunos ejemplos de cada categoría, así como su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Tabla 1.1. Clasificación de las fibras vegetales más comunes según su procedencia [11].

Procedencia	Nombre Comercial	Celulosa [% peso]	Hemicelulosa [% peso]	Lignina [% peso]
Del tronco o tallo	Lino	71,2	18,6 - 20,6	2,2
	Cáñamo	70,0 - 74,9	17,9 - 22,4	3,7 - 5,7
	Yute	61,0 - 71,5	13,6 - 20,4	8,1 - 13
	Kenaf	45,0 - 57,0	21,5	8,0 - 13,0
	Ramio	68,6 - 76,2	13,1 - 16,7	0,6 - 0,7
De las hojas	Abacá	63,0 - 70,1	20,0 - 21,8	5,7 - 6,0
	Henequén	77,6	4,0 - 8,0	13,1
	Sisal	67,0- 78,0	21,0 - 21,8	5,7 - 6,0
De semillas y frutos	Algodón	82,7 - 92,9	2,6 - 5,7	-
	Miraguano	64,0	23,0	13,0
	Coco	32,0 - 43,0	0,15 - 0,25	40,0 - 45,0
Otras	Plátano	63,0 - 64,0	10,0	5,0
	Bambú	35,0 - 60,8	15,0	27,0 - 32,2

(Fuente: Páez)

Muchas de estas fibras han sido estudiadas como materias primas para la fabricación de refuerzos de materiales compuestos, consolidándose como materiales alternativos y sustitutivos de fibras sintéticas provenientes de procesos petroquímicos.

Otros materiales utilizados como refuerzos de materiales compuestos son las partículas. Se consideran por su tamaño, partículas grandes en donde las interacciones matriz-partícula no se pueden describir a nivel atómico-molecular, o consolidados por dispersión con diámetros entre 10 y 100 nm [12]. Generalmente las partículas de tamaño grande son utilizadas con matrices metálicas, poliméricas y cerámicas. Las partículas permiten obtener mayor isotropía de propiedades que al emplear fibras [13].

1.1.4. Fibra de coco

Una vez cosechado, el coco entero se separa en nuez y la cubierta fibrosa exterior, también conocida como bonote. En el interior de la nuez se encuentra la pulpa o, endospermo que se usa directamente como comestible o se procesa en productos alimenticios o cosméticos [14]. La cáscara va a los molinos donde se extrae la fibra de coco, generalmente se aprovecha alrededor de un tercio de esta como fibra, el material restante constituye residuos que se denominan, médula de bonote, este es un subproducto de la industria de procesamiento de bonote con un alto contenido de lignina (30-31 %) y celulosa (26,8 %)².

Pocas plantas tienen aplicaciones tan variadas como la planta de coco. En Ecuador, por su privilegiada ubicación geográfica, este tipo de cultivos van en expansión; según el Censo Nacional Agropecuario, la mayoría de cultivos de palmeras de esta fruta se encuentran en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas y Loja. De estas, la de mayor producción es Esmeraldas, con un número de hectáreas que representan el 77,26 % del total nacional, seguida de Manabí, con el 18,72 %³. En la “Provincia Verde”, las plantaciones de coco se concentran en el norte, en los cantones fronterizos de Eloy Alfaro y San Lorenzo del Pailón. En estas dos localidades existen 4 011 hectáreas destinadas a esta actividad, y constituyen el mayor pilar de la producción y ventas anuales que se registran en toda la provincia. Entre los años 2012 y 2016 a nivel nacional se produjo en promedio 23 990 toneladas anuales de nuez de coco⁴.

El principal uso de la nuez de coco a nivel nacional es como alimento, aprovechándose la pulpa y el agua de coco. Las exportaciones de coco en el 2016 alcanzaron el 12 % del total de exportación de fruta, los principales países de destino fueron España, Estados Unidos

² COIR BOARD. Disponible: <http://coirboard.gov.in/>

³ INEC, “Censo Nacional Agropecuario | Instituto Nacional de Estadística y Censos,” 2016.

⁴ FAO. Disponible: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.

y las Antillas Holandesas. El bonote generalmente se lo considera desecho, a pesar de que estudios han demostrado que posee propiedades interesantes como para convertirse en un material con potenciales aplicaciones para elaboración de múltiples artículos como esteras, colchones, tapices, cuerdas, alfombras, brochas, maderas y geotextiles. En el Ecuador no existe entidad alguna que lo procese industrialmente para generar productos de elevado valor agregado.

1.2. Materiales compuestos con matriz polimérica

Los materiales compuestos son aquellos constituidos por dos o más fases distintas cuya combinación proporciona propiedades diferentes a las de sus componentes. Los constituyentes de un material compuesto son: matriz y refuerzo, mientras que la superficie de conexión entre estos se conoce como interfaz. Es posible mejorar la superficie de la interfaz al adicionar agentes de acoplamiento, relleno y revestimiento, sin verse afectadas las propiedades del material.

A este tipo de materiales se los puede diferenciar según el tipo de matriz: cerámica, metálica o polimérica. Los materiales compuestos de matriz polimérica pueden ser reforzados con fibras. De manera general, se requiere una buena interfaz, puesto que una fuerte unión del refuerzo a la matriz garantiza que las cargas aplicadas sobre el material se transmitan desde la matriz hacia el refuerzo, sin que este se desagregue.

1.2.1. Matrices y refuerzos

El material empleado como matriz brinda las propiedades físicas, mecánicas, químicas y eléctricas del compuesto. El empleo de matriz polimérica presenta algunas ventajas frente al empleo de otro tipo de matrices debido a su baja densidad, excelentes prestaciones a temperatura ambiente, facilidad de procesamiento y costos relativamente bajos. Las matrices poliméricas pueden ser de tres tipos:

- **Termoplásticas.-** A temperaturas relativamente altas pasan al estado líquido y se endurecen en un estado de transición vítrea cuando se han enfriado, permitiendo así el reciclaje de estos materiales, de acuerdo a su historial térmico las propiedades disminuyen. El polipropileno (PP), polietileno (PE) y policloruro de vinilo (PVC) son comúnmente empleados como matriz termoplástica.

- **Termofijas.-** También conocidas como matrices termoestables, se caracterizan por no fundirse al calentarse sino por iniciar un proceso de degradación lo que limita su reutilización. Algunos ejemplos son la resina epoxy, poliéster y fenol formaldehído.
- **Elastoméricas.-** Se caracterizan por su capacidad de estirarse hasta seis veces su longitud original, y presentar módulos de elasticidad bajos. El látex pertenece a este tipo de matrices.

Por otro lado, el refuerzo es el responsable de soportar las cargas y magnificar propiedades del material compuesto, se puede emplear partículas y fibras, tanto de origen natural como sintético.

1.2.2. Clasificación de materiales compuestos

De manera general, Callister clasifica a los materiales compuestos según el tipo de matriz y de acuerdo al tipo de refuerzo [15]. Por el tipo de matriz, como se mencionó anteriormente, un material compuesto puede tener matriz metálica, cerámica y polimérica. La clasificación de acuerdo al tipo de refuerzo se muestra en la Figura 1.1.

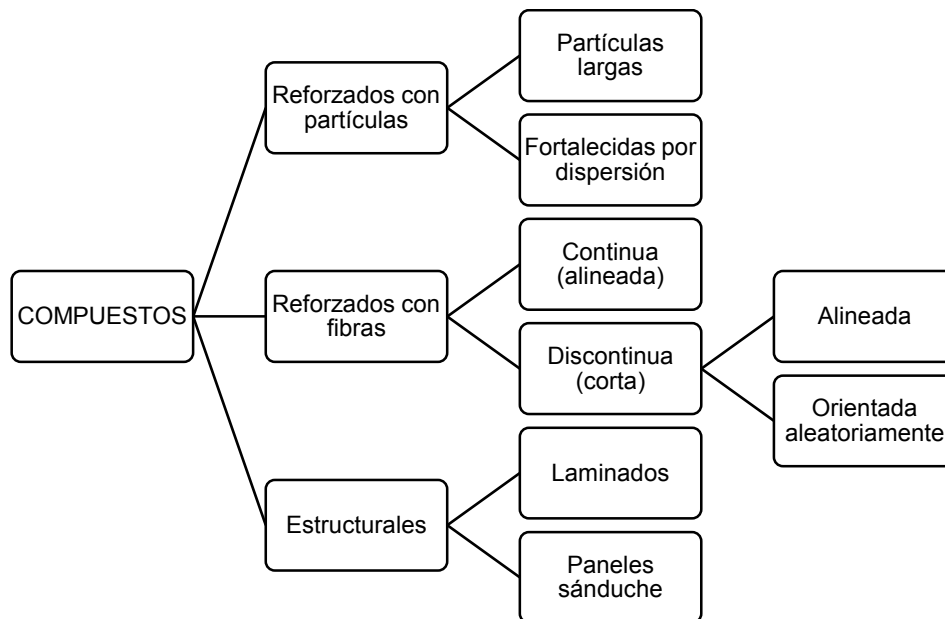


Figura 1.1. Clasificación de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo.

(Fuente: Callister)

Los materiales estructurales de interés para el presente estudio son los de tipo sánduche, y son aquellos que tienen capas delgadas de material de recubrimiento unidas por un material ligero de relleno. Ni el relleno, ni las capas externas son resistentes por si solos, de manera que las propiedades mejoran cuando se los configura como paneles compuestos. Una de las características que se busca en los paneles tipo sánduche es el aislamiento térmico y acústico.

1.2.3. Propiedades de los materiales compuestos

Las estructuras ingenieriles están sometidas a cargas mecánicas y térmicas, por lo que sobre las mismas se inducen esfuerzos y deformaciones. Inicialmente se debe entender el comportamiento de los materiales que constituyen el compuesto, sus proporciones, distribución, entre otros factores que permitan definir la aplicabilidad del producto. Para obtener las propiedades mecánicas deseables en un material compuesto, la carga aplicada debe ser transferida de manera efectiva de la matriz hacia el refuerzo a través de la interfaz.

Si el refuerzo empleado es particulado es recomendable que la geometría y distribución sobre la matriz sea uniforme, para ello es necesario definir la fracción volumétrica en la mezcla lo que define el comportamiento elástico del material mediante la “regla de las mezclas” (ver Anexo I.). Generalmente, se emplea partículas para mantener buenas propiedades a altas temperaturas y por largos periodos de tiempo, reduciéndose las contracciones post moldeo, además de incrementarse la dureza y resistencia a la compresión. Cabe señalar que la introducción de las partículas a la matriz se efectúa de forma mecánica [16].

Por otro lado, si el material compuesto es reforzado con fibra típicamente presentan un comportamiento anisotrópico, es decir, que sus propiedades varían de acuerdo al eje geométrico en el cual fueron determinadas. Los factores que influyen en las propiedades de un material compuesto reforzado con fibra son: tamaño, forma, orientación y concentración de la fibra.

1.2.4. Tableros a base de residuo de coco

Los tableros a base de residuo de coco se consideran un material compuesto porque combinan las partículas obtenidas de la médula del bonote de esta fruta con alguna resina termoestable, generalmente de tipo formaldehído que cumple con la función de ser la

matriz del material compuesto. Múltiples estudios y trabajos investigativos muestran los alcances al elaborar tableros a base del bonote de coco como se describe a continuación y representan datos de referencia para este trabajo.

El Central Institute of Coir Technology, Bangalore, en 2010 desarrolló la tecnología para la manufactura de tableros de madera prensada de coco con densidades mayores a 800 kg/m³ y espesores que van desde 1,5 a 12 mm, los cuales son fabricados con 600 g/m² de bonote de coco, 60 g/m² de fibra de yute, 40 g/m² de papel, el adhesivo empleado es cualquier resina sintética fenólica o aminoplástica que se confirme en la norma hindú IS848 [17]. El reporte de la caracterización del producto se registra en la norma hindú IS15878 [18] como se indica en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Propiedades de tableros de madera prensada de coco, según norma IS15878 [18].

Propiedad	Número de muestras	Muestras	Valores
Densidad [kg/m ³]	2	Cuadradas de 100 ± 1 mm	≥ 800
Espesores y tolerancias [mm]			1,5 ± 0,4 2,0 ± 0,4 3,0 ± 0,4 4,0 ± 0,5 6,0 ± 0,5 8,0 ± 0,7 10,0 ± 0,7 12,0 ± 0,9
Contenido de humedad [%]	2	Cuadradas de 100 ± 1 mm	5-15
Incremento de espesor luego de 24 h de inmersión, máx. [%]	3	Cuadradas de 50 mm	5
Resistencia a la tracción paralelo a la superficie, mín. [MPa]	3	25 x 200 mm Velocidad: 20 mm/min	0,25
Módulo de rotura, mín. [MPa]	4	Longitud:25(espesor)+50 mm Ancho: 75 mm	50

Tabla 1.2. Continuación

Módulo de elasticidad, [MPa]	de mín.		Velocidad: 30 ± 3 mm/min	4 000
Resistencia a la tracción perpendicular a la superficie, mín. [MPa]				25

(Fuente: Norma IS15878)

El Programa de Gestión en Ingeniería y el Centro de Investigación Científica de Tailandia en 2004 publicaron la investigación realizada referente a “*Nuevos tableros de partículas para aislamiento de bajo costo a partir de la fibra de coco y cáscara durian*” [19], el objetivo fue determinar la relación apropiada entre estos dos productos para mejorar las propiedades de los tableros de partículas.

La obtención de materia prima involucró algunas fases:

1. Reducción de las cáscaras de durian a piezas de tamaño pequeño de 1x2 cm² aproximadamente. Mientras tanto se desfibra el coco por acción mecánica.
2. Los productos cortados se secaron durante 8 horas en un horno a 80 °C, para posteriormente ser triturados por acción del molino de martillos.



Figura 1.2. Molino de martillos.

(Fuente: <http://maquinariapulvex.com>)

3. Para garantizar un diámetro uniforme (1 mm) de las fibras se procede al tamizado, reduciendo así los excesos de fibra corta. Y el proceso de secado continúa por 24 horas a 103,5 °C con el objetivo de alcanzar un contenido de humedad de 7 % y 9 %, para las partículas de coco y durian, respectivamente.

La elaboración de tableros requirió:

1. Calcular la masa de partículas necesaria para un tablero con dimensiones 350x350 mm y 10 mm de espesor, por lo cual se planteó un set de ensayo con 5 variables de concentración en peso de 10:90, 25:75, 50:50; 75:25: 90:10 de partículas de cáscara de durian y fibra de coco, respectivamente.
2. El adhesivo fue urea formaldehído al 12 % y una emulsión de cera parafina al 1%, que se pulverizó uniformemente en un tambor giratorio con una insuflación de aire sobre las partículas.
3. La mezcla se moldeó de forma manual e inició el proceso de prensado a 160 °C durante 10 minutos y una presión aplicada de 980, 1 470 y 7 845 kPa.

La evaluación de resultados para este tipo de materiales se resume en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Caracterización de propiedades para tableros de partículas de coco y durian [19].

Densidad [kg/m ³]	Coco:Durian [%,peso]	Contenido de humedad [%]	Incremento de espesor [%]	MOR* [MPa]	MOE** [MPa]	Conductividad térmica [W/mK]
311	10:90	9,47	16,81	0,69	83,84	0,0748
	90:10	8,31	5,67	5,15	210,74	0,0756
856	10:90	7,45	26,79	18,09	1 417,25	0,1327
	90:10	6,22	10,25	43,19	2 126,77	0,1342

*Módulo de ruptura

**Módulo de elasticidad

(Fuente: Khedari)

La investigación experimental indica que las propiedades óptimas del tablero de partículas se obtuvieron con una mezcla de 90:10 (fibra de coco y cáscara de durian en peso), con 10 mm de espesor y 856 kg/m³ de densidad. Al comparar con materiales similares se presentaron los resultados mostrados en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Comparación de propiedades para tableros de partículas de distinta naturaleza [19].

Propiedades	Tablero de partículas de durian	Tablero de fibra de coco	MDF comercial de madera plástica	Tablero de partículas coco-durian (90:10)
Densidad [kg/m ³]	860	648	780	856
Contenido de humedad [%]	8,92	7,51	8,00	6,22

Tabla 1.4. Continuación

Incremento de espesor [%]	30,65	53,35	13,00	10,50
MOR [MPa]	24,70	25,56	42,25	43,21
MOE [MPa]	3 704,35	2 860,21	4 299,00	2 127,49

(Fuente: Khedari)

De acuerdo a los resultados presentados se observó que la cuantificación de propiedades es mejor para los tableros de partículas a base de coco y durian con una concentración en peso de 90:10. Por ello se evidenció que al trabajar con la combinación de partículas las propiedades mejoran.

Zulkifli y otros investigadores preocupados porque la mayoría de estudios se centran en la caracterización mecánica de los materiales desarrollaron la investigación de paneles de absorción acústica empleando multicapas de fibra de coco como relleno con y sin paneles perforados de poliéster. Para evaluar las características acústicas emplearon la norma ISO354 la cual describe el modo de ensayo en cámara reverberante. Al ensamblar paneles con el soporte de poliéster perforado se alcanzó un coeficiente de absorción acústica de 0,70 a 0,85 en un rango de frecuencia de 500 hasta 2 500 Hz y una disminución de 20 dB en el ensayo de pérdida de transmisión acústica; por otro lado, al evaluar los sustratos de fibra de coco sin el soporte polimérico el coeficiente de absorción acústica se ubicó alrededor de 0,80 en los rangos de 2 500 hasta 5 000 Hz y una atenuación de ruido de 18 dB [20]. En referencia a los valores antes descritos los autores concluyen que los sustratos elaborados a partir de fibra de coco presentan coeficientes de absorción acústica comparables con los de los materiales comúnmente comercializados como espumas poliuretánicas de 30 mm (0,60) y fibras sintéticas como lana de vidrio de 50 mm (0,54).

La FAO en la reunión celebrada en 1957 en Ginebra clasificó a los tableros aglomerados como se detalla a continuación en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Clasificación de tableros aglomerados [21].

Propiedad	Valor	Unidad
<i>Tableros de madera aglomerada tipo Aislante</i>		
Densidad	0,25 – 0,40	<i>g/cm³</i>
Módulo de ruptura	1,47 – 5,39	<i>MPa</i>
Módulo de elasticidad a la flexión	166,71 - 862,99	<i>MPa</i>

Tabla 1.5. Continuación

Resistencia a la tracción paralela a la superficie	1,47 - 3,43	MPa
Absorción de agua (inmersión 24 h)	15-60	% peso
Hinchamiento	5-15	% vol.
Expansión lineal (inmersión 24 h)	0,50	%
<i>Tableros de madera aglomerada de densidad media</i>		
Densidad	0,40-0,80	g/cm ³
Módulo de ruptura	9,80 – 49,03	MPa
Módulo de elasticidad a la flexión	980,66 - 4903,30	MPa
Resistencia a la tracción paralela a la superficie	4,90 - 24,51	MPa
Absorción de agua (inmersión 24 h)	20 – 75	% peso
Hinchamiento	5-15	% vol.
Expansión lineal (inmersión 24 h)	0,2-0,6	%
<i>Tableros de madera aglomerada tipo duro</i>		
Densidad	0,80 – 1,05	g/cm ³
Módulo de ruptura	19,61 - 51,97	MPa
Módulo de elasticidad a la flexión	2745,86 - 6864,66	MPa
Resistencia a la tracción paralela a la superficie	1,96 - 17,16	MPa
Absorción de agua (inmersión 24 h)	15-40	% peso
Hinchamiento	15-40	% vol.
Expansión lineal (inmersión 24 h)	0,85	%

(Fuente: Ávila, Becerra y Maldonado)

1.3. Paneles termoacústicos

El sector de la construcción es uno de los más importantes en el dinamismo de la economía de una nación y las necesidades de innovación son inminentes, hoy en día se buscan estructuras ligeras, resistentes, económicas y eco amigables. Entre los paneles termoacústicos que se comercializan existen paneles tipo sánduche que no son otra cosa que un material compuesto, según Callister, que combina materiales de distinta naturaleza para formar un soporte y núcleo, respectivamente; chapas de acero perfilado brindan resistencia mecánica al conjunto y como núcleo se emplea poliuretano inyectado (PUR), poliestireno extruido (XPS), poliestireno expandido (EPS), lana de roca, lana de vidrio, entre otros materiales, que cumplen las funciones de aislante térmico y acústico excelentemente. Se considera un material como aislante acústico cuando la pérdida de

transmisión sonora es mayor a 33 dB⁵ y se categoriza como aislante térmico cuando la conductividad térmica varía entre 0,002 y 0,050 W/mK⁶.

Los paneles sánduche se emplean en una gran variedad de aplicaciones tales como: fachadas, cubiertas, falsos techos y particiones en interiores, especialmente en aquellos edificios industriales con elevados requerimientos de aislamiento térmico y absorción acústica. Una característica común de los paneles hoy empleados es que provienen de procesos petroquímicos que durante su producción requieren alto consumo de energía, y durante su utilización y desecho producen elevados grados de contaminación [22]. Con esto, la problemática sigue siendo la generación de más basura, no es de extrañarse que cada vez más se incrementen los desechos producidos ante cualquier actividad humana.



Figura 1.3. Panel tipo sánduche de tableros madera enlacada con núcleo de poliestireno extruido.
(Fuente: Catálogo Panelais⁷)

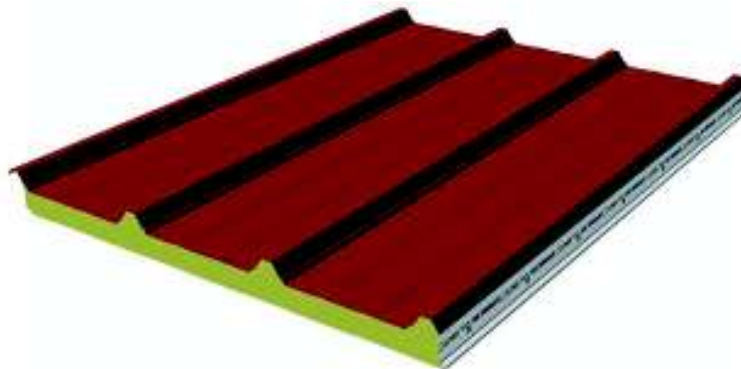


Figura 1.4. Panel tipo sánduche de chapas metálicas de Aluzinc con núcleo de poliuretano.
(Fuente: Catálogo CALAMINON⁸)

En nuestro país, la empresa Kubiec comercializa paneles termo-acústicos a 24 USD/m², que están constituidos por un núcleo aislante de poliestireno expandido con espesores

⁵ Aislamiento acústico. Disponible <https://www.andimat.es>

⁶ FAO Materiales Termoaislantes. Disponible www.fao.org/docrep.html

⁷ Panelais. Disponible <http://termopanel.pe>

⁸ CALAMINON. Disponible <http://calaminon.com>

desde 25 hasta 150 mm y cuya densidad varia de 16 a 20 kg/m³ y su resistencia térmica es de 5,9 m²K/W. Dichos paneles están conformados por capas exteriores de acero A-36 y recubrimiento de Galvalume de 0,4 mm de espesor⁹.

