

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

**Diseño y evaluación de mezclas de cemento polimérico como material
alternativo para la fabricación de instrumentos musicales**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Químico

Autor:

Camilo Sebastián Llivicura Landázuri

Director:

María Eulalia Vanegas Peña

ORCID:  0000-0003-1976-8346

Cuenca, Ecuador

2024-11-27

Resumen

Este trabajo de titulación presenta un estudio sobre la viabilidad de utilizar cemento polimérico como material alternativo a la madera en la fabricación de instrumentos musicales. Se diseñaron y evaluaron mezclas de cemento Portland y resina epóxica en diferentes proporciones y se analizó sus propiedades mecánicas: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, densidad y porcentaje de elasticidad. Los resultados muestran que la mezcla 1:1 (cemento-resina) ofrece propiedades aceptables, con una resistencia a la compresión de 25.35 MPa, una resistencia a la flexión de 13.8 MPa, una densidad de 1.46 g/cm³ y un porcentaje de elasticidad del 1.76%. Con esta mezcla se fabricó un prototipo de instrumento musical (Bajo Eléctrico), demostrando su viabilidad estructural como alternativa a los materiales tradicionales.

Palabras clave del autor: materiales compuestos, resina epóxica, propiedades mecánicas, prototipo, ensayos mecánicos



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This undergraduate thesis presents a study on the viability of using polymer concrete as an alternative material to wood in the manufacture of musical instruments. Mixtures of Portland cement and epoxy resin were designed and evaluated in various proportions, with their mechanical properties analyzed: compressive strength, flexural strength, density, and elasticity percentage. The results indicate that the 1:1 (cement-resin) mixture provides acceptable properties, with a compressive strength of 25.35 MPa, a flexural strength of 13.8 MPa, a density of 1.46 g/cm³, and an elasticity percentage of 1.76%. Using this mixture, a prototype musical instrument (electric bass guitar) was manufactured, demonstrating its structural viability as an alternative to traditional materials.

Author Keywords: composite materials, epoxy resin, mechanical properties, prototype, mechanical testing



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Dedicatoria	7
Agradecimientos	8
Introducción	9
Objetivos	11
Objetivo General	11
Objetivos Específicos	11
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	12
1.1 Fabricación Tradicional de Instrumentos Musicales	12
1.2 Elección de las Maderas en la Fabricación Tradicional	12
1.3 Propiedades Mecánicas de la Madera	13
1.4 Nuevos Materiales y Técnicas en la Fabricación de Instrumentos Musicales	14
1.5 Cemento Portland	15
1.5.1 Propiedades	16
1.5.2 Cemento Portland modificado	17
1.6 Resina Epóxica	17
1.7 Mezclas de Cemento Portland y Resina Epóxica	19
1.8 Cemento polimérico como material alternativo a la madera	19
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	22
2.1 Diseño metodológico	22
2.2 Diseño de mezclas cemento-resina polimérica	22
2.3 Caracterización de las propiedades mecánicas	24
2.3.1 Ensayo de resistencia a la flexo-tracción y obtención del porcentaje de elasticidad	24
2.3.2 Ensayo de Resistencia a la Compresión	25
2.3.3 Obtención de la densidad	26

2.4 Selección de la mezcla con mejores propiedades mecánicas	27
2.5 Fabricación del molde para bajo eléctrico	27
2.6 Fabricación del prototipo de bajo eléctrico	28
2.7 Análisis de interacción de variables (ANOVA, MANOVA)	29
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1 Características generales de las mezclas de cemento polimérico	31
3.2 Densidad	33
3.3 Ensayo de compresión	34
3.4 Ensayo de flexión y porcentaje de elasticidad	37
3.5 Análisis ANOVA	42
3.6 Análisis MANOVA	45
3.7 Selección de la mezcla	47
3.8 Prototipo de bajo eléctrico	49
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
4.1 Conclusiones	51
4.2 Recomendaciones	52
Referencias	53
Anexos	58