En otros países de la región como Perú y Chile, CALAMINON⁴ fabrica paneles para aislamiento térmico con un núcleo de poliuretano y poliestireno de 50, 75 y 100 mm de espesor, la densidad propia del núcleo es de 20 kg/m³, dicho panel está conformado por capas metálicas de Aluzinc y galvanizado cuyos espesores son del orden de 0,04-0,06 mm, su conductividad térmica se cuantifica en 0,036 W/mK; su precio es de 20 USD/m². Los paneles con núcleo de 50 mm de lana de roca y capas metálicas como las antes descritas, presentan una resistencia térmica de 1,44 m²K/W.

Otra alternativa para aislamiento térmico y acústico que se emplea en países del viejo continente son los tableros semirrígidos fabricados con lana mineral o lana de roca cuya densidad es de 40 kg/m³ y su conductividad térmica es de 0,035 W/mK y su presentación es en tableros de 1 350 mm de longitud, con anchos de 400-600 mm y espesores que varían de 30 a 60 mm. La empresa que comercializa este producto es ROCKWOOL¹⁰ con un precio de 45 USD/m².

Una reciente investigación realizó la comparación de los paneles tipo sánduche con estructuras sánduche hechas de núcleo de espuma de perlita y silicato de sodio y piel de papel, puesto que se consideran como materiales aislantes. Para la elaboración del núcleo se tiene un proceso de diferentes etapas: “dilución de aglutinante de silicato de sodio en agua, mezcla de aglutinante y perlita en un recipiente, flotación de partículas de perlita, moldeo y compactación, desmoldeo y secado” [23].

Se mezcla perlita seca con el aglutinante previamente diluido y se procede a agitar la mezcla para la separación de fases. Este tipo de paneles se caracterizan según la norma ASTM C393/C393M-16 y alcanzan diferentes valores de esfuerzo de cizallamiento al núcleo como se muestra en la Tabla 1.6 los cuales serán comparables con los paneles a base de fibra de coco. La conductividad térmica de este tipo de material es de 0,04 a 0,06 W/mK.

⁹ KUBIEN-CONDUIT. Disponible <http://www.kubiec.com/catalogos>

¹⁰ ROCKWOOL. Disponible <http://www.rockwool.es/productos-soluciones>

Tabla 1.6. Esfuerzo de cizallamiento para diferentes muestras de núcleo de paneles sánduche a base de perlita y silicato de sodio [23].

Núcleo sánduche	Densidad del núcleo [g/cm ³]	Esfuerzo de cizallamiento al núcleo [kPa]
$R_{pbd} = 0,1 \quad C_p = 2,0$	0,22	66
$R_{pbd} = 0,1 \quad C_p = 2,5$	0,25	74
$R_{pbd} = 0,1 \quad C_p = 3,0$	0,30	88
$R_{pbd} = 0,2 \quad C_p = 2,0$	0,25	68
$R_{pbd} = 0,2 \quad C_p = 2,5$	0,31	140
$R_{pbd} = 0,2 \quad C_p = 3,0$	0,35	169
$R_{pbd} = 0,3 \quad C_p = 2,0$	0,30	140
$R_{pbd} = 0,3 \quad C_p = 2,5$	0,35	228
$R_{pbd} = 0,3 \quad C_p = 3,0$	0,41	273

(Fuente: Kim[11])

R_{pbd} : Masa de aglutinante puro por unidad de volumen de aglutinante diluido [g/mL]

C_p : Relación de compactación: volumen de mezcla húmeda después de la compactación/volumen antes de la compactación.

La empresa española, Paneles ACH, es especialista en la producción de paneles tipo sánduche con prestaciones de aislamiento acústico, se caracterizan por poseer núcleos de espuma poliuretánica y lana mineral, acompañada de un soporte metálico de acero¹¹. El panel de 80 mm de espesor, cuyo núcleo es de lana mineral posee las características acústicas, mostradas en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Característica técnica de panel sánduche acústico 80 mm.

Panel Sánduche Acústico 80 mm 36 dB		
Frecuencia [Hz]	Absorción acústica	Reducción sonora [dB]
125	0,25	20,2
250	0,65	25,1
500	0,80	32,7
1 000	0,90	37,0
2 000	0,95	39,1
4 000	1,00	36,0

(Fuente: Catálogo de productos ACH)

¹¹ Paneles ACH. Disponible www.panelesach.com

La revolución de la tecnología en el diseño de materiales busca aprovechar las ventajas de un diseño liviano, por ello se plantea la estructura tipo sánduche, la cual consta generalmente de dos láminas delgadas rígidas y un núcleo grueso y liviano. Las láminas usualmente están hechas de metales o plásticos reforzados con fibra multilaminada como los ejemplos antes descritos. Los núcleos generalmente están conformados de espumas poliuretánicas, pero hasta el momento no se ha encontrado configuraciones de paneles tipo sánduche que empleen como núcleo fibra proveniente del mesocarpio de coco y un soporte de la misma naturaleza, motivo por el cual el desarrollo de esta investigación es significativo y se espera alcanzar propiedades comparables con paneles disponibles en el mercado. Cabe recalcar que la fibra de coco presenta buenas propiedades de absorción acústica y aislamiento térmico [24] para la elaboración de paneles que puedan ser fácilmente instalados en construcciones civiles, lo cual es una opción prometedora y ecológica en comparación con otros materiales aislantes.

En el 2016 Ecuador importó 3,7 millones de dólares en materiales termoaislantes para la construcción con procedencia de Estados Unidos 31 %, Alemania 24 %, Colombia 16 % y China 12 %¹². Dichos materiales han sido fabricados a partir de lana de mineral y espumas de poliuretano. Con esta visión de mercado se demuestra que Ecuador carece de materiales capaces de ofrecer prestaciones térmicas y acústicas competitivas con las ya existentes. De hecho, la propuesta de utilizar recursos que son considerados desechos como es el bonote del coco, aporta al cambio de la matriz productiva del país, disminuye los daños al medio ambiente causados por acumulación de desechos sólidos, generando empleos y utilizando materias primas ecuatorianas de bajo costo con potenciales prestaciones térmicas y acústicas.

¹² Observatorio de Economía. Disponible <https://atlas.media.mit.edu/en/>

2. METODOLOGÍA

Las fibras naturales se consideran un material renovable y se pueden encontrar fácilmente en la naturaleza. Su alta disponibilidad a un costo relativamente bajo en comparación con otras fibras sintéticas, alienta su uso en varias aplicaciones, motivo por el cual se empleó los residuos de coco como materia prima a lo largo de esta investigación.

Se elaboró paneles tipo sánduche constituidos por tableros de polvillo de coco y escayola, en ambos casos el núcleo fue conformado por no tejido de fibra de coco aglutinada con látex. Se evaluaron propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de los paneles y sus componentes individuales mediante el método experimental, puesto que se controló las variables para delimitar relaciones entre ellas, con la finalidad de recopilar datos que permitieron comparar mediciones. Además, se contrastó los resultados obtenidos con el desempeño que presentan paneles tipo sánduche comercializados hoy en día.

Para definir las mejores combinaciones entre la concentración de urea formaldehído y polvo de fibra de coco, se realizó un estudio previo definiéndose los parámetros de trabajo óptimos; para la elaboración del no tejido de fibra de coco se controló el método de aplicación de látex. De esta manera se preparó un esquema de ensayos para caracterizar los materiales fabricados.

El detalle de cada etapa empleada durante el desarrollo de este trabajo investigativo se lo explica en los puntos subsiguientes. Sin embargo, a continuación se menciona brevemente la secuencia de trabajo:

- Se obtuvo la materia prima mediante el desfibrado, molido y tamizado del mesocarpio de coco. Para ello se empleó la máquina de desfibrado, molino de cuchillas, juego de tamices del Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) regidos bajo la norma ASTM E11-17 y tamizadora automática del Laboratorio de Fundición. De esta manera se obtuvo:
 - 1) Fibra, la cual fue utilizada para los no tejidos de fibra de coco aglutinados con látex.
 - 2) Polvillo retenido en los tamices ASTM No.10 y ASTM No.30, que se empleó para la elaboración de los tableros.
- Se elaboraron tableros a partir del polvillo de coco. Para esto se empleó la prensa calefactora, prensa fría e implementos para moldeo manual.

- Para la preparación del núcleo de no tejido de fibra se utilizó fibra previamente lavada y secada. Con el fin de garantizar la fácil manipulación de estas estructuras se agregó látex natural. El espesor del núcleo de no tejido es de 1,5 cm.
- Adquirir escayola de 1 cm de espesor para extraer láminas de 625 cm² de área, las cuales conformaron los paneles tipo sánduche.
- Para el ensamble de los paneles tipo sánduche se utilizó chapa metálica de 2 mm de espesor que brindó soporte a sus componentes, de manera que se tuvieron dos tipos de paneles:
 - 1) Tablero de polvillo de coco- no tejido
 - 2) Escayola-no tejido

En ambos casos el no tejido fue el núcleo de los paneles y para constituir las diferentes configuraciones se apilonó los no tejidos elaborados hasta alcanzar espesores totales de: 35, 50 y 65 mm.
- Se evaluó las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de los paneles tipo sánduche y sus constituyentes bajo normativas internacionales vigentes, como se muestra en la Tabla 2.1.
- Se analizó y comparó el desempeño entre los dos tipos de paneles sánduche que fueron fabricados, con escayola y tableros a base de polvillo de coco. Además, se comparó los resultados obtenidos con paneles disponibles en el mercado.

2.1. Procesos de fabricación

2.1.1. Obtención de la fibra de coco

La preparación de la fibra de coco extraída del mesocarpio de esta fruta se realizó mediante múltiples procesos que se detallan a continuación: trituración, molienda, tamizado y lavado.

Trituración.- Permite que la fibra quede suelta y se obtenga polvillo de coco para ello se empleó una desfibadora de corteza de coco, equipo eléctrico trifásico que cuenta con un motor de 5 hp que impulsa por un sistema de doble banda hacia un eje, el cual posee las aspas de trituración, como se visualiza en la Figura 2.1

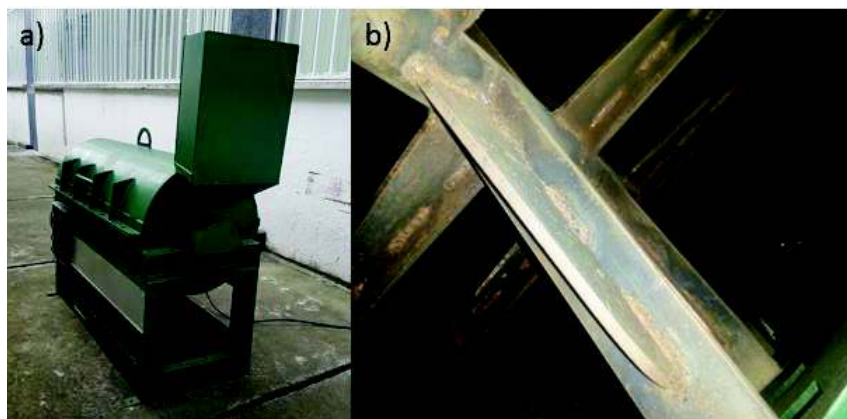


Figura 2.1. a) Vista exterior de la desfibadora de coco. b) Vista interna, aspas de corte.

(Fuente: Propia)

Molienda.- Una vez obtenida la fibra es necesario unificar el tamaño de la misma por lo cual se empleó un molino eléctrico bifásico con una malla de 25 mm de diámetro, como se indica en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Molino de cuchillas. a) Vista Externa, b) Vista interna, cuchillas.

(Fuente: Propia)

Tamizado.- Como efecto de la molienda existe la presencia de polvillo de coco y con el objetivo de separarlo de la fibra se procede a tamizar haciendo uso de un juego de tamices normalizados según la norma ASTM E11-17 ($3 \frac{1}{2}$; 6,7; 6; 10; 30; 60; 100) y la tamizadora eléctrica que dispone el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica. En la Figura 2.3 se aprecia el equipo e instrumental empleado.



Figura 2.3. Tamizadora.
(Fuente: Propia)

Lavado.- Para conseguir una mejor adherencia de la fibra con la sustancia aglutinante fue necesario que la fibra se encuentre limpia, para ello se remojó la fibra en agua por 24 horas con agitación continua para posteriormente proceder al secado.

Secado.- Se empleó la estufa a una temperatura de 80°C durante 24 horas.

Durante el procesamiento de 92 kg de bonote del coco se obtuvieron: 38,72 kg de fibra (Figura 2.4), 51,28 kg de polvillo grueso (Figura 2.5) y 2 kg de polvillo fino (Figura 2.6), considérese, que el polvo fue obtenido de la médula de bonote de coco.



Figura 2.4. Fibra de coco.
(Fuente: Propia)



Figura 2.5. Polvillo grueso de coco, tamices normalizados ASTM E11 No.10 y No.30.
(Fuente: Propia)



Figura 2.6. Polvillo fino de coco, tamices normalizados ASTM E11 No.60 y No.100.
(Fuente: Propia)

2.1.2. Fabricación de tableros con polvillo de coco

Para la obtención de tableros de coco se empleó el polvillo de los tamices normalizados ASM E-11 No.10 que tiene una apertura de 2 mm y el tamiz No.30 con apertura de 600 μm , combinado con urea formaldehído en proporciones de 70% y 30%, respectivamente. A continuación, se detalla el proceso de elaboración:

1. Preparar la resina combinando urea formaldehído con el catalizador de sulfato de amonio (M6) y agua de manera que se consiga una reducción de sólidos al 52%. La Figura 2.7 muestra las sustancias antes mencionadas.



Figura 2.7. Componentes de la resina UF empleada en el moldeo.

(Fuente: Propia)

2. A la proporción de polvillo de coco requerida se le debe agregar de manera paulatina la resina, procurando una distribución homogénea. La mezcla se realizó de manera manual.
3. Con la ayuda de un molde de madera desmontable con dimensiones de 25 cm x 25 cm, sobre una lata metálica conformar el tablero crudo y con un apisonador se debe ejercer presión sobre el área superficial, como se muestra en Figura 2.8.



Figura 2.8. Moldeo manual de la mezcla polvillo de coco y urea UF.

(Fuente: Propia)

4. Una vez obtenido del tablero crudo deseado se debe retirar el molde de madera.
5. En la prensa calefactora a 150 °C (302 °F) se debe ingresar el tablero crudo y someterlo a 2,82 MPa de presión sobre el molde, lo que representa 18 toneladas métricas en el equipo empleado (ver Anexo II.) durante 10 minutos, para alcanzar el espesor deseado.

6. Para evitar deformaciones del tablero curado, el enfriamiento del mismo se realizó en una prensa fría a 689,47 kPa, a temperatura ambiente. De manera que el producto final sea como el indicado en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Tablero de polvillo de coco de 1 cm de espesor.

(Fuente: Propia)

2.1.3. Fabricación de no tejidos de fibra de coco

Para la elaboración del no tejido de fibra de coco se requirió seguir los pasos a continuación descritos:

1. Con un marco de madera de 25 cm x 25 cm, se conforma el no tejido por distribución aleatoria y manual de 95 gramos de fibra lavada y seca. En la Figura 2.10 se observa el moldeo manual para obtener un no tejido de fibra de coco con espesor de 15 mm.



Figura 2.10. Moldeo manual de no tejido de coco.

(Fuente: Propia)

2. Se llevó a prensa caliente el molde durante 20 minutos a 2,35 MPa.

3. Aplicar 20 mL de látex por aspersion con ayuda de una pistola de gravedad, se debe garantizar que la aspersion fuera uniforme en ambas caras del no tejido conformado. En la Figura 2.11 se muestra el modo de aspersion de látex por acción de aire comprimido.



Figura 2.11. Aspersion de látex a las caras del no tejido.
(Fuente: Propia)

4. Para vulcanizar el látex, se llevó el no tejido durante 15 minutos a 60 °C en la prensa calefactora sin agregar presión, para evitar la formación de burbujas.
5. Se debe enfriar y desmoldar el no tejido con ayuda de espátulas como se aprecia en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Desmolde del no tejido.
(Fuente: Propia)

2.1.4. Ensamble de paneles tipo sánduche

Se empleó como soporte de los paneles tipo sánduche una chapa metálica de 2 mm. En la Figura 2.13 se visualiza los componentes de panel tipo 1: paneles a base de polvillo de coco y núcleo de fibra. Por otro lado, el panel tipo 2 está conformado por láminas exteriores

de escayola y núcleo de fibra de coco. Finalmente, los paneles se presentaron como se indica en la Figura 2.14 y Figura 2.15.



Figura 2.13. Conformación de panel sánduche tipo 1, constituido por tableros de coco y núcleo de no tejido de fibra de la misma naturaleza.

(Fuente: Propia)

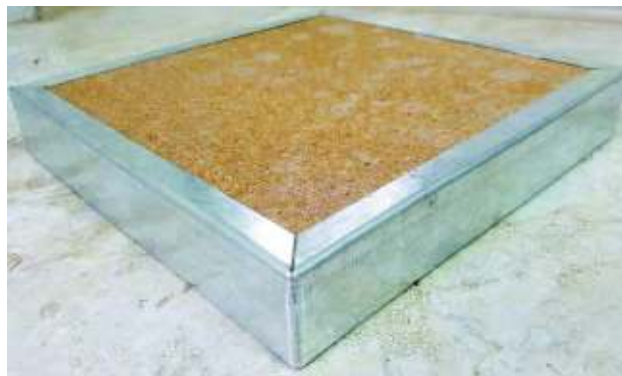


Figura 2.14. Panel sánduche tipo 1 con soporte metálico.

(Fuente: Propia)



Figura 2.15. Panel sánduche tipo 2 con soporte metálico.

(Fuente: Propia)

2.2. Caracterización mecánica, térmica y acústica de paneles tipo sánduche y sus constituyentes

Para la caracterización térmica y acústica de los paneles y sus constituyentes se utilizaron ensayos bajo las normas ASTM C 177-13 e ISO 10534:1993/ ASTM E1050-12, respectivamente, y para la caracterización mecánica se realizaron los ensayos que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Ensayos mecánicos para los distintos tipos de materiales.

Material	Ensayo	Norma
Tableros de polvillo de coco	Densidad aparente	ASTM D 792-13
	Ensayo de tracción	ASTM D 3039/ D3039M-17
	Ensayo de flexión	ASTM D 7264/ D7264M-15
	Absorción de agua	ASTM D 1037-12
	Incremento de espesor	
	Contenido de humedad	ASTM D 4442-16
	Dureza	ASTM D 1037-12
No tejido de fibra de coco	Ensayo de resistencia última para láminas de control de erosión	ASTM D 6818-18a
	Densidad aparente	ASTM D 792-13
Paneles sánduche: tablero de polvillo de coco - no tejido	Ensayo para las propiedades de cizallamiento del núcleo de las estructuras sánduche mediante flexión	ASTM C 393/ C393M-16
Paneles sánduche: escayola - no tejido		

(Fuente: Propia)

Como parte de este trabajo investigativo, para definir los mejores parámetros de procesamiento en lo referente a los tableros de polvillo de coco se preparó muestras bajo diferentes concentraciones máxicas de UF y presiones de moldeo. Dichos resultados se compilan de acuerdo a la caracterización realizada, como se indica a continuación: Ensayos de tracción y flexión (ANEXO III.), ensayo de absorción de agua e incremento de espesor (Anexo IV.) y ensayo de dureza (Anexo V.)

2.2.1. Ensayo para determinar densidad aparente

El método de evaluación se realizó mediante inmersión en agua, bajo la norma ASTM D792-13, para lo cual se prepararon muestras con una superficie de 1 cm x 1 cm y

utilizando una balanza analítica (Figura 2.16) con una precisión de 0,01 mg se definió las densidades promedio resultantes.

Para el cálculo se empleó la ecuación a continuación descrita.

$$\rho_{deseada} = \frac{P_{seco}}{P_{seco} - P_{líquido}} \times \rho_{agua T^{\circ}C} \quad (1)$$

Donde:

$\rho_{deseada}$: Densidad a ser definida.

P_{seco} : Peso del material en seco.

$P_{líquido}$: Peso del material en líquido.

$\rho_{agua T^{\circ}C}$: Densidad del agua a temperatura de la misma en el momento de realizar el ensayo.



Figura 2.16. Balanza analítica.
(Fuente: Propia)

2.2.2. Ensayos de tracción y flexión

Para el ensayo de tracción se adoptó la norma ASTM D3039/ D3039M-17 “Método de prueba estándar para propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica”. Y para el ensayo de flexión, puesto que las resinas de urea son polímeros, clasificadas dentro del grupo de los plásticos termoestables, se utilizó la norma ASTM D7264-13.

Para llevar a cabo los ensayos propuestos se requirió de la máquina universal de ensayos marca Tinius Olsen, modelo H25KS (ver Figura 2.17); se empleó el sistema de flexión a

tres puntos en el cual una carga central se aplica en la muestra de 13 x 192 mm, misma que es apoyada en dos soportes, con una velocidad de ensayo de 1 mm/min y se registraron los valores de fuerza y deflexión generadas. Se realizó el ensayo de tracción con extensómetro a una velocidad de 2 mm/min, las muestras requeridas fueron de 25 x 200 mm. En ambos casos de ensayo, las muestras cumplieron con un protocolo de ambientación previo de 48 horas a 23 °C y humedad relativa menor al 60 %.

Debido a que existió una variación considerable en el módulo evaluado por tracción, así como el módulo a flexión se requirieron cinco muestras como mínimo para descartar los valores extremos dentro de los límites máximos y mínimos de los distintos sets de ensayo.



Figura 2.17. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen, modelo H25KS.

(Fuente: Propia)

2.2.3. Ensayo de absorción de agua e incremento de espesor

De acuerdo a la norma ASTM D1037-12 “Métodos de prueba estándar para evaluar las propiedades para materiales a base de fibra de madera y paneles de partículas”, se prepararon las muestras con dimensiones de 150 x 150 mm, siguiendo el protocolo de ambientación de las probetas previo a la inmersión, garantizando las condiciones temperatura de agua a 20 °C y cubriendo 25 mm sobre la superficie de los tableros.

El modo de ensayo es el tipo B, puesto que se midieron inicialmente los pesos en seco, y luego de cumplir un ciclo de 24 horas en inmersión para conocer el porcentaje de absorción de agua. Finalmente, se midieron cuatro veces el espesor de las muestras con micrómetro. Y se reportó el incremento de espesor con las ecuaciones a continuación descritas:

$$\text{Absorción de agua [\%]} = \frac{\text{Peso a 24 h} - \text{Peso inicial}}{\text{Peso inicial}} * 100\% \quad (2)$$

$$\text{Incremento de espesor [\%]} = \frac{\text{Espesor final} - \text{Espesor inicial}}{\text{Espesor inicial}} * 100\% \quad (3)$$

Luego se secaron las muestras por tres horas a 103 °C para conocer el contenido de humedad, el protocolo de evaluación es el establecido en la norma ASTM D4442-16 con la siguiente relación:

$$\%MC = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa Seca}}{\text{Masa Seca}} * 100\% \quad (4)$$

2.2.4. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se realizó bajo la normativa ASTM D1037-12 “Métodos de prueba estándar para evaluar las propiedades para materiales a base de fibra de madera y paneles de partículas”, en la cual se explican las condiciones del ensayo Janka.

Para realizar este ensayo se prepararon probetas con dimensiones de 75 x 150 mm. La norma declara que si la muestra tiene menos de 25 mm de espesor se debe pegar las capas que sean necesarias hasta alcanzar un espesor de 25 mm con una goma no sintética que no altere las propiedades de la muestra. Por ello se colocaron tres capas de tablero de 10 mm de espesor unidas con goma blanca para el ensayo.

Se realizó una probeta por composición de tablero y se tomaron 2 indentaciones por cara, obteniendo 4 resultados por muestra. El indentador fue esférico de 11,33 mm de diámetro y se registró la carga aplicada una vez que la bola penetró la mitad de su diámetro en la muestra, la velocidad de ensayo fue de 6 mm/min.

Para cuantificar la dureza por ensayo Janka el indentador se acopló a la máquina universal de ensayos que se encuentra en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica. En la Figura 2.18 se presenta una muestra durante la realización del ensayo.



Figura 2.18. Ensayo Janka.

(Fuente: Propia)

2.2.5. Ensayo de resistencia última de tracción

Considerando que las muestras de no tejido pueden ser utilizadas como geomantos, se empleó el ensayo de tracción “Método de prueba estándar para las propiedades últimas de tracción de los productos laminados para el control de erosión”, bajo la normativa ASTM D6818-18a.

Para este ensayo se fabricaron probetas de dimensiones 100 x 150 mm con espesor propio de la muestra. Por ser un material sin una dirección específica en la distribución de la fibra, es imperioso la extracción de muestras en ambas direcciones (longitudinal y transversal) del producto elaborado. Cabe destacar que se utilizó la máquina universal de ensayos Tinius Olsen, modelo H25KS, con una tasa de extensión de longitud de 300 ± 10 mm/min. El reporte se generó cuando rompa la muestra (ver Figura 2.19), registrándose la fuerza última sobre el ancho de las muestras.



Figura 2.19. Ensayo de esfuerzo último de tracción para no tejido de fibra de coco.

(Fuente: Propia)

2.2.6. Ensayo para las propiedades de cizallamiento del núcleo de las estructuras sánduche mediante flexión

Por considerarse un material para aplicaciones estructurales la evaluación de los paneles tipo sánduche se realizó en función de la norma ASTM C393/C393M-16 “Método de prueba estándar para las propiedades de cizallamiento del núcleo de construcciones sánduche mediante flexión”, motivo por el cual se prepararon probetas de 75 x 200 mm y espesor a convenir de acuerdo a las distintas configuraciones del núcleo.

Al ser un ensayo de flexión a tres puntos se empleó la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H25KS, con una velocidad del cabezal de 6 mm/min y una distancia entre apoyos de 150 mm como se visualiza en la Figura 2.20 con el fin de conocer el esfuerzo de cizallamiento del núcleo, mismo que responde a la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{cizallamiento al núcleo}} = \frac{\text{Fuerza [N]}}{(\text{Espesor total [mm]} + \text{Espesor del núcleo [mm]}) \text{Ancho del panel [mm]}} \quad (5)$$



Figura 2.20. Ensayo de flexión a tres puntos para panel sánduche tipo 2 con núcleo de 15 mm.

(Fuente: Propia)

2.2.7. Ensayo de conductividad térmica

Para la caracterización térmica de materiales aislantes se emplea la técnica de placa caliente resguardada que es normalizada por la norma ASTM C177-13 “Método de prueba estándar para mediciones de flujo de calor en estado estacionario y propiedades de transmisión térmica por medio de placa caliente protegida”. El equipo empleado, medidor de conductividad térmica de placa caliente, de marca Lambda-Messtechnik, modelo λ -Meter EP500e, Versión C se muestra en la Figura 2.21; mismo que se encuentra en el Laboratorio de Ensayos Térmicos del Ecuador-LABET de la Escuela Politécnica de Litoral (ESPOL).

Se cuantificó el coeficiente de conductividad térmica para las muestras de manera separada, para posteriormente evaluar resistividad térmica total de los paneles tipo sánduche mediante simulación por métodos numéricos con la herramienta computacional THERM que fue desarrollada por Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Además, se definió de manera teórica el valor de resistividad total para las distintas configuraciones de los paneles, lo cual se detalla en el Anexo VI.



Figura 2.21. Medidor de conductividad térmica de placa caliente, Lambda-Messtechnik, modelo λ -Meter EP500e, Versión C.

(Fuente: Propia)

Previa a la realización del ensayo las muestras debieron ser ambientadas por 24 horas a una temperatura ambiente de 23°C y humedad relativa menor al 80%. La metodología de ensayo involucró inicialmente el dimensionamiento geométrico de las muestras, como mínimo se requiere una superficie de contacto de 225 cm² para posteriormente someterlas a un flujo de calor que genera una diferencia de temperatura entre la placa caliente y fría de 15°C, hasta alcanzar el estado estable y obtener datos durante 90 minutos. Se empleó material de guarda en el borde exterior de las muestras ensayadas y una temperatura media de ensayo de 23°C con la finalidad de evitar la influencia del medio externo.

2.2.8. Ensayos de coeficiente de absorción acústica y pérdida de transmisión sonora

Dentro de los ensayos que se pueden realizar para la evaluación acústica de los materiales se ha propuesto evaluar el coeficiente de absorción acústica y la pérdida de transmisión, ambos ensayos se realizaron con ayuda de un tubo de impedancia ACUPRO (Figura 2.22) del Laboratorio de Acústica de la Universidad de las Américas (UDLA). Este instrumento está regido mediante la norma ISO 10534-2 “Determinación del coeficiente de absorción

acústica y de la impedancia en tubos de impedancia: Método de la función de transferencia” y la norma ASTM E1050-12 “Método de prueba estándar para impedancia y absorción de materiales acústicos utilizando un tubo, dos micrófonos y un sistema de análisis de frecuencia digital”.

Las muestras normalizadas tenían una forma circular con un diámetro de 35 mm, el espesor fue propio del material ensayado. Para el cálculo del coeficiente global de absorción acústica se utilizó lo estipulado en la norma ISO 11654:1993 “Absorbentes acústicos para la utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica”; tomando en cuenta que este método se emplea para evaluación en cámara reverberante, fue adaptado para los fines de este documento. Adicionalmente, se presentan los indicadores de forma (L, M y H) que representan un exceso de absorción que se produce en diferentes frecuencias como se indica: a 250 Hz se emplea la notación L; a 500 o 1000 Hz la notación M; finalmente si se produce a 2000 o 4000 Hz se utiliza la notación H.

Para el cálculo de un índice global de pérdida de transmisión sonora se consideró lo estipulado en la norma ASTM E413-16 “Clasificación para un índice de aislamiento acústico”. Cabe recalcar que de la misma manera que para el coeficiente de absorción global, se adaptó esta norma para los fines de este documento, ya que esta clasificación abarca los métodos de cálculo de las clasificaciones acústicas de un solo número para las mediciones de laboratorio y de campo de la atenuación del sonido obtenidas en bandas de un tercio de octava.



Figura 2.22. Tubo de impedancia ACUPRO.

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Ensayos mecánicos de tableros a base de polvillo de coco

Para fabricar los tableros de polvillo de coco se utilizó una concentración másica de 30 % de UF y una presión de moldeo de 2,82 MPa, debido a que en estudios preliminares estas condiciones presentaron los mejores resultados.

3.1.1. Densidad aparente

De acuerdo con la norma ASTM D792-13, se empleó probetas de 1 x 1 cm y como fluido de inmersión agua a una temperatura de 21 °C, con una densidad de 0,998 g/cm³. En la Tabla 3.1 se muestran los cinco valores de peso, en seco y durante inmersión de tres probetas. Además, de la densidad del material que cumple la siguiente relación:

$$\rho = \frac{P_{seco}}{P_{seco} - P_{liquido}} \times \rho_{agua \text{ a } 21^{\circ}C} \quad (5)$$

Tabla 3.1. Valores obtenidos en el ensayo de densidad aparente para el tablero de polvillo de coco.

N° de medida	Peso de tablero en seco [g]	Peso de tablero en líquido [g]	Densidad de tablero [g/cm ³]
1	1,5574	-0,360	0,8101
2		-0,347	0,8162
3		-0,332	0,8223
4		-0,326	0,8252
5		-0,325	0,8254
6	1,8856	-0,521	0,7811
7		-0,616	0,7520
8		-0,542	0,7751
9		-0,533	0,7780
10		-0,544	0,7740
11	1,5556	-0,235	0,8663
12		-0,246	0,8611
13		-0,237	0,8652
14		-0,258	0,8554
15		-0,213	0,8770
Promedio			0,8192
Desviación Estándar			0,080
Coefficiente de Variación [%]			9,190

(Fuente: Propia)

Para la formulación de los tableros de polvillo de coco se consideró una densidad de 0,600 g/cm³, puesto que a nivel comercial este valor es el más utilizado en la elaboración de

tableros de madera¹³. Las dimensiones de los tableros son de 250 x 250 mm y 10 mm de espesor.

El peso de las muestras en inmersión, es decir, el peso en líquido es negativo puesto que las muestras flotan en la superficie, lo cual por acción del principio de Arquímedes significa que presentan menor densidad que la del agua. En función de la densidad teórica definida por análisis de fracciones volumétricas (0,8190 g/cm³) descrito en Anexo VII, y comparando con el valor de la densidad aparente del compuesto gracias al ensayo por inmersión (0,8192 g/cm³) existe un error asociado a la densidad de 0,024 %, dicho valor es considerado despreciable. La FAO categoriza este material como un tablero aglomerado de densidad media, cuyo rango varía entre 0,40 y 0,80 g/cm³ [21].

3.1.2. Ensayo de tracción

Como lo indica la norma ASTM D3039/D30039M-17, se requirieron muestras con una dimensión de 25 x 200 mm y 10 mm de espesor. La velocidad del cabezal requerida para la máquina universal Tinius Olsen fue de 6 mm/min y se empleó el extensómetro. Además, la norma indica que como mínimo se requieren cinco muestras de ensayo, para fines de este trabajo se empleó un set de seis muestras donde la número 4 fue descartada por alcanzar el menor valor de resistencia última como se aprecia en la Figura 3.1. En la Tabla 3.2 se registran los resultados de ensayo para cada muestra preparada.

Tabla 3.2. Valores obtenidos en el ensayo de tracción.

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]
1	25,27	10,24	258,59	467,50	1,81	818,25
2	25,14	10,18	255,93	615,83	2,41	666,11
3	25,18	10,57	266,10	575,83	2,16	4078,79
4	26,01	10,09	262,26	396,67	1,51	8158,17
5	26,40	10,12	267,12	565,00	2,12	1328,83
6	25,31	10,20	257,99	503,33	1,95	1244,79
Promedio	25,53	10,19	259,90	537,91	2,07	1014,49
Desviación Estándar	0,51	0,04	4,28	56,92	0,22	279,16
Coefficiente de Variación [%]	1,98	0,43	1,65	10,58	10,79	27,52

(Fuente: Propia)

¹³ NOVOPAN. Disponible: <http://novopan.com.ec>



Figura 3.1. Probetas ensayadas a tracción de tableros con 30 % de UF y 2,82 MPa de presión.

(Fuente: Propia)

Este ensayo reportó una resistencia última promedio de 2,07 MPa que es ocho veces mayor que el valor alcanzado por los tableros constituidos por bonote de coco, fibra de yute y papel de la industria hindú “Coir Board” bajo las mismas condiciones de ensayo, que alcanzó un valor de 0,25 MPa [18]. Por otro lado, las características alcanzadas corresponden a la de un tablero aglomerado tipo aislante según la clasificación de la FAO, cuyos valores cuantificados de resistencia a la tracción paralela a la superficie varían entre 1,47 y 3,43 MPa. Cabe destacar que la fractura de las muestras se dio fuera de la zona del extensómetro sin llegar hasta la parte de las mordazas.

3.1.3. Ensayo de flexión

En ensayo de flexión con tres apoyos es regido por la norma ASTM D7264/D7264M-15 y requiere de muestras de 13 x 192 mm y espesor de 10 mm (ver Figura 3.2). La velocidad de ensayo fue de 6 mm/min. A continuación, en la Tabla 3.3 se aprecia los valores obtenidos durante este ensayo.

Tabla 3.3. Valores obtenidos en el ensayo de flexión.

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Distancia entre puntos [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	12,60	9,88	124,4	160,96	21,67	4,25	361,40	1,58
2	13,86	10,27	142,2	159,66	28,33	4,65	374,67	1,63
3	14,06	10,11	142,1	159,24	29,17	4,85	420,90	1,50
4	12,81	9,94	127,2	160,88	27,50	2,25	381,48	1,59
5	14,78	9,68	143,0	159,65	23,33	4,04	274,52	2,04

Tabla 3.3. Continuación

	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Distancia entre puntos [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
Promedio	13,62	9,97	135,8	160,07	26,00	4,00	362,59	1,66
Desviación Estándar	0,91	0,23	9,16	0,79	3,30	1,03	53,99	0,21
Coefficiente de Variación [%]	6,66	2,26	6,75	0,49	12,70	25,78	14,89	12,78

(Fuente: Propia)

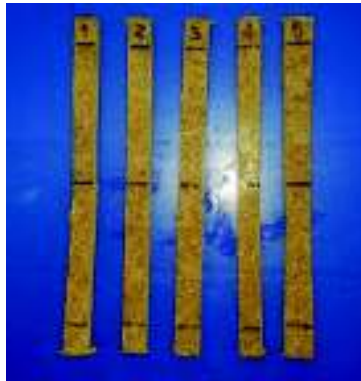


Figura 3.2. Probetas ensayadas a flexión de tableros con 30 % de UF y 2,82 MPa de presión.

(Fuente: Propia)

La urea formaldehído es considerada una resina adhesiva termoestable por lo cual se adoptó la norma ASTM D7264/D7264M-15, con la preparación de cinco muestras; alcanzándose una resistencia última a flexión de 4MPa y un módulo de elasticidad de 362,59 MPa, dichos valores se encuentran dentro de los límites establecidos por la FAO para ser tableros aglomerados tipo aislante, donde la resistencia última alcanza valores de 1,47 a 5,39 MPa y el módulo de elasticidad varía entre 166,71 a 862,99 MPa. Para finalidad de este trabajo investigativo ser un tablero aglomerante tipo aislante es la aplicación deseada.

3.1.4. Ensayo de absorción de agua e incremento de espesor

La norma ASTM D1037-12 indica que para la realización de este ensayo se requieren muestras de 150 x 150 mm y 10 mm de espesor (Figura 3.3). Se empleó agua a 20 °C y un espacio acondicionado con una humedad relativa <70 %.

En la Tabla 3.4 se indica el porcentaje de absorción de agua, que se definió con la siguiente relación:

$$\text{Absorción de agua [\%]} = \frac{\text{Peso a 24 h} - \text{Peso inicial}}{\text{Peso inicial}} * 100\%$$

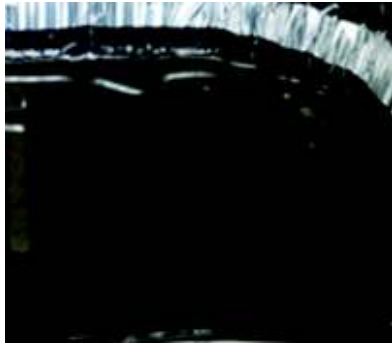


Figura 3.3. Muestra de tablero sumergido en agua.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.4. Medidas de pesos en muestra para ensayo de absorción de agua.

Peso en seco [g]	Peso 24 h de inmersión [g]	Absorción de agua [%]
115,20	220,70	91,58

(Fuente: Propia)

Para conocer el porcentaje de incremento de espesor se empleó un tornillo micrométrico, donde se reportan cuatro medidas por probeta con una separación de 25 mm, dichos valores se indican en la Tabla 3.5, tanto al inicio y al finalizar el ciclo de secado a 103 °C posterior a las 24 horas de inmersión. En la Tabla 3.6 se define el incremento de espesor que cumple la siguiente relación:

$$\text{Incremento de espesor [\%]} = \frac{\text{espesor final} - \text{espesor inicial}}{\text{espesor inicial}} * 100\%$$

Tabla 3.5. Mediciones de espesor.

Muestras		Medida inicial	Medida en seco, 3 horas a 103 °C
Espesores [mm]	1	10,27	10,24
	2	10,31	10,25
	3	10,13	10,23
	4	10,17	10,22
Promedio [mm]		10,22	10,24
Desviación Estándar		0,07	0,01
Coefficiente de Variación [%]		0,71	0,12

(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Resultado de incremento de espesor.

Espesor inicial [mm]	Espesor final [mm]	Incremento de espesor [%]
10,22	10,24	0,19

(Fuente: Propia)

Para evaluar el contenido de humedad se cumple lo dispuesto en la norma ASTM D4442-16 (Método A), el porcentaje se muestra en la Tabla 3.7 y cumple con la siguiente relación:

$$\%MC = \frac{Masa\ inicial - Masa\ Seca}{Masa\ Seca} * 100\%$$

Tabla 3.7. Resultado de contenido de humedad.

Masa Inicial [g]	Masa Seca [g]	%MC
115,2	114,8	0,34

(Fuente: Propia)

La normativa vigente para evaluación de absorción de agua no establece rangos para definir un porcentaje como aceptable y más bien se realiza este ensayo como un modo de control. Es por eso que alcanzar 91,58 % durante 24 horas en inmersión de agua, sugiere que este producto no debería estar instalado en algún medio en contacto directo con un fluido. Por otro lado, los valores alcanzados en cuanto al porcentaje de incremento de espesor y contenido de humedad son de 0,19 % y 0,34 %, respectivamente, los cuales si son comparados con los tableros fabricados por “Coir Board” que registran de 5 % y 5 - 15 % para las mismas propiedades [18]; y el valor que indica la FAO de incremento de espesor de 5-15 % para tableros aislantes y de densidad media [21], confieren a los tableros de polvillo de coco realizados una característica ideal para la aplicabilidad deseada.

3.1.5. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza Janka cumple con lo indicado en la norma ASTM D1037-12, que especifica muestras con dimensiones de 75 x 150 mm y espesor de 30 mm como la indicada en la Figura 3.4. Se empleó la máquina universal de ensayo con una velocidad de 6 mm/min por indentación. En la Tabla 3.8 se recopiló los valores de la carga máxima soportada.

Tabla 3.8. Fuerza registrada en ensayo de dureza Janka.

No. medición	Carga máxima [N]
1	709,0
2	562,0
3	742,0
4	601,0
Promedio	653,5
Desviación Estándar	74,2
Coefficiente de Variación [%]	11,3

(Fuente: Propia)



Figura 3.4. Probeta para ensayo de dureza Janka.

(Fuente: Propia)

De acuerdo con las indentaciones sobre la muestra se define que la presión es un factor inversamente proporcional a la carga máxima soportada, el valor alcanzado de 653,5 N categoriza a este tipo de tablero como un material semiduro-duro [25], característica deseada para los fines que brinda el material.

3.2. Ensayos mecánicos de no tejidos de fibra de coco

3.2.1. Densidad aparente de la fibra de coco

La norma ASTM D792-13 indica que se requiere agua con una temperatura 20 °C y una densidad de 0,9982 g/cm³. El peso de la muestra de fibra en seco fue de 0,2048 g. Los valores obtenidos en este ensayo se indican en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Valores obtenidos en el ensayo de densidad aparente para fibra de coco.

N° de medida	Peso de fibra en líquido [g]	Densidad de fibra [g/cm ³]
1	-0,075	0,73
2	-0,067	0,75
3	-0,064	0,76
4	-0,061	0,77
5	-0,057	0,78
Promedio		0,76
Desviación Estándar		0,02
Coefficiente de Variación [%]		2,57

(Fuente: Propia)

La densidad de la fibra de coco de acuerdo a referencias bibliográficas es de 0,77 g/cm³ [26] que al comparar con la densidad determinada gracias al ensayo de inmersión existe un error asociado de 1,9%.

3.2.2. Ensayo de resistencia última de tracción

La norma ASTM D6818-18a indica que se requieren muestras de 100 x 150 mm, mismas que fueron ensayadas con una velocidad de 300 ± 10 mm/min. En la Tabla 3.10 se refleja los valores alcanzados de este ensayo en dirección longitudinal de la fibra, mientras que en la Tabla 3.11 se registran los valores alcanzados en la dirección transversal de la fibra.

Tabla 3.10. Valores obtenidos en el ensayo tensión última, evaluación en dirección longitudinal.

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Fuerza Última [N]	Fuerza última/ancho [N/mm]
1	100,10	16,32	1633,63	37,50	0,38
2	100,32	16,86	1691,40	76,66	0,76
3	100,65	16,74	1684,88	39,16	0,39
4	100,16	17,01	1703,72	47,50	0,47
5	100,24	16,59	1662,98	46,67	0,47
6	100,54	16,67	1676,00	36,66	0,37
7	100,43	16,88	1695,26	22,50	0,22
8	100,83	16,54	1667,73	25,83	0,26
Promedio	100,51	16,63	1671,50	32,33	0,32
Desviación Estándar	0,27	0,21	23,52	7,60	0,08
Coefficiente de Variación [%]	0,27	1,28	1,41	23,51	23,58

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Valores obtenidos en el ensayo tensión última, evaluación en dirección transversal.

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Fuerza Última [N]	Fuerza última/ancho [N/mm]
9	100,15	16,44	1646,47	25,83	0,26
10	100,31	16,52	1657,12	50,82	0,51
11	100,11	16,87	1688,86	85,83	0,86
12	100,47	16,39	1646,70	99,04	0,99
13	100,17	16,21	1623,76	22,50	0,23
14	100,62	16,38	1648,16	21,66	0,22
15	100,71	16,63	1674,81	29,16	0,29
16	100,59	16,41	1650,68	38,33	0,38
Promedio	100,45	16,41	1648,77	27,50	0,27
Desviación Estándar	0,27	0,15	18,12	6,74	0,07
Coefficiente de Variación [%]	0,27	0,91	1,10	24,53	24,41

(Fuente: Propia)

Las estructuras de no tejido aglutinadas con látex natural se evalúan como si fuesen láminas de control de erosión tanto en dirección longitudinal y transversal, preparando ocho muestras, de las cuales se descartan tres en cada set por ser aquellas que registran valores atípicos de fuerza última, los mismos se encuentran resaltados. Con los resultados obtenidos se aprecia que el material no tejido soporta una fuerza última/ancho mínima y máxima de 0,27 y 0,32 N/mm, respectivamente. Con estos resultados, se puede afirmar que se puede manipular manualmente sin que se desagregue.

3.3. Evaluación mecánica de paneles tipo sánduche

3.3.1. Ensayo de cizallamiento del núcleo en estructuras sánduche

Para la caracterización mecánica de los paneles tipo sánduche se empleó la norma ASTM C393/C393M-16 que indica la necesidad de cinco muestras de 75 x 200 mm, cuyo espesor se adapta al espesor propio de la muestra, por lo tanto, se evaluaron los paneles tipo 1 y 2, con 35 mm y 65 mm de espesor total. La velocidad de ensayo para el cabezal de la máquina universal de ensayo fue de 600 mm/min. En la Tabla 3.12 se muestra el esfuerzo de cizallamiento para paneles tipo 1 con núcleo de 15 mm de espesor como se observa en la Figura 3.5.

Tabla 3.12. Panel tipo 1.- Tablero de polvillo de coco y no tejido de fibra (15 mm núcleo).

No	Ancho [mm]	Espesor Total [mm]	Espesor del Núcleo [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Deformación al Fallo [%]	Esfuerzo de Cizallamiento del Núcleo [kPa]
1	75,07	37,10	17,10	225,8	0,55	10,09	6,40	55,50
2	75,16	36,54	16,65	151,6	0,37	2,83	7,70	37,94
3	75,33	37,09	16,38	176,6	0,43	3,52	8,20	43,86
4	75,61	37,26	17,17	216,6	0,53	4,15	7,44	52,65
5	75,84	36,94	16,61	173,3	0,42	6,67	7,88	42,68
6	75,12	36,85	16,58	173,3	0,42	3,33	8,25	43,19
7	75,38	36,69	16,22	122,5	0,30	3,78	5,77	30,71
Promedio	75,41	36,94	16,68	178,3	0,43	4,10	7,89	44,06
Desviación Estándar	0,31	0,27	0,29	23,63	0,06	1,51	0,34	5,34
Coefficiente de Variación [%]	0,41	0,73	1,76	13,25	13,49	36,89	4,32	12,11

(Fuente: Propia)



Figura 3.5. Muestras de panel tipo 1 (15 mm de núcleo) ensayadas.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.13 se muestra el esfuerzo de cizallamiento para paneles tipo 1 con núcleo de 45 mm de espesor como se observa en la Figura 3.6 y Figura 3.7.

Tabla 3.13. Panel tipo 1.- Tablero de polvillo de coco y no tejido de fibra (45 mm núcleo).

No	Ancho [mm]	Espesor Total [mm]	Espesor del Núcleo [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al Fallo [%]	Esfuerzo de Cizallamiento del Núcleo [kPa]
1	75,07	68,18	46,68	164,2	0,12	0,70	22,54	19,04
2	75,16	64,87	45,37	211,7	0,15	0,55	15,67	25,55
3	75,33	67,73	46,21	198,3	0,14	0,48	14,50	23,11
4	75,61	68,65	47,33	205,7	0,15	0,57	16,38	23,46
5	75,84	68,29	46,82	165,0	0,12	0,53	22,30	18,90
6	75,12	69,14	48,74	121,7	0,09	0,48	18,49	13,74
Promedio	75,40	67,54	46,48	189,0	0,14	0,57	18,28	20,63
Desviación Estándar	0,32	1,53	0,74	22,77	0,02	0,08	3,84	3,31
Coefficiente de Variación [%]	0,42	2,27	1,59	12,05	11,15	14,49	21,02	16,04

(Fuente: Propia)



Figura 3.6. Muestras de panel tipo 1 (45 mm de núcleo) previo al ensayo.

(Fuente: Propia)



Figura 3.7. Muestras de panel tipo 1 (45 mm de núcleo) ensayadas, se aprecia fisura.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.14 se muestra el esfuerzo de cizallamiento para paneles tipo 2 con núcleo de 15 mm de espesor como se observa en la Figura 3.8.

Tabla 3.14. Panel tipo 2.- Tablero de escayola y no tejido de fibra (15mm núcleo).

No	Ancho [mm]	Espesor Total [mm]	Espesor del Núcleo [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al Fallo [%]	Esfuerzo de Cizallamiento del Núcleo [kPa]
1	75,07	37,10	16,57	280,8	0,20	1,85	11,61	69,70
2	75,16	36,54	16,09	332,3	0,24	1,78	20,04	84,02
3	75,33	37,09	17,14	235,8	0,17	1,20	13,96	57,73
4	75,61	37,26	17,02	140,8	0,10	1,33	8,99	34,31
5	75,84	36,94	15,98	319,1	0,23	1,00	14,41	79,53
6	75,12	36,85	16,47	190,8	0,14	0,65	21,26	47,64
7	75,38	36,69	15,62	297,5	0,21	2,31	12,78	75,45
Promedio	75,31	36,82	16,15	284,1	0,20	1,52	16,02	71,27
Desviación Estándar	0,32	0,22	0,38	55,78	0,04	0,68	4,36	14,22
Coefficiente de Variación [%]	0,42	0,59	2,38	19,63	19,17	44,53	27,24	19,95

(Fuente: Propia)



Figura 3.8. a) Muestras de panel tipo 2 (15 mm de núcleo) ensayadas. b) Fractura en cara perpendicular a la carga.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.15 se muestra el esfuerzo de cizallamiento para paneles tipo 2 con núcleo de 45 mm de espesor como se observa en la Figura 3.9.

Tabla 3.15. Panel tipo 2.- Tablero de escayola y no tejido de fibra (45mm núcleo).

No	Ancho [mm]	Espesor Total [mm]	Espesor del Núcleo [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al Fallo [%]	Esfuerzo de Cizallamiento del Núcleo [kPa]
1	75,07	66,87	46,38	330,8	0,23	0,50	28,45	38,91
2	75,16	68,42	47,69	261,6	0,19	0,54	43,90	29,98
3	75,33	67,31	46,71	267,5	0,19	0,52	31,38	31,14
4	75,61	69,93	47,83	344,1	0,24	0,61	29,75	38,65
5	75,84	67,58	45,58	348,3	0,25	0,41	40,79	40,59
6	75,37	68,99	48,52	274,1	0,19	0,69	33,18	30,96
Promedio	75,40	68,18	47,12	304,4	0,22	0,55	34,58	35,04
Desviación Estándar	0,32	1,29	1,21	45,58	0,03	0,11	7,05	5,39
Coefficiente de Variación [%]	0,42	1,89	2,57	14,97	14,62	19,71	20,38	15,39

(Fuente: Propia)



Figura 3.9. A) Muestras de panel tipo 2 (45 mm de núcleo) ensayadas. B) Fractura.

(Fuente: Propia)

Con los resultados obtenidos se aprecia que el esfuerzo de cizallamiento disminuye conforme el espesor del núcleo del panel tipo sánduche se incrementa. Dicha condición se atribuye a que el esfuerzo presenta una relación inversamente proporcional de la fuerza última con las medidas de espesor total, espesor del núcleo y el ancho del espécimen. Por ello, es mejor ensamblar paneles con varios núcleos de fibra de coco.

El estudio realizado por Kim, para caracterizar paneles tipo sánduche con núcleo de espuma de perlita y silicato de sodio, emplea la norma ASTM C393/C393M-16, alcanzando valores de esfuerzo de cizallamiento de 66 a 88 kPa, considerando que el espesor del núcleo es de 180 mm. Dichos valores son comparables con los alcanzados por los paneles tipo 1 y 2 con un núcleo triple de fibra de coco de 45 mm de espesor, siendo de 20,63 y 35,04 kPa, respectivamente. Lo que devela que los paneles desarrollados en este trabajo investigativo son capaces de soportar una mayor fuerza que los comparados, que poseen un espesor 2,6 veces mayor.

La configuración del panel tipo 2 es la que alcanza mayores valores de esfuerzo de cizallamiento en comparación con la configuración tipo 1. Dicha condición se atribuye a que la escayola presenta láminas de cartón prensado en sus caras, las mismas que brindan soporte evitando desagregaciones a pesar de la fractura interna del yeso. Por lo descrito, se considera que el panel sánduche constituido por tableros de polvillo de coco y núcleo de fibra de la misma naturaleza presenta mejor desempeño, puesto que no existen láminas u otros materiales que brinden un soporte adicional al panel.

3.4. Ensayos térmicos de tableros a base de polvillo de coco, no tejido de fibra de coco y escayola

3.4.1. Ensayo de conductividad térmica

De acuerdo con la norma ASTM C177-13 para definir la conductividad térmica de los materiales se requirieron probetas de 250 x 250 mm y el equipo empleado de placa calefactora resguardada mantuvo una diferencia de temperatura entre superficies de 15 °C. La temperatura media de ensayo fue 23 °C. En la Tabla 3.16 se aprecian los valores de conductividad térmica para las cuatro muestras de cada material.

Tabla 3.16. Coeficiente de conductividad térmica para constituyentes de los paneles tipo sánduche.

Muestra	Tableros de polvillo de coco	No tejido de fibra	Escayola
	Conductividad térmica [W/mK]		
1	0,081	0,044	0,175
2	0,077	0,044	0,178
3	0,077	0,046	0,175
4	0,077	0,044	0,178
Promedio	0,078	0,045	0,177
Desviación Estándar	0,002	0,001	0,002
Coeficiente de Variación [%]	2,220	1,950	0,850

(Fuente: Propia)

3.4.2. Resistencia térmica total para paneles tipo sánduche

Para caracterizar térmicamente paneles tipo sánduche fue preciso definir la resistividad de los mismos, para lo cual mediante simulación en la herramienta computacional THERM fue posible definir estos valores, mismos que se reflejan en la Tabla 3.17 considerando una temperatura exterior de 27 °C e interior de 17 °C.

Los valores de conductividad térmica de cada elemento constituyente de los paneles sánduche fue el valor promedio del ensayo antes descrito, donde: la conductividad del tablero de polvillo de coco fue 0,078 W/mK, para el no tejido de fibra 0,045 W/mK y para la escayola 0,177 W/mK.

Tabla 3.17. Coeficiente de resistividad térmica para paneles tipo sánduche de núcleo espesor variable

Tipo de panel	Resistividad térmica total por simulación [m ² K/W]	Resistividad térmica total teórica [m ² K/W]	Error asociado [%]
Tipo 1 (núcleo 15 mm)	0,797	0,655	21,61
Tipo 1 (núcleo 30 mm)	1,138	0,989	15,10
Tipo 1 (núcleo 45 mm)	1,479	1,322	11,87
Tipo 2 (núcleo 15 mm)	0,665	0,535	24,39
Tipo 2 (núcleo 30 mm)	1,005	0,868	15,80
Tipo 2 (núcleo 45 mm)	1,346	1,201	12,05

(Fuente: Propia)

La caracterización térmica de los distintos materiales empleados consiste en cuantificar de manera experimental el coeficiente de conductividad térmica. De manera que los tableros con 0,078 W/mK se clasifican como aglomerados de madera, el no tejido de fibra con 0,045 W/mK se categoriza como aislante y la escayola con 0,177 W/mK es parte de los morteros.

Para la evaluación de los paneles tipo sánduche se cuantificó la resistencia térmica total mediante simulación, apreciándose que existe una relación proporcional entre el incremento de espesor del núcleo y la resistencia térmica total. Por otro lado, los paneles tipo 1 presentan mayor resistencia al flujo de calor en comparación con los paneles tipo 2, por lo cual resulta conveniente emplear la configuración de tableros de polvillo de coco con núcleo de fibra de la misma naturaleza. De manera generalizada, se aprecia que los paneles elaborados presentan una resistencia térmica total (0,665 a 1,479 m²K/W.) afín con los paneles comercializados por CALAMINON con núcleo de 50 mm de lana de roca, cuyo valor es de 1,44 m²K/W.

3.5. Ensayos acústicos de tableros a base de polvillo de coco

Para la caracterización acústica del tablero de polvillo de coco se empleó el tubo de impedancia el mismo que está regido por las normas ISO 10534-2 / ASTM E1050-12, para ello se requirieron muestras 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.10.

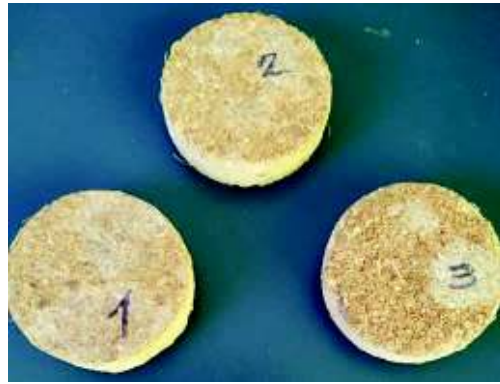


Figura 3.10. Muestras de tablero de polvillo de coco.

(Fuente: Propia)

3.5.1. Evaluación del coeficiente de absorción acústica para tablero de polvillo de coco

Para la evaluación del coeficiente global de absorción acústica se requiere una adaptación de la norma ISO 11654, la misma que muestra los valores de la curva de referencia que es con la que se compara los valores obtenidos durante el ensayo, como se muestra en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Coeficiente global de absorción acústica para tablero de polvillo de coco.

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación desfavorable
250	0,07	0,80	0,00	0,00
500	0,09	1,00	0,20	0,11
1000	0,13	1,00	0,20	0,07
2000	0,51	1,00	0,20	0,00
4000	0,30	0,90	0,10	0,00
		-0,8	suma desviación (<= 0,1)	0,17
		aw = 0,2 (H)		
H				

(Fuente: Propia)

3.5.2. Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para tablero de polvillo de coco

Para la evaluación de la pérdida de transmisión sonora se empleó lo estipulado en la norma ASTM E413-16 donde se muestra el procedimiento a seguir para obtener un índice global de pérdida de transmisión sonora, como se observa en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Pérdida de transmisión sonora para tablero de polvillo de coco en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor referencia [dB]	Desviación desfavorable	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	27,70	-16	14	5,09	18,38
160	26,70	-13	17	6,33	23,69
200	26,34	-10	20	6,05	22,95
250	26,40	-7	23	5,99	22,69
315	26,47	-4	26	5,75	21,73
400	26,63	-1	29	5,61	21,05
500	27,15	0	30	5,54	20,41
630	27,75	1	31	5,50	19,83
800	28,42	2	32	5,44	19,16
1000	29,30	3	33	5,45	18,62
1250	30,30	4	34	5,66	18,68
1600	31,18	4	34	5,79	18,57
2000	31,86	4	34	5,81	18,25
2500	30,97	4	34	5,05	16,32
3150	30,37	4	34	4,24	13,94
4000	32,08	4	34	5,14	16,02

30

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.11 se muestran las curvas obtenidas durante el ensayo y la curva desplazada. La curva desplazada se ajusta hasta que las desviaciones desfavorables sumen un valor menor o igual a 32; los puntos de la curva obtenida del ensayo se ubican por encima de la curva desplazada.

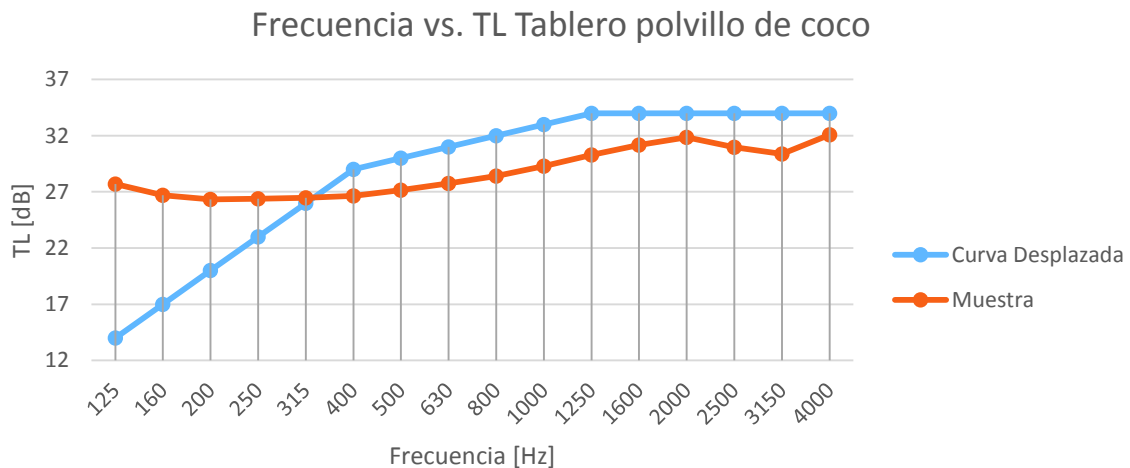


Figura 3.11. Frecuencia vs. pérdida de transmisión sonora para el tablero de polvillo de coco

(Fuente: Propia)

3.6. Ensayos acústicos de no tejidos de fibra de coco

Para la caracterización acústica del no tejido de coco se empleó nuevamente el tubo de impedancia, para ello se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Muestras de no tejido de fibra de coco.

(Fuente: Propia)

3.6.1. Evaluación del coeficiente de absorción acústica para no tejido de fibra de coco

Para la evaluación del coeficiente global de absorción acústica se requiere una adaptación de la norma ISO 11654, la misma que muestra los valores de la curva de referencia la cual es la base para comparar los valores obtenidos durante el ensayo, como se muestra en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Coeficiente global de absorción acústica para no tejido de coco

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación Desfavorable
250	0,09	0,80	0,00	0,00
500	0,11	1,00	0,20	0,09
1000	0,14	1,00	0,20	0,06
2000	0,26	1,00	0,20	0,00
4000	0,43	0,90	0,10	0,00
		-0,8	suma desviación (<= 0,1)	0,14
		aw = 0,2 (H)		
H				

(Fuente: Propia)

3.6.2. Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para no tejido de fibra de coco

Para la evaluación de la pérdida de transmisión sonora se empleó lo estipulado en la norma ASTM E413-16 donde se muestra el procedimiento a seguir para obtener un índice global de pérdida de transmisión sonora. En la Tabla 3.21 se muestran los valores obtenidos durante el ensayo y los valores de referencia aportados en la norma antes mencionada.

Tabla 3.21. Pérdida de transmisión sonora para no tejido de fibra de coco.

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor referencia [dB]	Desviación desfavorable	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	-1,92	-16	-14	0,28	-14,66
160	0,25	-13	-11	0,19	74,73
200	0,80	-10	-8	0,10	13,13
250	0,64	-7	-5	0,04	6,83
315	0,70	-4	-2	0,02	2,77
400	0,78	-1	1	0,04	4,64
500	0,89	0	2	0,05	5,17
630	0,92	1	3	0,04	4,85
800	0,94	2	4	0,04	4,46
1000	1,06	3	5	0,05	4,57
1250	1,18	4	6	0,05	4,42
1600	1,35	4	6	0,05	4,06
2000	1,52	4	6	0,05	3,55
2500	1,80	4	6	0,06	3,20
3150	2,04	4	6	0,09	4,40
4000	2,26	4	6	0,10	4,24
		2			

(Fuente: Propia)

El índice global de transmisión sonora para el no tejido de fibra de coco es sumamente bajo, por lo cual la curva desplazada alcanzó valores fuera de lo establecido en la norma. Dicha norma indica que la diferencia entre desviaciones desfavorables en la misma frecuencia no debe ser mayor a 8, por lo tanto como se observa en la Figura 3.13 no cumple con lo estipulado. Sin embargo, cabe considerar que para los fines de este trabajo investigativo se adaptó la norma.

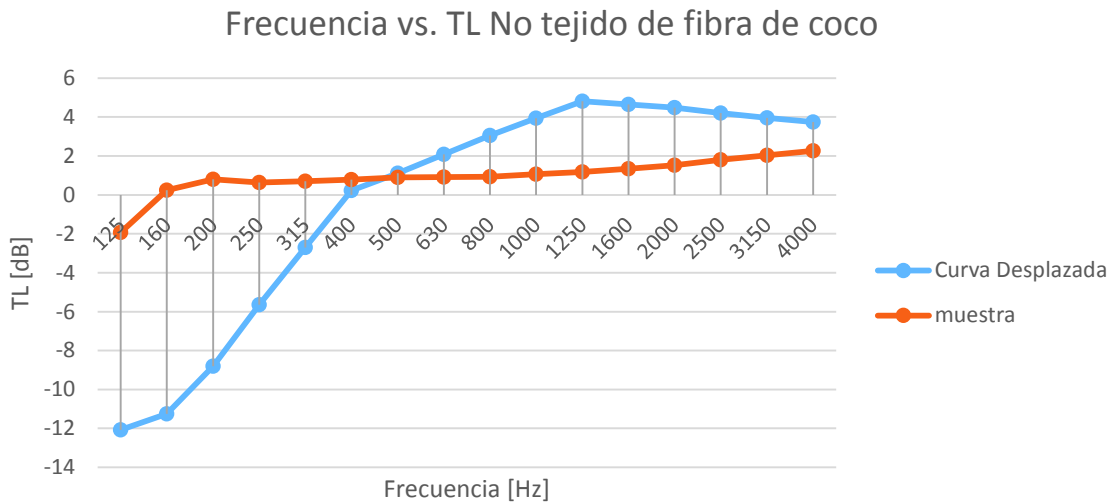


Figura 3.13. Frecuencia vs. pérdida de transmisión sonora, No tejido de fibra de coco
(Fuente: Propia)

3.7. Evaluación acústica de escayola

Para la caracterización acústica la escayola se empleó el tubo de impedancia, para ello se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.14.



Figura 3.14. Muestras de escayola.
(Fuente: Propia)

3.7.1. Evaluación del coeficiente de absorción acústica para escayola

En la Tabla 3.22 se presentan los valores obtenidos de coeficiente de absorción en banda de octavas durante el ensayo para las muestras de escayola y los valores de referencia de la norma ISO 11654 con los cuales se compara para encontrar el valor de absorción global.

Tabla 3.22. Coeficiente global de absorción acústica para escayola.

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación desfavorable
250	0,07	0,80	-0,05	0,00
500	0,09	1,00	0,15	0,06
1000	0,11	1,00	0,15	0,04
2000	0,47	1,00	0,15	0,00
4000	0,34	0,90	0,05	0,00
		-0,85	suma desviación (<= 0,1)	0,10
		aw = 0,15 (HH)		
H				

(Fuente: Propia)

3.7.2. Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para escayola

En la Tabla 3.23 se muestran los valores obtenidos de pérdida de transmisión sonora durante el ensayo y los valores de referencia aportados en la norma ASTM E413-16.

Tabla 3.23. Pérdida de transmisión sonora para escayola.

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor referencia [dB]	Desviación desfavorable	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	13,49	-16	4	6,23	46,16
160	13,80	-13	7	5,62	40,72
200	14,13	-10	10	4,97	35,21
250	14,24	-7	13	4,31	30,26
315	14,66	-4	16	3,68	25,13
400	15,20	-1	19	3,14	20,69
500	15,75	0	20	2,58	16,38
630	16,23	1	21	2,04	12,55
800	17,53	2	22	2,07	11,83
1000	19,17	3	23	2,27	11,82
1250	19,56	4	24	2,05	10,49
1600	20,69	4	24	2,29	11,08
2000	21,50	4	24	2,00	9,31
2500	22,01	4	24	1,58	7,18
3150	23,31	4	24	2,11	9,03
4000	24,76	4	24	3,01	12,14
		20			

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.15 se presentan las curvas de las muestras ensayadas y la curva desplazada, donde se puede observar que la curva desplazada se ubica por encima de la curva obtenida a partir de 315 Hz. De igual manera, al ser una adaptación de la norma no se cumple estrictamente lo estipulado en la misma, por lo tanto, se ha tomado el valor de reducción sonora global, solo cuando la suma de desviaciones desfavorables llegue al valor citando en norma.

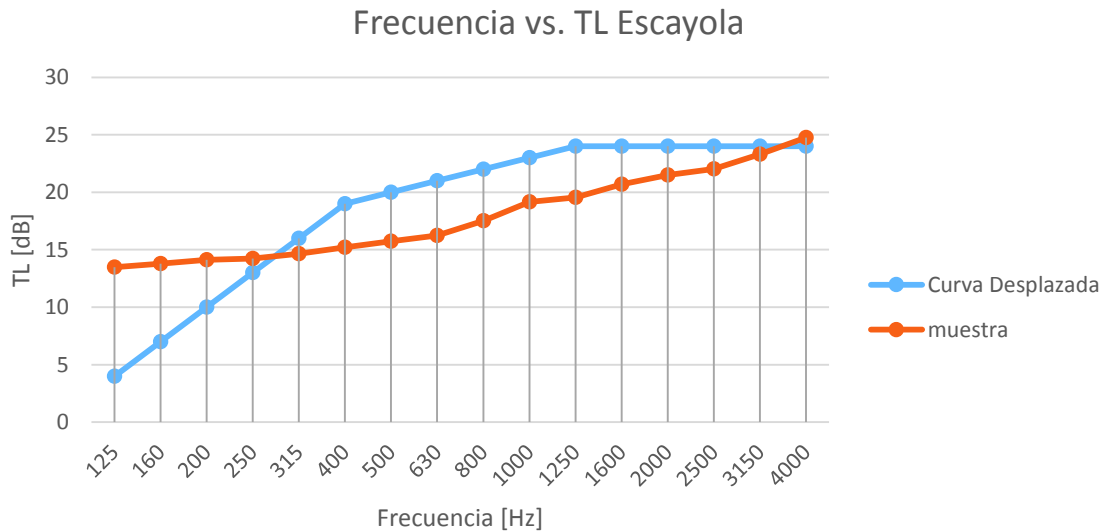


Figura 3.15. Frecuencia vs. pérdida de transmisión sonora, Escayola
(Fuente: Propia)

3.8. Evaluación del coeficiente de absorción acústica para paneles tipo sánduche

El panel tipo 1 está conformado por dos tableros de polvillo de coco que cumplen con la función de soporte y núcleo no tejido de fibra. En la Figura 3.16 se presenta el set de muestras preparadas para los ensayos que se describen en la sección subsiguiente.



Figura 3.16. Muestras de panel tipo 1.

(Fuente: Propia)

3.8.1. Panel tipo 1: núcleo de 15 mm

En la Tabla 3.24 se presentan los valores obtenidos de coeficiente de absorción en banda de octavas durante el ensayo y los valores de referencia de la norma ISO 11654 con los cuales se compara para encontrar el valor de absorción global. Al igual que los elementos constituyentes, para los paneles sánduche se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.17.



Figura 3.17. Muestras de panel tipo 1 con núcleo de 15 mm.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.24. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 15 mm).

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación desfavorable
250	0,19	0,80	0,25	0,06
500	0,45	1,00	0,45	0,00
1000	0,80	1,00	0,45	0,00
2000	0,34	1,00	0,45	0,11
4000	0,20	0,90	0,35	0,15
		-0,55	suma desviación (<= 0,1)	0,17
		aw = 0,45 (M)		
M				

(Fuente: Propia)

3.8.2. Panel tipo 1: núcleo de 30 mm

Se presentan los valores obtenidos de coeficiente de absorción en banda de octavas durante el ensayo y los valores de referencia de la norma ISO 11654 con los cuales se compara para encontrar el valor de absorción global como se muestra en la Tabla 3.25. Para los paneles sánduche se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.18.



Figura 3.18. Muestras de panel tipo 1 con núcleo de 30 mm.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.25. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 30 mm).

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación desfavorable
250	0,28	0,80	0,20	0,00
500	0,74	1,00	0,40	0,00
1000	0,65	1,00	0,40	0,00
2000	0,23	1,00	0,40	0,17
4000	0,20	0,90	0,30	0,10
		-0,6	suma desviación (<= 0,1)	0,17
		aw = 0,4 (M)		
M				

(Fuente: Propia)

3.8.3. Panel tipo 1: núcleo de 45 mm

Para los paneles sánduche se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.19. Se presentan los valores obtenidos de coeficiente de absorción en banda de octavas durante el ensayo y los valores de referencia de la norma ISO 11654 con los cuales se compara para encontrar el valor de absorción global, los cuales se pueden observar en la Tabla 3.26.



Figura 3.19. Muestras de panel tipo 1 con núcleo de 45 mm.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.26. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 45 mm).

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación desfavorable
250	0,46	0,80	0,20	0,00
500	0,83	1,00	0,40	0,00
1000	0,49	1,00	0,40	0,00
2000	0,25	1,00	0,40	0,15
4000	0,20	0,90	0,30	0,10
		-0,6	suma desviación (<= 0,1)	0,15
aw = 0,4 (LM)				
L				
M				

(Fuente: Propia)

Los paneles tipo 2 están conformados por dos tableros de escayola y núcleo de no tejido de fibra de coco. En la Figura 3.20 se presentan las muestras preparadas para los ensayos acústicos realizados.



Figura 3.20. Muestras de panel tipo 2.

(Fuente: Propia)

3.8.4. Panel tipo 2: núcleo de 15 mm

Se presentan los valores obtenidos de coeficiente de absorción en banda de octavas durante el ensayo y los valores de referencia de la norma ISO 11654 con los cuales se compara para encontrar el valor de absorción global, los cuales se pueden observar en la Tabla 3.27. Para los paneles sánduche se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.21.



Figura 3.21. Muestras de panel tipo 2 con núcleo de 15 mm.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.27. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 15 mm).

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación desfavorable
250	0,06	0,80	-0,05	0,00
500	0,07	1,00	0,15	0,08
1000	0,09	1,00	0,15	0,06
2000	0,20	1,00	0,15	0,00
4000	0,24	0,90	0,05	0,00
		-0,85	suma desviación (<= 0,1)	0,14
		$a_w = 0,15$ ()		

(Fuente: Propia)

3.8.5. Panel tipo 2: núcleo de 30 mm

Se presentan los valores obtenidos de coeficiente de absorción en banda de octavas durante el ensayo y los valores de referencia de la norma ISO 11654 con los cuales se compara para encontrar el valor de absorción global, los cuales se pueden observar en la Tabla 3.28. Para los paneles sánduche se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro, como se muestra en la Figura 3.22.

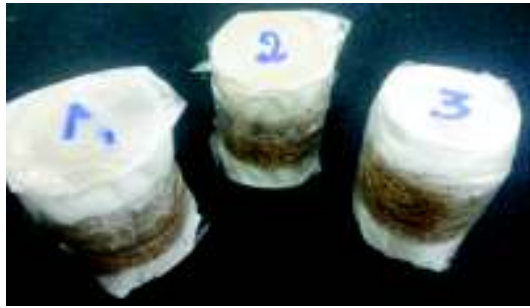


Figura 3.22. Muestras de panel tipo 2 con núcleo de 30 mm.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.28. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 30 mm).

Frecuencia Hz	α_s	Curva de referencia	Referencia desplazada	Desviación desfavorable
250	0,09	0,80	-0,05	0,00
500	0,09	1,00	0,15	0,06
1000	0,10	1,00	0,15	0,05
2000	0,14	1,00	0,15	0,01
4000	0,20	0,90	0,05	0,00
		-0,85	suma desviación ($\leq 0,1$)	0,12
		aw = 0,15 ()		

(Fuente: Propia)

3.8.6. Panel tipo 2: núcleo de 45 mm

Para los paneles sánduche se prepararon tres muestras de 35 mm de diámetro como se muestra en la Figura 3.23. Se presentan los valores obtenidos de coeficiente de absorción en banda de octavas durante el ensayo y los valores de referencia de la norma ISO 11654 con los cuales se compara para encontrar el valor de absorción global, los mismos que se pueden observar en la Tabla 3.29.



Figura 3.23. Muestras de panel tipo 2 con núcleo de 45 mm.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.29. Coeficiente global de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 45 mm).

Frecuencia Hz	α_s	Curva de Referencia	Referencia Desplazada	Desviación desfavorable
250	0,07	0,80	-0,05	0,00
500	0,08	1,00	0,15	0,07
1000	0,12	1,00	0,15	0,03
2000	0,18	1,00	0,15	0,00
4000	0,24	0,90	0,05	0,00
		-0,85	suma desviación (<= 0,1)	0,10
		aw = 0,15 ()		

(Fuente: Propia)

Para la evaluación acústica de los paneles y componentes de los mismos se tomaron tres muestras para cada tipo de material y por medio del software incorporado del tubo de impedancias ACUPRO se obtuvieron coeficientes de absorción sonora en tercia de octavas (ver Anexo VIII.). Los coeficientes globales fueron obtenidos mediante adaptación de la norma ISO 11645:1993 donde se obtuvieron valores de coeficiente global de absorción acústica de 0,20 para tablero de polvillo de coco y no tejido y 0,15 para la escayola. Por otro lado, los paneles sánduche tipo 1 obtuvieron valores de coeficiente global de absorción acústica de 0,40 en todas sus configuraciones. Sin embargo, los paneles sánduche tipo 2 no mejoraron sus valores de coeficiente de absorción en ninguna configuración, manteniendo un coeficiente global de 0,15. El panel sánduche de 80 mm con núcleo de lana de roca comercializador por ACH alcanza un índice de absorción acústica de 0,90 con lo cual se demuestra que los materiales elaborados no son materiales absorbentes acústicos.

3.9. Evaluación de la pérdida de transmisión sonora para paneles tipo sánduche

3.9.1. Panel tipo 1: núcleo de 15 mm

Para la evaluación de la pérdida de transmisión sonora se emplearon las mismas muestras con las que se ensayaron para el coeficiente de absorción acústica, sin embargo, para este ensayo se requirió añadir a las muestras una capa de cinta adhesiva que ajuste las muestras al tubo, puesto que, si las muestras tenían holgura dentro del tubo, las vibraciones producidas por los micrófonos empujaban la muestra y el ensayo quedaba invalidado. Los

valores obtenidos durante el ensayo son presentados en la Tabla 3.30, conjuntamente con los valores de referencia indicados en la norma ASTM E413-16.

Tabla 3.30. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 1 (núcleo 15 mm).

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	26,06	-16	25	10,42	39,99
160	29,12	-13	28	12,32	42,32
200	30,40	-10	31	12,56	41,32
250	31,65	-7	34	13,11	41,43
315	33,27	-4	37	13,71	41,21
400	33,97	-1	40	13,49	39,72
500	35,04	0	41	13,79	39,36
630	39,58	1	42	17,65	44,61
800	38,59	2	43	15,69	40,66
1000	41,92	3	44	17,22	41,09
1250	44,27	4	45	19,43	43,88
1600	46,33	4	45	21,31	46,00
2000	44,63	4	45	20,35	45,61
2500	44,90	4	45	20,55	45,76
3150	44,95	4	45	20,56	45,75
4000	46,17	4	45	20,37	44,11
		41			

(Fuente: Propia)

La curva obtenida de las muestras es muy parecida a la curva desplazada, lo cual se puede observar en la Figura 3.24, ubicándose en las frecuencias de 250 a 1 000 Hz los únicos puntos donde la curva desplazada es mayor que la curva obtenida.

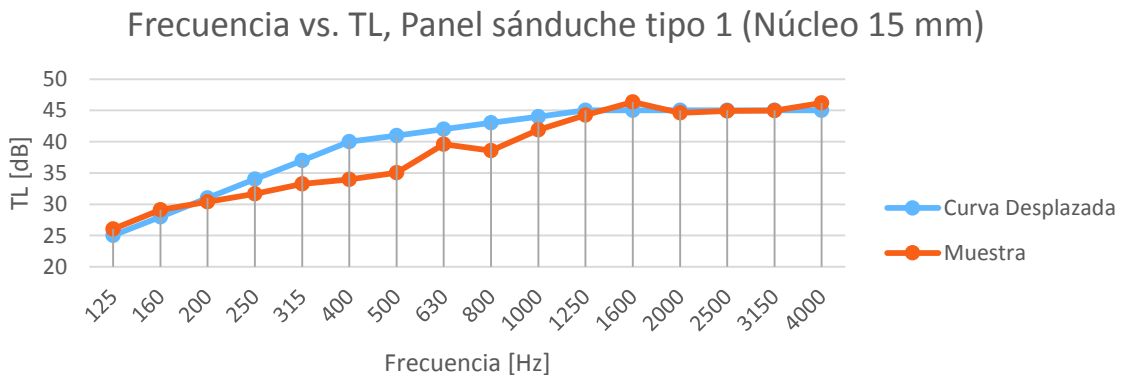


Figura 3.24. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 1 (Núcleo 15 mm)

(Fuente: Propia)

3.9.2. Panel tipo 1: núcleo de 30 mm

Los valores obtenidos en el ensayo de pérdida de transmisión sonora se presentan en tercia de octavas, es decir, desde 125 a 4 000 Hz, dichos valores son presentados a continuación en la Tabla 3.31, conjuntamente con los valores de referencia indicados en la norma ASTM E413-16.

Tabla 3.31. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 1 (núcleo 30 mm).

Frecuencia [Hz]	TL dB	Valores referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	30,46	-16	30	10,32	33,87
160	32,59	-13	33	10,65	32,66
200	35,12	-10	36	12,20	34,74
250	37,04	-7	39	13,59	36,70
315	37,85	-4	42	13,80	36,47
400	38,57	-1	45	13,76	35,66
500	39,64	0	46	13,80	34,82
630	44,00	1	47	16,67	37,87
800	44,82	2	48	15,75	35,14
1000	45,41	3	49	15,07	33,19
1250	49,65	4	50	19,02	38,30
1600	52,72	4	50	21,89	41,52
2000	50,43	4	50	19,41	38,50
2500	50,65	4	50	18,29	36,10
3150	50,40	4	50	17,07	33,88
4000	51,14	4	50	17,40	34,02
		46			

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 3.25, la curva desplazada se ubica por encima de la curva obtenida de las muestras ensayadas, la misma que obtiene un valor sobre la curva desplazada en la frecuencia de 1 600 Hz. Los valores que se representan en la figura están evaluados en tercia de octavas.

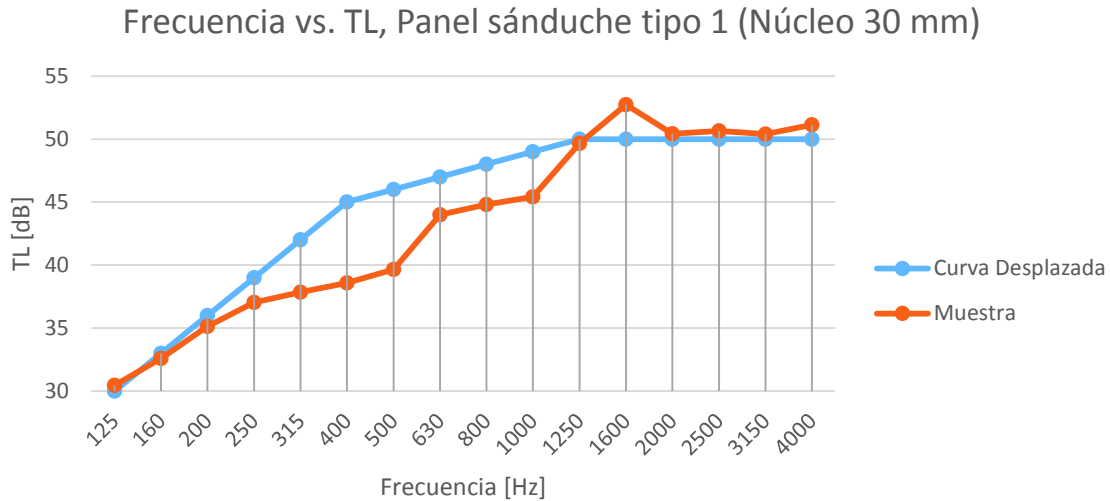


Figura 3.25. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 1 (Núcleo 30 mm)
(Fuente: Propia)

3.9.3. Panel tipo 1: núcleo de 45 mm

Se presentan los valores obtenidos en el ensayo de pérdida de transmisión sonora en tercia de octavas, así como los valores de referencia aportados desde la norma ASTM E413-16 necesarios para encontrar el índice global de pérdida de transmisión sonora. Dichos valores se observan en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 1 (núcleo 45 mm).

Frecuencia [Hz]	TL dB	Valor referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	33,98	-16	33	5,14	15,12
160	37,84	-13	36	6,77	17,90
200	39,11	-10	39	7,86	20,10
250	40,75	-7	42	9,59	23,53
315	41,67	-4	45	10,17	24,40
400	42,91	-1	48	10,65	24,82
500	44,27	0	49	11,08	25,03
630	47,93	1	50	13,61	28,39
800	49,14	2	51	13,92	28,33
1000	49,48	3	52	13,86	28,02
1250	51,90	4	53	15,88	30,61
1600	53,27	4	53	16,94	31,80
2000	52,39	4	53	15,50	29,58

Tabla 3.32. Continuación

Frecuencia [Hz]	TL dB	Valor referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
2500	50,39	4	53	13,33	26,46
3150	54,52	4	53	16,17	29,67
4000	58,93	4	53	18,53	31,44
		49			

(Fuente: Propia)

Para el panel sánduche tipo 1 con núcleo de 45 mm de espesor presenta una curva muy similar a la curva desplazada, como se puede observar en la Figura 3.26, son pocos puntos dentro de las frecuencias de la tercia de octavas donde la curva obtenida durante el ensayo de las muestras se encuentra por debajo de la curva desplazada.

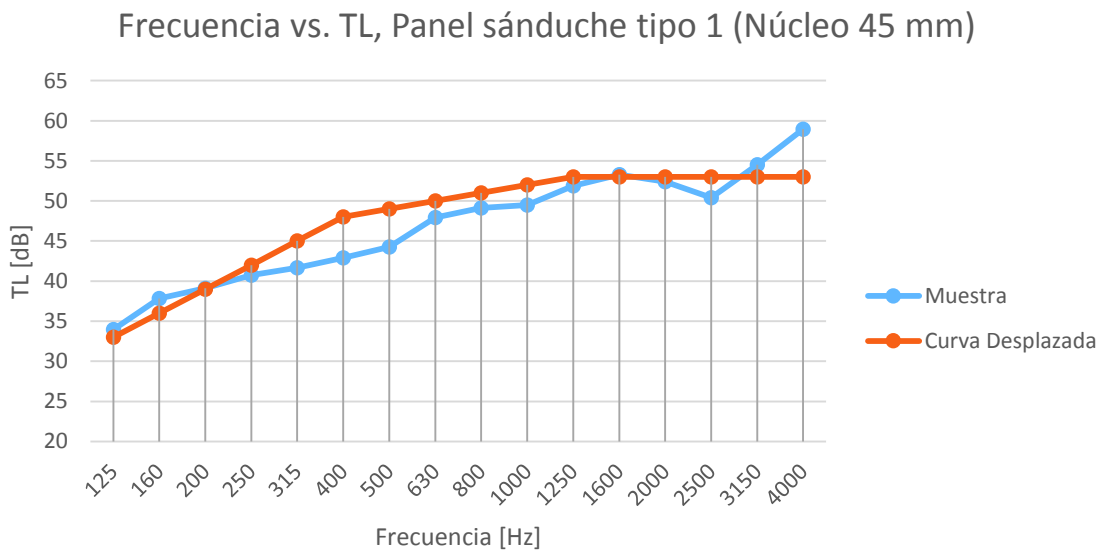


Figura 3.26. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 1 (Núcleo 45 mm)

(Fuente: Propia)

3.9.4. Panel tipo 2: núcleo de 15 mm

Para la configuración de panel sánduche tipo 2, se emplean las mismas muestras que se utilizaron para el ensayo de absorción acústica, de igual manera se requiere que las muestras se acoplen sin holgura dentro del tubo de impedancia. Los valores registrados durante el ensayo se muestran en la Tabla 3.33, así como los valores de referencia que son tomados de la norma ASTM E413-16.

Tabla 3.33. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 2 (núcleo 15 mm).

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	33,07	-16	25	11,81	35,71
160	34,55	-13	28	11,47	33,19
200	36,86	-10	31	12,59	34,16
250	37,45	-7	34	12,85	34,30
315	37,19	-4	37	12,09	32,50
400	37,32	-1	40	11,32	30,32
500	37,75	0	41	10,29	27,25
630	38,81	1	42	8,91	22,96
800	39,80	2	43	6,92	17,39
1000	41,24	3	44	4,96	12,02
1250	42,25	4	45	3,38	8,00
1600	42,95	4	45	2,79	6,50
2000	42,02	4	45	2,04	4,85
2500	42,75	4	45	0,54	1,26
3150	44,42	4	45	1,83	4,12
4000	44,51	4	45	3,04	6,83

41

(Fuente: Propia)

Los paneles sánduche tipo 2 con núcleo de 15 mm de no tejido de coco muestran una curva donde en las frecuencias de 125 a 250 Hz los valores se ubican sobre la curva desplazada, como se observa en la Figura 3.27.

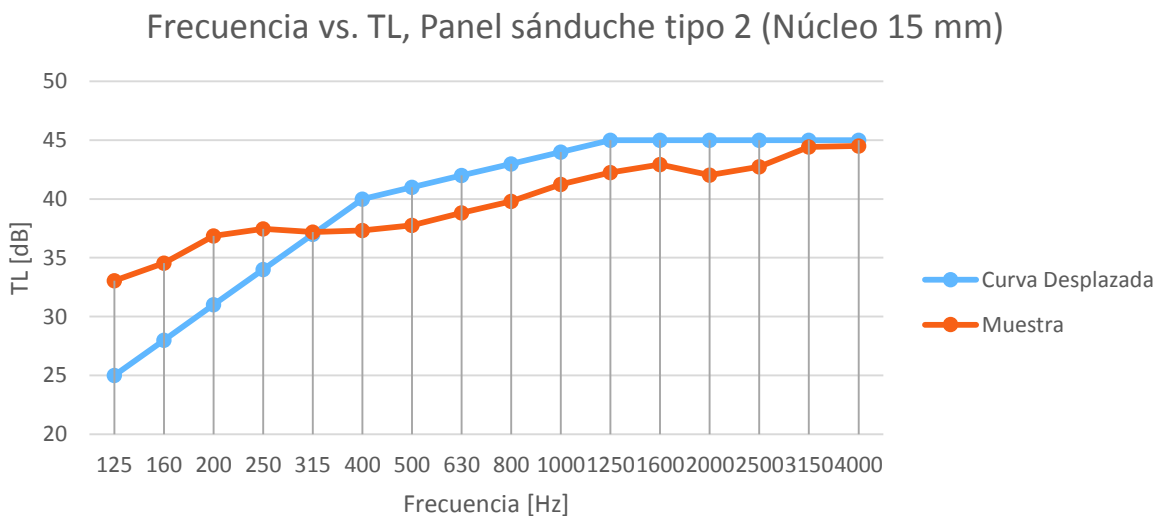


Figura 3.27. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 2 (Núcleo 15 mm)

(Fuente: Propia)

3.9.5. Panel tipo 2: núcleo de 30 mm

Los valores obtenidos para el panel sánduche tipo 2 con núcleo de no tejido de coco de 30 mm se presentan en la Tabla 3.34, de igual manera se presentan los valores de la curva de referencia los cuales son tomados de la norma ASTM E413-16.

Tabla 3.34. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 2 (núcleo 30 mm).

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor de referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	34,84	-16	28	6,90	19,79
160	35,45	-13	31	8,46	23,85
200	36,74	-10	34	7,13	19,40
250	37,47	-7	37	6,59	17,59
315	38,47	-4	40	5,26	13,66
400	40,13	-1	43	3,83	9,55
500	41,63	0	44	2,36	5,66
630	43,93	1	45	1,47	3,34
800	43,63	2	46	1,14	2,61
1000	43,58	3	47	1,99	4,56
1250	44,52	4	48	2,73	6,13
1600	45,38	4	48	2,42	5,34
2000	44,35	4	48	1,79	4,04
2500	47,93	4	48	0,27	0,57
3150	48,39	4	48	2,79	5,77
4000	49,71	4	48	5,85	11,76
		44			

(Fuente: Propia)

Para esta configuración de panel sánduche la curva obtenida durante el ensayo es muy similar en a la curva desplazada como se observa en la Figura 3.28, los puntos de la curva obtenida en el ensayo en bajas frecuencias se encuentran por debajo de la curva desplazada.

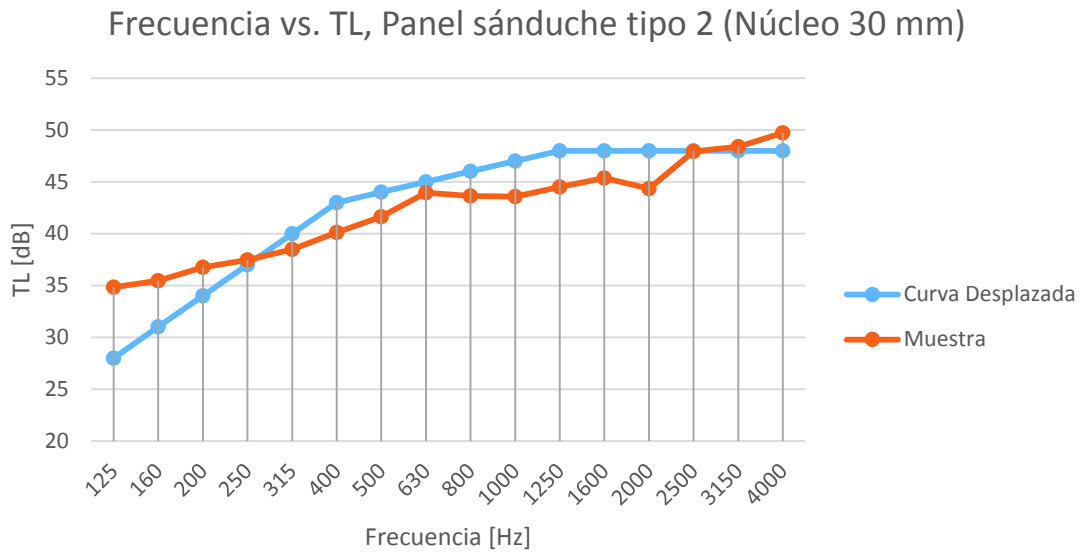


Figura 3.28. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 2 (Núcleo 30 mm)
(Fuente: Propia)

3.9.6. Panel tipo 2: núcleo de 45 mm

Los valores obtenidos para el panel sánduche tipo 2 con núcleo de no tejido de coco de 45 mm se presentan en la Tabla 3.35, de igual manera se presentan los valores de la curva de referencia los cuales son tomados de la norma ASTM E413-16.

Tabla 3.35. Pérdida de transmisión sonora para paneles sánduche tipo 2 (núcleo 45 mm).

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
125	39,16	-16	29	5,03	12,85
160	40,76	-13	32	3,71	9,11
200	41,08	-10	35	2,64	6,43
250	41,84	-7	38	2,52	6,02
315	41,95	-4	41	1,83	4,36
400	42,15	-1	44	1,69	4,02
500	42,11	0	45	1,57	3,72
630	43,21	1	46	1,77	4,10
800	42,79	2	47	1,76	4,11
1000	43,36	3	48	2,08	4,79
1250	44,44	4	49	3,62	8,14
1600	45,48	4	49	6,28	13,81
2000	46,18	4	49	4,92	10,65
2500	47,51	4	49	5,45	11,47

Tabla 3.35. Continuación

Frecuencia [Hz]	TL [dB]	Valor referencia [dB]	Curva desplazada [dB]	Desviación estándar	Coefficiente de variación [%]
3150	47,08	4	49	4,07	8,65
4000	51,05	4	49	2,81	5,50
		45			

(Fuente: Propia)

La última configuración de panel sánduche tipo 2 con núcleo de 45 mm de espesor obtiene una curva cuyos valores en las frecuencias de 125 a 315 Hz se ubican por encima de la curva desplazada, lo cual se puede observar en la Figura 3.29.

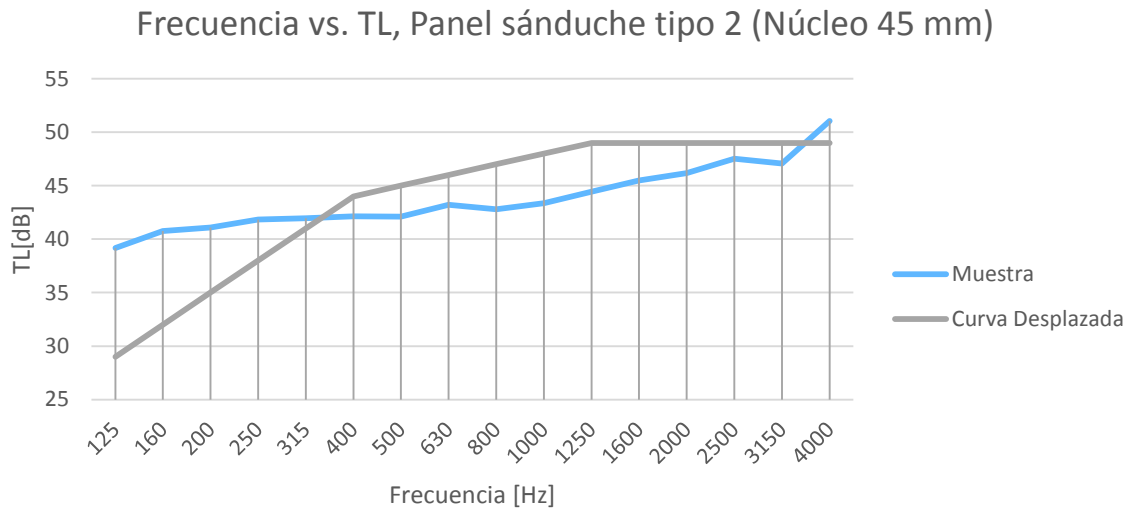


Figura 3.29. Frecuencia vs. TL, Panel sánduche tipo 2 (Núcleo 45 mm)

(Fuente: Propia)

Los tableros de polvillo de coco alcanzaron valores de pérdida de transmisión sonora de 30 dB, el no tejido de fibra de coco de 2 dB y la escayola de 17 dB, considerando que para aplicaciones como separadores de oficina y ambientación de espacios se necesita que los materiales reduzcan al menos 35 dB [27], en tal virtud no se podrían emplearlos por si solos.

Los paneles sánduche tipo 1 de configuración con núcleo de 45 mm presentaron el mayor índice de pérdida de transmisión sonora, con un valor de 49 dB. Seguidos de los paneles sánduche tipo 2 que presentaron un índice de pérdida de transmisión de 45 dB con un núcleo de 45 mm de espesor. Cabe destacar que la pérdida de transmisión sonora es

mayor cuando se incrementa el número de núcleos de los paneles, de esta manera se categoriza como materiales aislantes a todas las configuraciones presentes puesto que la pérdida de transmisión sonora es mayor a los 33 dB.

El panel tipo 1 con núcleo de 45 mm presenta mejor desempeño acústico que las diferentes configuraciones de paneles elaborados, el índice de pérdida de transmisión sonora se cuantifica en 49 dB, dicho valor es comparable con paneles comerciales ACH¹¹, que están conformados por un núcleo de lana de roca de 80 mm de espesor y caras exteriores de acero, los cuales alcanzan índices de aislamiento globales de 35,1 dB A y 36 dB B.

3.10. Síntesis de resultados

A continuación, se presenta de manera sintetizada las características mecánicas, térmicas y acústicas de todos los materiales detallados a lo largo de este trabajo investigativo. En la Tabla 3.36 se muestran los valores alcanzados para el tablero a base de polvillo de coco con partículas de 2 mm a 600 μm y urea formaldehído en una concentración másica de 30 %. El tablero fue elaborado con una presión de moldeo de 2,82 MPa y alcanzó una densidad de 819,20 kg/m³. Además, se describen características de los tableros de coco elaborados por “Coir Board”, de los tableros aglomerados de madera descrita por la FAO y de la escayola empleada para el ensamble de paneles tipo sánduche.

Tabla 3.36. Comparación de resultados para ensayos mecánicos de tableros a base de polvillo de coco y escayola.

Procedencia	Resistencia última tracción paralela [MPa]	Resistencia última a flexión [MPa]	Módulo de elasticidad flexión [MPa]	Absorción de agua [%]	Contenido de humedad [%]	Incremento de espesor [%]
Propio	2,07	4,00	362,59	91,58	0,34	0,19
Escayola	-	15,69	2 451,62	4,30	-	-
Coir Board	0,25	50,00	4 000, 00	-	5-15	5
FAO	1,47-3,43	1,47-5,39	166,71-862,99	15-60	-	5-15

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.30 se aprecia el comportamiento mecánico del tablero a base de polvillo de coco, considerando que el esfuerzo máximo de 4 MPa alcanza una deformación de 1,3 %, posteriormente el material se fractura.

Comportamiento esfuerzo - deformación del tablero de polvillo de coco con 30%UF-2,82MPa

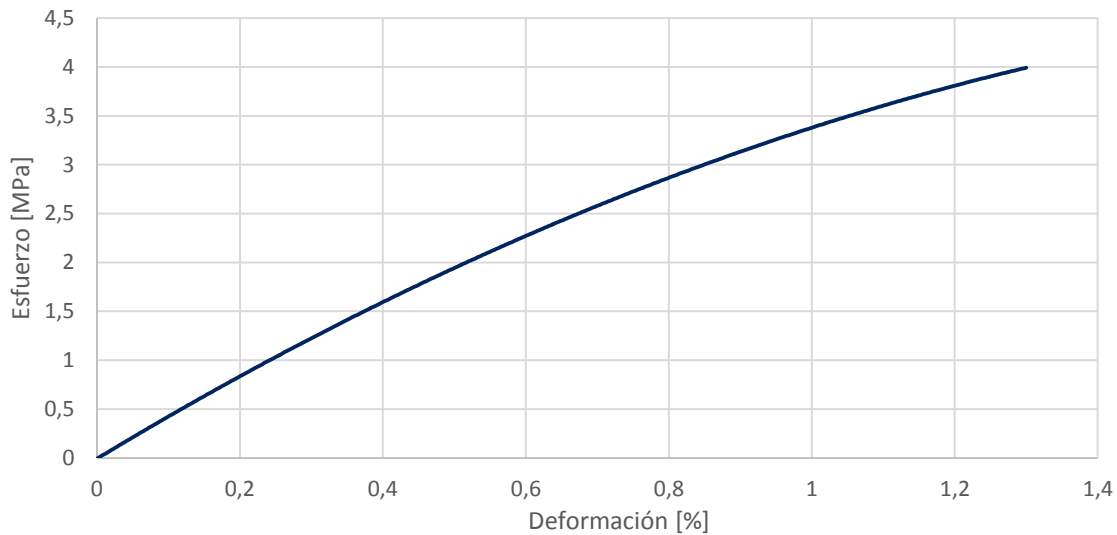


Figura 3.30. Curva esfuerzo vs deformación del tablero de polvillo de coco con 30% de resina UF. (Fuente: Propia)

El esfuerzo de cizallamiento al núcleo de las estructuras sánduche tipo 1 y 2 con núcleo de fibra no tejida de coco se compararon con los paneles sánduche cuyo núcleo fue realizado con espuma de perlita, silicato de sodio y piel de papel. En la Tabla 3.37 se aprecian los valores reportados de manera esquematizada.

Tabla 3.37. Ensayo mecánico para paneles tipo sánduche.

Material	Propio				Sánduche con espuma de perlita, silicato de sodio y papel
	Panel tipo 1		Panel tipo 2		
Característica	15 mm núcleo	45 mm núcleo	15 mm núcleo	45 mm núcleo	180 mm núcleo
	Esfuerzo de cizallamiento al núcleo [kPa]				
Promedio	44,06	20,63	71,27	35,04	66-88
Desviación Estándar	5,34	3,31	14,22	5,39	0,008
Coefficiente de Variación [%]	12,11	16,04	19,95	15,39	0,010

(Fuente: Propia)

La Figura 3.31 refleja la relación entre el esfuerzo y la deformación que presentan los paneles tipo sánduche y como se evidencia cuanto mayor el espesor del núcleo el porcentaje de deformación se incrementa. Por otro lado, el panel que soporta mayor

esfuerzo es el constituido por núcleo simple de fibra de coco y soporte de tablero a base de polvillo con una deformación menor que cualquier otra configuración.

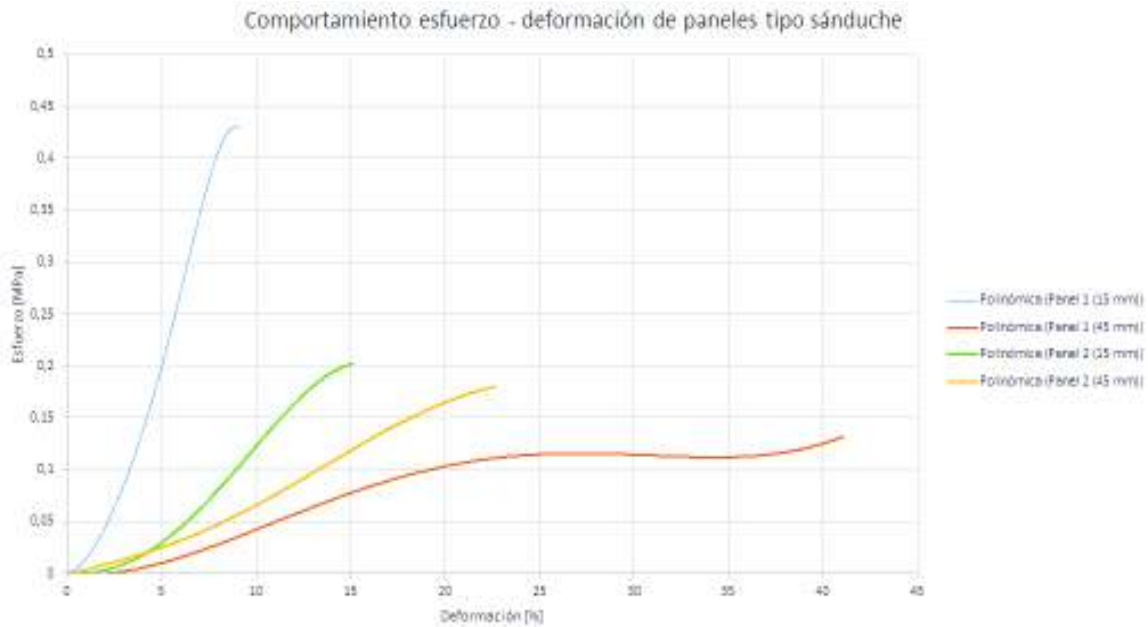


Figura 3.31. Curva esfuerzo vs deformación del tablero de polvillo de coco con 30% de resina UF. (Fuente: Propia)

La caracterización térmica de los elementos constituyentes de los paneles tipo sánduche elaborados en esta investigación se han comparado con materiales similares. Por ejemplo, el no tejido de fibra de coco se compara con lana de roca considerando la aplicación de aislante. En la Tabla 3.38 se aprecia los valores de conductividad térmica.

Tabla 3.38. Valores de conductividad térmica.

	Conductividad térmica [W/mK]				
Muestra	Tablero de polvillo 10 mm	Tablero de madera 12 mm	No tejido de fibra 15 mm	Lana de roca 40 mm	Escayola
Promedio	0,078	0,138	0,045	0,034	0,177

(Fuente: Propia)

Como ya se ha explicado anteriormente, para paneles tipo sánduche la caracterización térmica consiste en determinar la resistividad térmica de dichas estructuras. En la Tabla 3.39 se aprecian los valores resultantes por simulación con la herramienta computacional THERM para los paneles tipo 1 y 2, así como la resistividad que presentan otros paneles comerciales.

Tabla 3.39. Resistencia térmica total para paneles tipo sánduche.

Tipo de panel	Resistencia térmica total por simulación [m²K/W]
Tipo 1 (núcleo 15 mm)	0,797
Tipo 1 (núcleo 30 mm)	1,138
Tipo 1 (núcleo 45 mm)	1,479
Tipo 2 (núcleo 15 mm)	0,665
Tipo 2 (núcleo 30 mm)	1,005
Tipo 2 (núcleo 45 mm)	1,346
RocaPanel (núcleo 50 mm)	1,440
Rockboard (núcleo 40 mm)	0,738
Rockboard (núcleo 60 mm)	0,756
Rockboard (núcleo 80 mm)	0,700

(Fuente: Propia)

Para la caracterización acústica se ha medido el coeficiente de absorción y el índice de reducción sonora de los paneles tipo sánduche a base de fibra de coco y sus constituyentes, así como el panel comercial acústico ACH, dichos valores se muestran en la Tabla 3.40.

Tabla 3.40. Resumen valores globales de caracterización acústica de distintos materiales.

Material	Coefficiente de absorción α_S	Índice de reducción sonora [dB]
Tablero polvillo	0,20	30
No tejido	0,20	2
Escayola	0,15	17
Panel tipo 1 (15 mm)	0,40	41
Panel tipo 1 (30 mm)	0,40	46
Panel tipo 1 (45 mm)	0,40	49
Panel tipo 2 (15 mm)	0,15	41
Panel tipo 2 (30 mm)	0,15	44
Panel tipo 2 (45 mm)	0,15	45
Panel sánduche acústico ACH (80 mm)	0,90	36

(Fuente: Propia)

De acuerdo a los resultados obtenidos se aprecia que los materiales fabricados a partir de residuo de fibra de coco de manera independiente presentan propiedades comparables con materiales comerciales, pero al conformar paneles tipo sánduche se magnifican sus propiedades; siendo el panel tipo 1, constituido por tableros de polvillo de coco y núcleo de fibra de la misma naturaleza con espesor de 45 mm el que mejores prestaciones brinda como se observa en la Tabla 3.41.

Tabla 3.41. Validación de caracterización mecánica, térmica y acústica para paneles sánduche tipo 1 y otros materiales.

Caracterización	Mecánica	Térmica	Acústica	
Ensayo	<i>Esfuerzo de cizallamiento al núcleo [kPa]</i>	<i>Resistencia térmica total [m²K/W]</i>	<i>Coefficiente de absorción acústica</i>	<i>Índice de reducción sonora [dB]</i>
Material				
Panel tipo 1 (núcleo 45 mm)	20,63	1,479	0,40	49
Estructura sánduche con espuma de perlita, silicato de sodio y papel (núcleo 180mm)	66-88	-	-	-
RocaPanel (núcleo 50 mm)	-	1,440	-	-
Panel sánduche acústico ACH (núcleo 80mm)	-	-	0,90	36

(Fuente: Propia)

El panel tipo 1 desde el aspecto mecánico alcanza un menor esfuerzo de cizallamiento al núcleo que el panel comparativo, la caracterización térmica indica que el panel de coco a pesar, de poseer un menor núcleo presenta mayor resistividad térmica. Por otro lado, la caracterización acústica demuestra que se alcanza una mayor reducción sonora con el panel a base de residuo de coco, a pesar de no presentar un buen rendimiento como absorbente acústico.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El material no tejido que constituye el núcleo de los paneles tipo sánduche soporta una fuerza mínima y máxima de 27,5 N y 32,3 N, respectivamente; por lo que se puede afirmar que es posible manipular manualmente sin que se desagregue, lo que nos permite asegurar que son las capas externas de látex las que soportan la carga aplicada durante el ensayo.
- Gracias a los resultados preliminares de los ensayos mecánicos se determinó los parámetros de fabricación de los tableros de polvillo de coco, de tal manera que por prueba y error se llegaron a determinar que las proporciones de polvillo y resina UF son 70 y 30 % de concentración másica, respectivamente, para obtener resultados prometedores. Se puede decir que la presión aplicada es la variable notable del proceso por lo que se concluye que 2,82 MPa de presión aplicada al molde es la mejor opción; en tal virtud, las características mecánicas mejoran cuanto mayor es la concentración de urea formaldehído, como el aspecto superficial y la mojabilidad de las partículas, lo que se corrobora durante el corte para extracción de probetas y la fractura durante los ensayos mecánicos, puesto que, no existe desprendimiento de material particulado. Sin embargo, el incremento de emisiones de formol es perjudicial para la salud.
- Por los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos a los cuales fue sometido el tablero de polvillo de coco con una concentración másica de 30 % de UF, de acuerdo a la FAO se categoriza como un tablero de densidad media, pero con características de material aglomerado tipo aislante, lo que garantiza la aplicabilidad para la cual fue destinado este material. Es relevante conocer que los porcentajes de incremento de espesor y contenido de humedad luego de 24 horas de inmersión en agua son mucho menores que los rangos establecidos en normativa hindú IS15878.
- La combinación de fibra no tejido con tableros sólidos conforma un panel tipo sánduche, el cual es considerado un material compuesto, capaz de alcanzar mejores prestaciones térmicas y acústicas que los componentes individuales. Como se observa a lo largo de las evaluaciones experimentales, los resultados mejoran a

medida que se incrementa el espesor del núcleo del material no tejido, es decir del aislante.

- A nivel industrial los ensayos para caracterizar paneles tipo sánduche requieren de muestras con tamaños mayores a los obtenidos a nivel de laboratorio, lo cual representó una limitante durante el desarrollo del presente trabajo investigativo. En consecuencia, se adoptó la norma ASTM C393/C393M-16 alcanzando valores inversamente proporcionales del esfuerzo de cizallamiento en referencia al incremento del número de núcleos de fibra de coco, tanto para los paneles tipo 1 y 2.
- La escayola a pesar de ser ampliamente utilizada para crear divisiones de habitaciones y oficinas presenta resultados mayores de esfuerzo de cizallamiento al núcleo que los alcanzados con los paneles tipo sánduche constituidos por tableros de polvillo de coco y núcleo de fibra no tejida de la misma naturaleza, debido a que la fuerza soportada se le atribuye a las capas de cartón prensado que constituyen la plancha de escayola.
- La configuración de panel tipo 1 con núcleo de 45 mm es el que demuestra mejores características térmicas y acústicas, llegando a ser comparables con paneles tipo sánduche fabricados a base de lana de roca o espuma poliuretánica, puesto que alcanzan una resistividad térmica de $1,479 \text{ m}^2\text{K/W}$ y una disminución de 49 dB.
- El aprovechamiento de los desechos de coco nos brinda la oportunidad de emplear una materia prima que no es usualmente considerada en la industria, ya que, por lo general se aprovecha la parte comestible del fruto ya sean para productos cosméticos o alimenticios, son pocas las industrias que se enfocan en el empleo de bonote de coco como su materia prima.

4.2. Recomendaciones

- Para evitar la saturación de la estructura de no tejido se ha aplicado látex por aspersión con aire a presión, por consiguiente, se recomienda aplicar otros métodos de aplicación de látex u otras sustancias para el mismo fin.

- Se recomienda diseñar un sistema de mezclado mecánico para resinas y material de refuerzo para garantizar la homogeneidad de la mezcla en el caso particular del polvillo de coco y la urea formaldehído.
- Al trabajar con formol las emisiones de esta sustancia son considerables durante el procesamiento, se recomienda construir una campana de extracción de vapores donde las emisiones de formol puedan ser previamente tratadas para ser enviadas a la atmósfera.
- Se sugiere realizar el ensamble de los paneles tipo sánduche con elementos que garanticen una sujeción adecuada y faciliten la instalación de varios paneles de manera consecutiva, por ejemplo, empleando ganchos o rieles de tal manera que se mejore la presentación del producto final.
- Se recomienda que en futuras investigaciones que trabajen con fibra de coco se plantee el uso de otro tipo de resina donde se modifique las concentraciones de la misma. Además, de incluir la evaluación de resistencia al fuego y la cuantificación de emisiones de los productos terminados, de manera que puedan generar nuevas aplicaciones.

Referencias Bibliográficas

- [1] M. S. Guney, "Utilización de cáscara de avellana como biomasa," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 4, pp. 72–77, Dec. 2013.
- [2] R. Silva, S. K. Haraguchi, E. C. Muniz, and A. F. Rubira, "Aplicaciones químicas de fibras lignocelulósicas en compuesto polimericos," *Quim. Nov.*, vol. 32, no. 3, pp. 661–671, 2009.
- [3] A. Sanz Tejedor, "Tecnología de la celulosa. La industria papelera," *Química Orgánica Industrial*. [Online]. Available: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>. [Accessed: 18-Jun-2018].
- [4] F. D. Sousa, G. Martinez, A. C. de Oliveira Monteiro-Moreira, C. N. Aguilar, and R. Azevedo, "Perspectivas biotecnológicas de hemicelulosas vegetales," *Rev. Científica la Univ. Autónoma Coahuila*, vol. 2, no. 4, p. 1, 2010.
- [5] D. Dopico-Ramírez, L. García-García, A. Abril-González, Y. Hernández-Corvo, and D. Cordero-Fernández, "Lignina de bagazo como fibra dietética," *ICIDCA. Sobre los Deriv. la Caña Azúcar*, vol. 46, no. 1, pp. 46–50, 2012.
- [6] J. F. D. L. C. Herrera, Ú. M. Rojo, S. B. Parra, and C. Á. López, "Efecto de la temperatura de procesado sobre las propiedades mecánicas de tableros aglomerados sin resina sintética," *Prospect*, vol. 9, no. 2, pp. 75–80, 2011.
- [7] J. F. García Martín, S. Sánchez Villasclaras, and V. Bravo Rodríguez, "Producción de bioetanol a partir del residuo de la poda del olivo." PIDMA, p. 47, 2010.
- [8] A. Ali *et al.*, "Tratamiento hidrofóbico de fibras naturales y sus compuestos: Una revisión," *J. Ind. Text.*, vol. 47, no. 8, pp. 2153–2183, May 2018.
- [9] L. Cuervo, J. L. Folch, and R. E. Quiroz, "Lignocelulosa como fuente de azúcares para la producción de etanol con Lignocellulolytic fungi " *Biotecnol.* , vol. 13, no. 3, p. 16, 2014.
- [10] F. Corrales Barbe, P. Mutjé Pujol, M. Llop i Manero, and A. i T. A. Universidad de Girona. Departamento de Ingeniería Química, *Modificación de fibras de yute para la elaboración de plaásticos reforzados reciclables*. Universitat de Girona, 2005.
- [11] J. C. Paez Moscoso, "Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión," Escuela Politécnica Nacional , 2007.
- [12] A. Moral Borque and M. Nogueira López, "Materiales de última generación y materiales eficientes: Materiales compuestos - composites," UAH, 2007.
- [13] C. Edil da Costa, F. Velasco López, J. M. Torralba Castelló, and J. M. T. Castelló, "Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades,

- aplicaciones,” *Rev. Metal.*, vol. 36, no. 3, pp. 179–192, Jun. 2000.
- [14] D. Verma, B. H. U. Varanasi, and P. Gope, “Uso de fibras de coco en materiales compuestos,” no. April. 2015.
- [15] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Ciencia e ingeniería de materiales: Introducción*, 8th ed., vol. 12, no. 1. Estados Unidos de América, 2010.
- [16] B. Larson, “Estructuras compuestas,” *NDT Resource Center*, 2011. .
- [17] M. Kisan, S. Sangathan, J. Nehru, and S. G. Pitroda, *Especificación de adhesivos de resina sintética para contrachapado (fenólico y aminoplástico)*. New Delhi, 2006.
- [18] M. Kisan, S. Sangathan, J. Nehru, and S. G. Pitroda, *Especificaciones generales de tablero duro de bonote*, Bureau of. New Delhi, 2010.
- [19] J. Khedari, N. Nankongnab, J. Hirunlabh, and S. Teekasap, “Nuevos tableros de partículas aislantes de bajo costo a partir de la mezcla de la cáscara de durian y fibra de coco,” *Build. Environ.*, vol. 39, no. 1, pp. 59–65, 2004.
- [20] R. Zulkifli, M. . Mohd Nor, M. . Mat Tahir, A. . Ismail, and M. . Nuawi, “Paneles de coco.pdf,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 20, p. 7, 2008.
- [21] M. Ávila, J. Becerra, and L. J. Maldonado, “Algunas características físicas y mecánicas de tableros de partículas producidos en México y sus probables usos en la construcción.,” *Ciencia Forestal*, México D.F, p. 33, 1976.
- [22] C. Cobreros Rodríguez, “Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada,” Universidad Autónoma de Querétaro, 2015.
- [23] H. S. Kim, “Nuevo comportamiento de flexión de estructuras tipo sánduche hechas de espuma de perlita/núcleo de silicato de sodio y piel de papel,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 321–333, 2017.
- [24] J. P. Rodríguez Godínez, “Diseño y caracterización del material compuesto por polietileno de alta densidad y fibra de coco,” Universidad de Colima, 2005.
- [25] C. J. Grande, “Análisis comparativo de diferentes métodos para la determinación de dureza en maderas,” 2013.
- [26] F. Delgado, “Obtención de materiales compuestos híbridos de matriz poliéster reforzada con fibra de coco y fibra de vidrio para la elaboración de tableros,” Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [27] A. H. Calleja, “NTP 503: Confort acustico: el ruido en oficinas ”, Madrid, 1998.

Anexos

Anexo I.

CONCENTRACIONES MÁXIMAS PARA TABLEROS A BASE DE POLVILLO DE COCO

Cálculo de la fracción volumétrica fibra-resina

$$v_f = \frac{V_f}{V_t} = \frac{A_f * L}{A_t * L} = \frac{A_f}{A_t} \quad (1)$$
$$v_f = \frac{r^2 * \pi}{4r^2} = \frac{\pi}{4} = 0,78$$

DATOS:

$$v_f = 0,78$$

$$v_r = 0,22$$

$$\rho_f = 0,7586 \frac{g}{cm^3}$$

$$\rho_r = 0,7484 \frac{g}{cm^3}$$

$$\rho_c = 0,8192 \frac{g}{cm^3}$$

Considerando los valores de densidad obtenidos de la evaluación de densidad por inmersión.

Para determinar la fracción volumétrica se encuentra el volumen de fibra y de resina en $1cm^3$ del compuesto de tal manera que

$$1cm_c^3 * \frac{0,8192g}{cm^3} = 0,8192g_c$$

A partir de la masa del compuesto en $1cm^3$ obtenida se determina con los porcentajes en masa de fibra y resina, evaluando primero en proporciones de 30% resina y 70% fibra y de 20% resina y 80% fibra.

Evaluando para 30% resina y 70% fibra se tiene:

$$\frac{0,3g_r}{1g_c} * 0,8192g_c = 0,24576g_r$$

$$\frac{0,7g_f}{1g_c} * 0,8192g_c = 0,57344g_f$$

Con las masas obtenidas y la densidad tanto de fibra como de resina se encuentra el volumen de las partes en el compuesto

$$0,24576g_r * \frac{cm^3}{0,7484g_r} = 0,3282cm_r^3$$

$$0,57344g_f * \frac{cm^3}{0,7586g_f} = 0,7559cm_f^3$$

La fracción volumétrica será:

$$v_r = \frac{V_r}{V_c} \quad (2)$$

$$v_r = \frac{0,3282cm^3}{1cm^3} = 0,3282$$

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad (3)$$

$$v_f = \frac{0,7559cm^3}{1cm^3} = 0,7559$$

Ahora evaluando para 20% resina y 80% fibra se tendría:

$$\frac{0,2g_r}{1g_c} * 0,8192g_c = 0,16384g_r$$

$$\frac{0,8g_f}{1g_c} * 0,8192g_c = 0,65536g_f$$

Con las masas obtenidas y conociendo los valores de densidad tanto de fibra como de resina se encuentra el volumen de las partes en el compuesto

$$0,16384g_r * \frac{cm^3}{0,7484g_r} = 0,21892cm_r^3$$

$$0,65536g_f * \frac{cm^3}{0,7586g_f} = 0,863907cm^3$$

La fracción volumétrica será:

$$v_r = \frac{V_r}{V_c}$$

$$v_r = \frac{0,21892cm^3}{1cm^3} = 0,21892$$

$$v_f = \frac{V_f}{V_c}$$

$$v_f = \frac{0,863907cm^3}{1cm^3} = 0,863907$$

Para las distintas fracciones másicas de urea formaldehído se tienen las siguientes concentraciones volumétricas:

W _t UF [%]	v _r	v _f
20%	0,2189	0,8693
30%	0,3282	0,7559

a. Fracción másica fibra-resina

$$\frac{w_f}{w_r} = \frac{\rho_f * V_f}{\rho_r * V_r} \quad (4)$$

$$\frac{w_f}{w_r} = \frac{\rho_f * V_f}{\rho_r * V_f \left(\frac{1}{v_f} - 1 \right)}$$

$$\frac{w_f}{w_r} = \frac{\rho_f}{\rho_r \left(\frac{1}{0,7559} - 1 \right)}$$

$$\frac{w_f}{w_r} = \frac{\rho_f}{\rho_r (0,3229)}$$

$$\frac{w_f}{w_r} = \frac{0,7586}{0,7484 (0,3229)}$$

$$\frac{w_f}{w_r} = 3,13$$

b. Fracción másica fibra-total

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{m_f}{m_t} = \frac{\rho_f V_f}{m_f + m_r} = \frac{\rho_f * V_f}{\rho_f V_f + \rho_r V_r} \quad (5)$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{\rho_f * V_f}{\rho_f V_f + \rho_r (V_t - V_f)}$$

$$v_f = \frac{V_f}{V_t} \rightarrow V_t = \frac{V_f}{v_f}$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{\rho_f * V_f}{\rho_f V_f + \rho_r \left(\frac{V_f}{v_f} - V_f \right)}$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{\rho_f * V_f}{\rho_f V_f + \rho_r \left(\frac{V_f - v_f V_f}{v_f} \right)}$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{\rho_f * V_f}{\rho_f V_f + \rho_r V_f \left(\frac{1 - v_f}{v_f} \right)}$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{\rho_f * V_f}{V_f [\rho_f + \rho_r \left(\frac{1 - v_f}{v_f} \right)]}$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{\rho_f}{\rho_f + \rho_r \left(\frac{1 - v_f}{v_f} \right)}$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \frac{0,7586}{0,7586 + 0,7484 \left(\frac{1 - 0,7559}{0,7559} \right)}$$

$$\frac{W_f}{W_t} = \mathbf{0,7583}$$

$$\frac{W_r}{W_c} = \mathbf{0,2417}$$

Anexo II.

EVALUACIÓN DE LA PRESIÓN APLICADA AL MOLDE PARA TABLEROS

Se ha evaluado la presión aplicable sobre cada tablero elaborado para las pruebas previas realizadas. La prensa calefactora empleada para la elaboración de los tableros nos entrega valores de carga en toneladas métricas, fuerza que es aplicada sobre el molde. Para las pruebas previas se ha trabajado con tres cargas diferentes:

Carga [Ton]	Carga [N]
12	117 680
15	147 100
18	176 520

El área del molde del tablero viene dada por

$$A_{\text{tablero}} = 0,25 \text{ m} * 0,25 \text{ m} = 0,0625 \text{ m}^2$$

La presión de moldeo se calcula con la siguiente expresión

$$P = \frac{F}{A}$$

Con ello tenemos que

$$P_{12} = \frac{F_{12}}{A_{\text{tablero}}} = \frac{117\,680 \text{ N}}{0,0625 \text{ m}^2} = 1,882 \text{ MPa} \equiv 273,1 \text{ psi}$$

$$P_{15} = \frac{F_{15}}{A_{\text{tablero}}} = \frac{147\,100 \text{ N}}{0,0625 \text{ m}^2} = 2,353 \text{ MPa} \equiv 341,4 \text{ psi}$$

$$P_{18} = \frac{F_{18}}{A_{\text{tablero}}} = \frac{176\,520 \text{ N}}{0,0625 \text{ m}^2} = 2,824 \text{ MPa} \equiv 409,6 \text{ psi}$$

Anexo III.

ENSAYOS PRELIMINARES DE TENSION Y FLEXIÓN PARA DEFINIR LAS CONDICIONES DE FABRICACIÓN DE LOS TABLEROS A BASE DE POLVILLO DE COCO

1. Prueba 1. Tableros con 20% de concentración de resina UF, elaborados a 1,88 MPa de presión de presión

Ensayo de Tracción

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	24,03	12,28	294,91	553,33	1,88	767,03	0,41
2	25,38	11,88	301,33	478,33	1,59	435,22	0,27
3	24,18	11,73	283,51	473,10	1,67	801,04	0,30
4	23,56	12,12	285,49	491,67	1,72	409,25	0,28
5	23,85	11,57	275,83	403,31	1,46	1017,32	0,13
6	23,83	11,71	279,05	502,50	1,80	556,50	0,22
7	23,61	11,78	278,07	454,17	1,63	704,64	0,17
Promedio	24,20	11,87	287,37	492,28	1,71	652,88	0,27
Desviación Estándar	0,69	0,24	10,28	38,23	0,12	153,56	0,09
Coefficiente de Variación	2,85	1,98	3,58	7,77	7,10	23,52	33,11



Figura 1. Probetas ensayadas a tracción de tableros con 20% de UF y 1,88 MPa de presión.

Ensayo de Flexión

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Distancia entre puntos [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	12,33	11,88	149,3	190,0	14,17	2,32	165,84	1,66
2	11,80	11,97	141,1	190,0	15,83	2,67	142,12	2,16
3	12,13	11,53	139,8	184,4	16,67	2,86	168,59	1,87
4	11,53	11,69	134,7	186,9	16,67	2,97	175,01	1,97
5	11,68	11,97	139,7	191,5	15,00	2,58	166,26	1,77
Promedio	11,89	11,80	140,9	188,5	15,66	2,68	163,56	1,88
Desviación Estándar	0,33	0,19	5,30	2,86	1,09	0,25	12,54	0,19
Coefficiente de Variación	2,77	1,63	3,76	1,52	6,94	9,44	7,66	10,16



Figura 2. Probetas ensayadas a flexión de tableros con 20% de UF y 1,88 MPa de presión.

2. Prueba 2. Tableros con 30% de concentración de resina UF, elaborados a 1,88 MPa de presión

Ensayo de Tracción

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	24,87	11,68	290,42	450,00	1,55	654,55	0,37
2	23,75	11,82	280,67	530,83	1,89	761,75	0,30
3	24,85	11,44	284,10	487,31	1,72	474,89	0,27
4	24,67	11,93	294,13	368,33	1,25	855,64	0,18
5	24,97	11,65	290,84	475,83	1,64	828,02	0,25
6	23,57	11,72	276,12	466,67	1,69	769,56	0,28
7	24,21	11,79	285,44	474,17	1,66	1417,22	0,20
Promedio	24,36	11,76	286,43	458,33	1,60	773,90	0,27
Desviación Estándar	0,66	0,11	7,65	58,74	0,23	77,49	0,07
Coefficiente de Variación	2,69	0,98	2,67	12,82	14,58	10,01	25,18

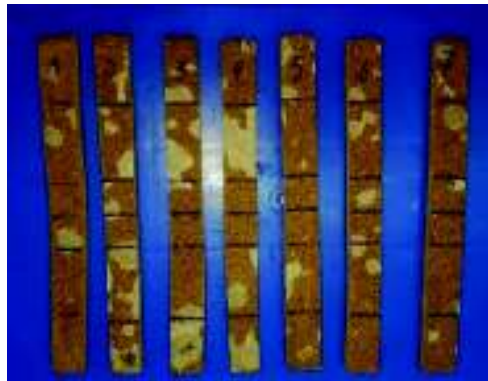


Figura 3. Probetas ensayadas a tracción de tableros con 30% de UF y 1,88 MPa de presión.

Ensayo de Flexión

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Distancia entre puntos [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	12,71	11,35	144,2	181,60	15,83	2,64	200,38	1,35
2	12,05	11,76	141,6	181,60	16,67	2,73	129,28	2,52
3	12,13	11,53	139,8	184,40	18,33	3,15	161,97	1,77
4	11,68	11,43	132,9	184,20	17,48	3,17	182,02	1,61
5	12,9	11,26	145,2	180,16	10,00	1,65	112,47	1,45
Promedio	12,29	11,46	140,7	182,39	15,66	2,66	157,22	1,74
Desviación Estándar	0,50	0,19	4,87	1,84	3,30	0,62	36,34	0,46
Coefficiente de Variación	4,07	1,68	3,46	1,01	21,06	23,15	23,12	26,69



Figura 4. Probetas ensayadas a flexión de tableros con 30% de UF y 1,88 MPa de presión.

3. Prueba 3. Tableros con 30% de concentración de resina UF, elaborados a 2,35 MPa de presión

Ensayo de Tracción

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	25,12	11,76	295,29	580,00	1,96	410,94	0,54
2	23,94	12,05	288,48	440,83	1,53	693,93	0,22
3	23,90	11,90	284,41	560,00	1,97	794,77	0,33
4	24,18	11,76	284,30	568,33	2,00	750,23	0,28
5	26,09	12,14	316,54	505,00	1,60	671,75	0,29
6	25,54	12,10	309,04	438,33	1,42	467,15	0,39
7	24,05	12,35	297,02	355,83	1,20	552,19	0,27
Promedio	24,76	12,08	299,07	461,66	1,55	627,05	0,29
Desviación Estándar	0,99	0,21	13,59	79,74	0,29	114,91	0,06
Coficiente de Variación [%]	3,98	1,76	4,55	17,27	18,94	18,33	21,40



Figura 5. Probetas ensayadas a tracción de tableros con 30% de UF y 2,35 MPa de presión.

Ensayo de Flexión

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Distancia entre puntos [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	19,50	11,93	232,4	110,35	63,33	3,78	196,02	2,30
2	21,77	11,51	250,4	109,70	78,33	4,47	300,99	1,75
3	21,15	11,60	245,3	110,45	71,67	4,17	291,83	1,56
4	20,24	11,40	230,7	110,35	83,33	5,24	303,66	1,96
5	19,11	11,76	224,5	111,76	65,83	4,18	223,11	1,96
6	19,64	11,28	221,5	110,56	110,00	7,30	425,56	1,86
7	18,67	11,59	216,2	110,37	68,33	4,51	322,13	1,57
Promedio	20,18	11,57	233,4	110,52	73,49	4,51	288,34	1,76
Desviación Estándar	1,31	0,13	14,24	0,75	7,23	0,44	38,09	0,20
Coefficiente de Variación [%]	6,50	1,14	6,10	0,68	9,83	9,65	13,21	11,23



Figura 6. Probetas ensayadas a flexión de tableros con 30% de UF y 2,35 MPa de presión.

4. Prueba 4 Tableros con 30% de concentración de resina UF, elaborados a 2,82 MPa de presión

Ensayo de Tracción

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación final [%]
1	25,27	10,24	258,59	467,50	1,81	818,25	0,27
2	25,14	10,18	255,93	615,83	2,41	666,11	0,41
3	25,18	10,57	266,10	575,83	2,16	4078,79	0,09
4	26,01	10,09	262,26	396,67	1,51	8158,17	0,21
5	26,40	10,12	267,12	565,00	2,12	1328,83	0,33
6	25,31	10,2	257,99	503,33	1,95	1244,79	0,21
Promedio	25,53	10,19	259,90	537,91	2,07	1014,49	0,30
Desviación Estándar	0,51	0,04	4,28	56,92	0,22	279,16	0,07
Coefficiente de Variación [%]	1,98	0,43	1,65	10,58	10,79	27,52	24,26



Figura 7. Probetas ensayadas a tracción de tableros con 30% de UF y 2,82 MPa de presión.

Ensayo de Flexión

No	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]	Distancia entre puntos [mm]	Fuerza Última [N]	Resistencia Última [MPa]	Módulo [MPa]	Deformación al fallo [%]
1	12,60	9,88	124,4	160,96	21,67	4,25	361,40	1,58
2	13,86	10,27	142,2	159,66	28,33	4,65	374,67	1,63
3	14,06	10,11	142,1	159,24	29,17	4,85	420,90	1,50
4	12,81	9,94	127,2	160,88	27,50	2,25	381,48	1,59
5	14,78	9,68	143,0	159,65	23,33	4,04	274,52	2,04
Promedio	13,62	9,97	135,8	160,07	26,00	4,00	362,59	1,66
Desviación Estándar	0,91	0,23	9,16	0,79	3,30	1,03	53,99	0,21
Coefficiente de Variación [%]	6,66	2,26	6,75	0,49	12,70	25,78	14,89	12,78



Figura 8. Probetas ensayadas a flexión de tableros con 30% de UF y 2,82 MPa de presión.

Síntesis de ensayos preliminares

En la siguiente tabla se presenta de manera sintetizada los resultados de los ensayos mecánicos preliminares.

i. Ensayo de Tracción

N° Prueba	Muestra	Resistencia Última [MPa]	Coefficiente de Variación [%]	Módulo [MPa]	Coefficiente de Variación [%]
1	1,88 MPa UF-20%	1,71	7,10	652,89	23,52
2	1,88 MPa UF-30%	1,60	14,58	773,90	10,01
3	2,35 MPa UF-30%	1,55	18,94	627,05	18,33
4	2,82 MPa UF-30%	2,07	10,79	1014,49	27,52

ii. *Ensayo de Flexión*

N° Prueba	Muestra	Resistencia Última [MPa]	Coefficiente de Variación [%]
1	1,88 MPa UF-20%	2,68	9,44
2	1,88 MPa UF-30%	2,92	8,20
3	2,35 MPa UF-30%	4,51	9,65
4	2,82 MPa UF-30%	4,00	25,78

N° Prueba	Muestra	Módulo de Elasticidad [MPa]	Coefficiente de Variación [%]
1	1,88 MPa UF-20%	163,56	7,66
2	1,88 MPa UF-30%	168,41	15,65
3	2,35 MPa UF-30%	288,34	13,21
4	2,82 MPa UF-30%	362,59	14,89

N° Prueba	Muestra	Deformación al fallo [%]	Coefficiente de Variación [%]
1	1,88 MPa UF-20%	2,28	12,89
2	1,88 MPa UF-30%	2,75	20,54
3	2,35 MPa UF-30%	1,86	9,85
4	2,82 MPa UF-30%	2,21	31,60

Observaciones:

Los parámetros reportados durante el ensayo de tracción de la prueba 4 se duplican en comparación con la prueba 3, mientras que para el ensayo de flexión existe un incremento del 79,5% del módulo de flexión durante la prueba 4 en comparación con la prueba 3.

Por otra parte, cuanto mayor es la presión de trabajo el aspecto superficial de los tableros mejora y por la forma de fractura se aprecia que existe una buena distribución de la resina UF, por tal razón no se pierde material particulado durante el corte para extracción de probetas de ensayo.

Por estos motivos y considerando el incremento notorio de los distintos parámetros durante la prueba 4 se recomienda elaborar los tableros con 2,82 MPa de presión.

Anexo IV.

ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA E INCREMENTO DE ESPESOR ASTM D1037-12

A continuación, se muestran los pesos en seco y una vez completo un ciclo de inmersión de 24 horas se procede al secado a 103°C dentro de la estufa durante un período de 3 horas, se toman pesos y cuatro medidas de espesores para cada muestra, como lo indica la norma establecida.

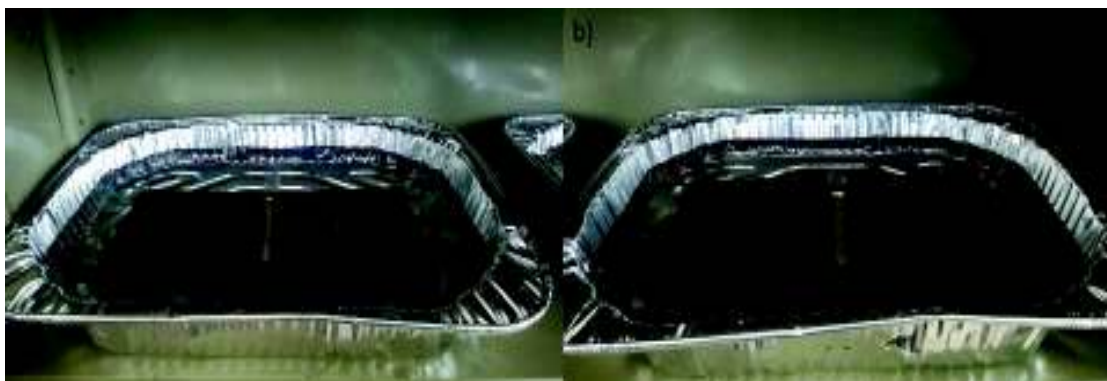


Figura 9. a) Muestras 1 y 2 b) Muestras 3 y 4.

Muestras	Peso en seco [g]	Peso 24 h de inmersión [g]	Absorción de agua [%]
1,88 MPa UF-20%	142,4	249,3	75,07
1,88 MPa UF-30%	136,8	227,7	66,45
2,35 MPa UF-30%	125,1	223,3	78,50
2,82 MPa UF-30%	115,2	220,7	91,58

En seco, Valor inicial					
<i>Muestras</i>		<i>1,88 MPa UF-20%</i>	<i>1,88 MPa UF-30%</i>	<i>2,35 MPa UF-30%</i>	<i>2,82 MPa UF-30%</i>
Espesores [mm]	1	10,09	10,18	10,17	10,27
	2	10,17	10,23	10,12	10,31
	3	10,30	10,24	10,21	10,13
	4	10,24	10,12	10,16	10,17
Promedio [mm]		10,20	10,19	10,17	10,22

En seco, 3 horas después a 103°C					
Muestras		1,88 MPa UF-20%	1,88 MPa UF-30%	2,35 MPa UF-30%	2,82 MPa UF-30%
peso [g]		131,90	124,30	119,10	114,80
Espesores [mm]	1	11,46	10,91	10,48	10,24
	2	11,61	10,83	10,44	10,25
	3	11,44	10,81	10,29	10,23
	4	11,29	10,86	10,31	10,22
Promedio [mm]		11,45	10,85	10,38	10,24

Para obtener el valor en porcentaje por incremento de espesor de las muestras se cumple con:

$$\text{Engrosamiento} = \frac{\text{espesor final} - \text{espesor inicial}}{\text{espesor inicial}} * 100\% \quad (1)$$

Muestra	Espesor inicial [mm]	Espesor final [mm]	Incremento de espesor [%]
1,88 MPa UF-20%	10,20	11,45	12,25
1,88 MPa UF-30%	10,19	10,85	6,47
2,35 MPa UF-30%	10,17	10,38	2,06
2,82 MPa UF-30%	10,22	10,24	0,19

Para evaluar el contenido de humedad se sigue lo dispuesto en la norma ASTM D4442 (Método A).

$$\%MC = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa Seca}}{\text{Masa Seca}} * 100\% \quad (2)$$

Muestras	Masa Inicial [g]	Masa Seca [g]	%MC
1,88 MPa UF-20%	142,40	131,90	7,96
1,88 MPa UF-30%	136,80	124,30	10,05
2,35 MPa UF-30%	125,10	119,10	5,04
2,82 MPa UF-30%	115,20	114,80	0,34

Observaciones:

Con los resultados obtenidos se aprecia que el engrosamiento de los tableros no sobrepasa al 15% siendo el tablero de 1,88 MPa con 20% de resina el que adquiere mayor engrosamiento y el tablero de 2,82 MPa con 30% de resina el de menor engrosamiento. Por otro lado, el contenido de humedad de las muestras llega a obtener un valor al 10% en el tablero de 1,88 MPa a 30% y el menor valor de contenido de humedad corresponde al tablero con 2,82 MPa a 30%. Con ello podemos observar que el tablero a 2,82 MPa y 30% de resina logra mantener mejor su apariencia y resistencia a la absorción de agua.

Anexo V.

ENSAYO DE DUREZA ASTM D1037-12

Dimensión de muestra: 75 x 150 mm

Espesor de muestra: 30 mm

Velocidad de ensayo: 6 mm/min

No	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
	<i>1,88 MPa UF-20%</i>	<i>1,88 MPa UF-30%</i>	<i>2,35 MPa UF-30%</i>	<i>2,82 MPa UF-30%</i>
	Carga máxima [N]	Carga máxima [N]	Carga máxima [N]	Carga máxima [N]
1	1699	890	838	709
2	1552	850	874	562
3	1628	890	879	742
4	1508	912	780	601
Promedio	1596,75	885,50	842,75	653,50
Desviación Estándar	72,99	22,37	39,53	74,23
Coefficiente de Variación [%]	4,57	2,52	4,69	11,35

Anexo VI.

RESISTIVIDAD TÉRMICA TEÓRICA TOTAL

Para definir la resistividad térmica total de los paneles que son configurados de múltiples capas se emplea el principio de “Red de resistencias térmicas”.

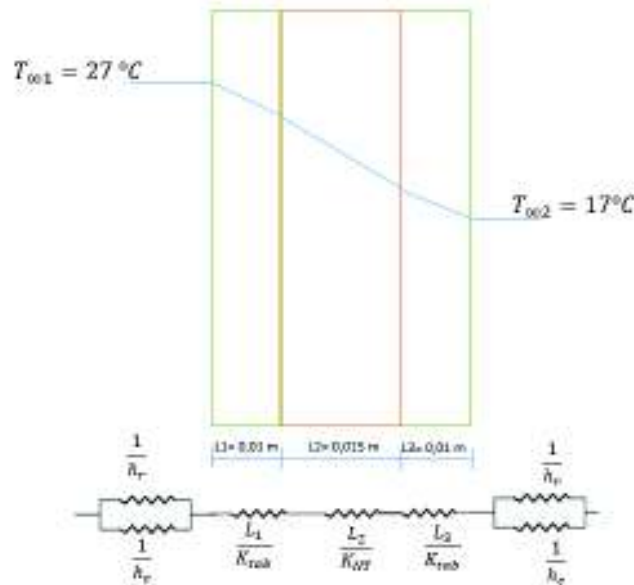


Figura 10. Red de resistencias térmicas.

(Fuente: Propia)

Primero se resolverán las resistencias en paralelo que corresponden a los coeficientes de convección y radiación:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{alr})(T_s^2 + T_{alr}^2) \quad (1)$$

Donde:

$$\varepsilon = 0,9$$

$$\sigma = 5,6E - 08 \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

$$T_s = 26,3^\circ C = 299,5 K$$

$$T_{alr} = 27^\circ C = 300,15 K$$

$$h_r = (0,9) \left(5,67E - 08 \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] \right) (299,5 + 300,15) [K] * (299,5^2 + 300,15^2) [K]$$

$$h_r = 5,4336 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$R_r = \frac{1}{h_r} = 0,184 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_c = \frac{1}{h_c} = \frac{1}{25} = 0,04 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Para encontrar la resistencia parcial entre radiación y convección se considera que son resistencias en paralelo:

$$R_{P1} = \frac{R_r * R_c}{R_r + R_c} \quad (2)$$

$$R_{P1} = \frac{0,184 * 0,04}{0,184 + 0,04} = 0,03285 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_{P1} = R_{P3}$$

Panel sánduche tipo 1:

- Núcleo 15 mm

$$R_T = R_{P1} + R_{P2} + R_{P3} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (3)$$

$$R_{P2} = \frac{L_1}{K_{tab}} + \frac{L_2}{K_{NT}} + \frac{L_3}{K_{tab}} \quad (4)$$

$$R_{P2} = \frac{0,01 [m]}{0,078 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,015 [m]}{0,045 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,01 [m]}{0,078 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 0,5897 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_T = (2 * 0,03285) + 0,5897 = 0,6554 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

- Núcleo 30 mm

$$R_T = R_{P1} + R_{P2} + R_{P3} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_{P2} = \frac{L_1}{K_{tab}} + \frac{2L_2}{K_{NT}} + \frac{L_3}{K_{tab}}$$

$$R_{P2} = \frac{0,01 [m]}{0,078 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,030 [m]}{0,045 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,01 [m]}{0,078 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 0,9230 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_T = (2 * 0,03285) + 0,9230 = 0,9887 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

- Núcleo 45 mm

$$R_T = R_{P1} + R_{P2} + R_{P3} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_{P2} = \frac{L_1}{K_{tab}} + \frac{3L_2}{K_{NT}} + \frac{L_3}{K_{tab}}$$

$$R_{P2} = \frac{0,01 [m]}{0,078 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,045 [m]}{0,045 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,01 [m]}{0,078 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 1,2564 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_T = (2 * 0,03285) + 1,2564 = \mathbf{1,3221} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Panel sánduche tipo 2

- Núcleo 15 mm

$$R_T = R_{P1} + R_{P2} + R_{P3} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_{P2} = \frac{L_1}{K_{tab}} + \frac{L_2}{K_{NT}} + \frac{L_3}{K_{tab}}$$

$$R_{P2} = \frac{0,012 [m]}{0,177 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,015 [m]}{0,045 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,012 [m]}{0,177 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 0,4689 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_T = (2 * 0,03285) + 0,4689 = \mathbf{0,5346} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

- Núcleo 30 mm

$$R_T = R_{P1} + R_{P2} + R_{P3} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_{P2} = \frac{L_1}{K_{tab}} + \frac{2L_2}{K_{NT}} + \frac{L_3}{K_{tab}}$$

$$R_{P2} = \frac{0,012 [m]}{0,177 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,030 [m]}{0,045 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,012 [m]}{0,177 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 0,8022 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_T = (2 * 0,0397) + 0,8022 = \mathbf{0,8679} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

- Núcleo 45 mm

$$R_T = R_{P1} + R_{P2} + R_{P3} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_{P2} = \frac{L_1}{K_{tab}} + \frac{3L_2}{K_{NT}} + \frac{L_3}{K_{tab}}$$

$$R_{P2} = \frac{0,012 [m]}{0,177 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,045 [m]}{0,045 \left[\frac{W}{mK} \right]} + \frac{0,012 [m]}{0,177 \left[\frac{W}{mK} \right]} = 1,1356 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_T = (2 * 0,03285) + 1,1356 = \mathbf{1,2013} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Anexo VII

DENSIDAD TEÓRICA DEL TABLERO DE POLVILLO DE COCO

Considerando que parte del estudio preliminar es la variación de concentración de resina UF y la presión de moldeo. Para una concentración másica de 20% de UF y 1,88 MPa; se toman los valores de fracción volumétrica indicados:

$$v_f = 0,8693$$

$$v_r = 0,2189$$

Conocidos en la fracción fibra-resina

$$\rho_{t-20\%} = (\rho_r * v_r) + (\rho_f * v_f) \quad (1)$$

$$\rho_{t-20\%} = (0,7484 * 0,2189) + (0,7586 * 0,8693)$$

$$\rho_{t-20\%} = \mathbf{0,8232} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Tomando los valores de fracción volumétrica para una fracción másica de 30% de UF y una presión de moldeo de 2,82 MPa:

$$v_f = 0,7559$$

$$v_r = 0,3282$$

Obtenidos en la fracción fibra-resina

$$\rho_{t-30\%} = (\rho_r * v_r) + (\rho_f * v_f)$$

$$\rho_{t-30\%} = (0,7484 * 0,3282) + (0,7586 * 0,7559)$$

$$\rho_{t-30\%} = \mathbf{0,8190} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Anexo VIII.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ACÚSTICA PARA DIFERENTES MATERIALES

Para cada tipo de material se toman tres muestras las mismas que son ensayadas; por otro lado, para medir la absorción acústica de los paneles la medición se realiza tres veces de la misma muestra luego de setear el quipo entre cada medida.

Coefficiente de absorción acústica para tablero de polvillo de coco en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Muestra1	Muestra2	Muestra3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación [%]
100	0,089	0,079	0,086	0,085	0,003	4,020
125	0,078	0,062	0,057	0,065	0,008	12,041
160	0,076	0,066	0,056	0,066	0,007	10,503
200	0,078	0,067	0,061	0,069	0,006	8,768
250	0,082	0,071	0,066	0,073	0,006	7,989
315	0,088	0,079	0,073	0,080	0,005	6,696
400	0,094	0,086	0,079	0,086	0,005	6,150
500	0,100	0,094	0,086	0,093	0,005	5,257
630	0,109	0,105	0,096	0,103	0,005	4,454
800	0,128	0,128	0,117	0,124	0,004	3,578
1000	0,127	0,131	0,112	0,123	0,007	5,774
1250	0,153	0,171	0,131	0,152	0,014	9,336
1600	0,234	0,283	0,175	0,231	0,039	16,696
2000	0,507	0,661	0,303	0,490	0,127	25,894
2500	0,894	0,818	0,672	0,795	0,080	10,031
3150	0,433	0,353	0,739	0,508	0,144	28,379
4000	0,190	0,178	0,294	0,221	0,045	20,370
5000	0,192	0,149	0,149	0,163	0,017	10,674

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para no tejido de coco en tercia de octavas.

Frecuencia	Muestra 2	Muestra3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,10	0,05	0,07	0,02	24,47
125	0,08	0,07	0,07	0,00	5,72
160	0,08	0,07	0,08	0,01	7,91
200	0,09	0,07	0,08	0,01	7,22
250	0,10	0,08	0,09	0,01	6,01

Continuación.

315	0,11	0,09	0,10	0,01	5,52
400	0,11	0,10	0,11	0,01	5,33
500	0,12	0,11	0,11	0,01	4,55
630	0,13	0,12	0,12	0,00	3,71
800	0,14	0,13	0,14	0,00	2,96
1000	0,14	0,13	0,14	0,00	2,62
1250	0,17	0,15	0,16	0,00	2,63
1600	0,21	0,19	0,20	0,01	2,60
2000	0,27	0,25	0,26	0,01	2,42
2500	0,34	0,32	0,33	0,01	2,34
3150	0,40	0,37	0,39	0,01	2,30
4000	0,51	0,48	0,49	0,01	1,59
5000	0,46	0,38	0,42	0,03	6,79

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para escayola en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Muestra1	Muestra 2	Muestra3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,08	0,08	0,07	0,08	0,01	9,47
125	0,06	0,07	0,07	0,07	0,00	6,19
160	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	0,92
200	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	0,43
250	0,07	0,07	0,07	0,07	0,00	1,29
315	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,52
400	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,31
500	0,09	0,09	0,09	0,09	0,00	0,44
630	0,09	0,09	0,09	0,09	0,00	0,65
800	0,11	0,11	0,11	0,11	0,00	1,17
1000	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	2,41
1250	0,11	0,13	0,12	0,12	0,01	4,38
1600	0,16	0,21	0,19	0,19	0,01	7,95
2000	0,33	0,48	0,40	0,40	0,05	13,46
2500	0,80	0,86	0,81	0,82	0,02	3,02
3150	0,68	0,43	0,42	0,51	0,10	20,10
4000	0,29	0,21	0,22	0,24	0,03	14,04
5000	0,28	0,21	0,33	0,27	0,04	15,70

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 15 mm) en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Muestra1	Muestra 2	Muestra3	Promedio	Des. Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,14	0,12	0,12	0,12	0,01	5,37
125	0,12	0,11	0,12	0,12	0,00	3,47
160	0,14	0,13	0,13	0,13	0,00	2,35
200	0,16	0,16	0,15	0,16	0,00	1,93
250	0,19	0,20	0,18	0,19	0,01	4,69
315	0,23	0,26	0,21	0,23	0,02	8,28
400	0,29	0,36	0,25	0,30	0,04	12,74
500	0,40	0,53	0,33	0,42	0,07	17,27
630	0,59	0,78	0,47	0,61	0,11	18,08
800	0,85	0,91	0,70	0,82	0,08	9,38
1000	0,92	0,73	0,94	0,86	0,08	9,55
1250	0,74	0,57	0,87	0,73	0,11	14,68
1600	0,47	0,35	0,55	0,46	0,07	15,64
2000	0,31	0,26	0,33	0,30	0,02	8,27
2500	0,29	0,26	0,26	0,27	0,01	4,79
3150	0,27	0,21	0,24	0,24	0,02	8,84
4000	0,20	0,15	0,21	0,19	0,02	11,38
5000	0,19	0,15	0,22	0,18	0,03	14,00

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 30 mm) en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Medida1	Medida2	Medida3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,11	0,08	0,09	0,09	0,01	8,94
125	0,15	0,15	0,15	0,15	0,00	1,51
160	0,17	0,16	0,17	0,17	0,01	3,30
200	0,21	0,19	0,20	0,20	0,01	3,32
250	0,28	0,26	0,26	0,27	0,01	2,89
315	0,37	0,35	0,35	0,36	0,01	2,39
400	0,53	0,52	0,51	0,52	0,01	1,34
500	0,75	0,77	0,76	0,76	0,00	0,61
630	0,95	0,93	0,94	0,94	0,00	0,52
800	0,90	0,80	0,89	0,87	0,04	4,38
1000	0,67	0,64	0,59	0,63	0,03	4,53
1250	0,55	0,41	0,37	0,44	0,06	14,55
1600	0,34	0,26	0,24	0,28	0,04	13,61
2000	0,27	0,19	0,18	0,21	0,04	16,59

Continuación.

2500	0,26	0,18	0,17	0,20	0,03	16,19
3150	0,29	0,18	0,19	0,22	0,04	19,41
4000	0,27	0,18	0,16	0,20	0,04	21,90
5000	0,20	0,17	0,14	0,17	0,02	10,92

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para panel sánduche tipo 1 (núcleo 45 mm) en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Medida1	Medida2	Medida3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,18	0,22	0,18	0,19	0,02	9,37
125	0,21	0,26	0,20	0,22	0,02	9,70
160	0,25	0,32	0,24	0,27	0,03	10,91
200	0,31	0,40	0,31	0,34	0,04	10,71
250	0,40	0,52	0,41	0,45	0,05	10,92
315	0,54	0,69	0,56	0,60	0,06	9,36
400	0,74	0,83	0,75	0,78	0,03	4,48
500	0,94	0,86	0,87	0,89	0,03	3,59
630	0,94	0,73	0,79	0,82	0,07	9,15
800	0,79	0,57	0,61	0,66	0,08	12,35
1000	0,53	0,42	0,42	0,46	0,04	9,40
1250	0,35	0,37	0,31	0,34	0,02	6,44
1600	0,26	0,27	0,28	0,27	0,01	3,18
2000	0,23	0,25	0,22	0,23	0,01	5,00
2500	0,26	0,28	0,24	0,26	0,01	5,58
3150	0,26	0,25	0,24	0,25	0,01	3,30
4000	0,18	0,19	0,17	0,18	0,01	3,30
5000	0,16	0,17	0,14	0,16	0,01	6,86

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 15 mm) en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Medida1	Medida2	Medida3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,04	0,06	0,08	0,06	0,02	28,29
125	0,04	0,06	0,08	0,06	0,02	27,27
160	0,02	0,06	0,08	0,06	0,02	36,20
200	0,04	0,06	0,07	0,06	0,01	23,06

Continuación.

250	0,04	0,07	0,07	0,06	0,01	18,75
315	0,05	0,07	0,07	0,06	0,01	13,06
400	0,05	0,07	0,07	0,06	0,01	12,21
500	0,06	0,08	0,07	0,07	0,01	10,37
630	0,07	0,09	0,07	0,08	0,01	9,76
800	0,09	0,12	0,10	0,10	0,01	8,94
1000	0,08	0,10	0,07	0,08	0,01	13,00
1250	0,10	0,12	0,07	0,10	0,02	15,59
1600	0,13	0,17	0,09	0,13	0,03	21,37
2000	0,23	0,28	0,14	0,21	0,05	23,20
2500	0,34	0,27	0,19	0,27	0,05	19,55
3150	0,35	0,22	0,21	0,26	0,05	21,04
4000	0,30	0,20	0,23	0,24	0,04	15,55
5000	0,24	0,18	0,26	0,23	0,03	13,53

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 30 mm) en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Medida1	Medida2	Medida3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,17	0,07	0,08	0,11	0,04	37,30
125	0,17	0,06	0,07	0,10	0,04	41,55
160	0,17	0,06	0,05	0,09	0,05	53,42
200	0,17	0,05	0,05	0,09	0,05	53,30
250	0,16	0,05	0,06	0,09	0,04	48,44
315	0,14	0,05	0,07	0,09	0,03	40,13
400	0,13	0,06	0,07	0,09	0,03	31,96
500	0,12	0,06	0,08	0,09	0,02	24,36
630	0,11	0,07	0,09	0,09	0,02	17,89
800	0,13	0,09	0,12	0,11	0,01	13,46
1000	0,11	0,07	0,11	0,10	0,01	14,70
1250	0,12	0,08	0,10	0,10	0,01	13,98
1600	0,14	0,09	0,11	0,11	0,02	15,01
2000	0,16	0,11	0,13	0,13	0,02	13,11
2500	0,18	0,14	0,17	0,16	0,01	8,56
3150	0,23	0,14	0,21	0,19	0,03	16,94
4000	0,26	0,12	0,23	0,20	0,05	26,40
5000	0,24	0,11	0,24	0,19	0,05	27,46

(Fuente: Propia)

Coefficiente de absorción acústica para panel sánduche tipo 2 (núcleo 45 mm) en tercia de octavas.

Frecuencia [Hz]	Medida1	Medida2	Medida3	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente Variación [%]
100	0,05	0,04	0,14	0,08	0,04	48,62
125	0,05	0,03	0,15	0,07	0,05	61,31
160	0,04	0,03	0,13	0,06	0,04	58,25
200	0,06	0,04	0,11	0,07	0,03	39,31
250	0,07	0,04	0,10	0,07	0,02	28,80
315	0,07	0,05	0,10	0,07	0,02	22,01
400	0,07	0,06	0,09	0,08	0,01	14,94
500	0,08	0,07	0,09	0,08	0,01	9,98
630	0,09	0,09	0,10	0,09	0,01	5,87
800	0,11	0,12	0,13	0,12	0,01	4,96
1000	0,11	0,10	0,13	0,11	0,01	7,88
1250	0,13	0,10	0,15	0,12	0,02	13,39
1600	0,17	0,10	0,21	0,16	0,04	23,67
2000	0,18	0,12	0,24	0,18	0,04	24,19
2500	0,21	0,15	0,21	0,19	0,02	11,25
3150	0,25	0,17	0,22	0,21	0,03	12,60
4000	0,31	0,15	0,26	0,24	0,06	23,41
5000	0,41	0,13	0,25	0,26	0,10	37,18

(Fuente: Propia)