Indice de Figuras

figura 1. Aspecto de las probetas para compresión	32
figura 2. Porcentaje de resina % vs Densidad	34
figura 3. Porcentaje de resina vs Resistencia a la compresión	36
figura 4. Fractura Mezclas (3:1, 2:1, 1:1, 2:1, 3:1)	38
figura 5. Curva deformimétrica alargamiento vs Carga	39
figura 6. Porcentaje de Resina vs Porcentaje de Elasticidad	40
figura 7. Porcentaje de Resina vs Resistencia a la flexión	41
figura 8. Prototipo de bajo eléctrico	50

Indices de Tablas

tabla 1. Porcentaje de componentes por formulación	23
tabla 2. Resultados ANOVA Densidad Cemento - Resina	43
tabla 3. Resultados ANOVA Compresión Cemento - Resina	43
tabla 4. Resultados ANOVA Flexión Cemento - Resina	44
tabla 5. Resultados ANOVA Porcentaje de elasticidad Cemento - Resina	45
tabla 6. Resultados MANOVA Cemento - Resina	46
tabla 7. Valores obtenidos - Valores esperados	48

Dedicatoria

A Dios que nos permitió escoger un destino, a la Patria que me vio nacer y me vera devolver todo lo que se me confió, a mis Padres que me vieron crecer y me verán ser quien debo ser.

“Sic Mundus Creatus Est

E Pluribus Unum

In Deo Speramus”

Agradecimientos

A mi madre la Doctora Mónica Landázuri, quien que con su fe inquebrantable y férrea decisión, quien sorteando elocuentemente mis prejuicios y dudas, fue mi apoyo espiritual, quien sin escatimar en el precio de la persecución del conocimiento fue mi apoyo económico, quien me enseñó que el equilibrio y sensatez son la clave para tomar decisiones, quien que con su paciencia ha sosegado mi carácter, y quien sin lugar a dudas es uno de los pilares fundamentales que me han traído hasta este momento.

A mi Padre el Doctor Paulino Llivicura, quien que con su buen consejo, su fe ciega y voluntad inquebrantable, quien a pesar de lo complejo de mi carácter fue mi apoyo ante la prepotencia del hombre, quien que me enseñó a comprender verdades y hechos que van mas allá de mi persona, quien con su absoluta perseverancia me enseñó aquello por lo vale la pena prevalecer.

A mi hermano, el Psicólogo Carlos Llivicura, quien que con su preocupación por mi persona, quien con su buen consejo, su apoyo y compañía me hizo ver el lado bueno en un entorno adverso.

A mi directora de tesis la Doctora María Eulalia Vanegas, quien con sus palabras precisas cual cirujano defendió mis ideas, quien depositó su fe en mi proyecto, quien confió en mi responsabilidad con este trabajo, reafirmandome en el camino de la ciencia, y guiándome con bondad y paciencia a concretar esta investigación.

Al Doctor Christian Cruzat quien me ha brindado su conocimiento y buen criterio, ayudándome a sortear diferentes obstáculos técnicos que encontré en mi investigación.

Al Arquitecto Juan Uyaguari quien confiando en la viabilidad de mi investigación ha entregado su conocimiento y sapiencia, gestionado facilidades, instruido y sugerido, en miras de lograr los resultados que mi investigación perseguía.

A la señorita Ariel Calvopiña, quien que con su buena voluntad me asistió durante todo el proceso experimental, quien a pesar de las largas horas de esfuerzo intelectual y físico, de manera desinteresada colaboró con su incansable auxilio técnico.

Introducción

La fabricación artesanal de instrumentos musicales ha sido una tradición que se remonta al siglo XVI en Europa, donde luthiers altamente calificados como Antonio Stradivari creaban violines y otras obras maestras a través de un proceso que podía tomar más de un año por instrumento (Pollens, 2004; Rossing, 2010). Esta artesanía se fundamentaba en la selección de maderas nobles como el arce, el ébano y la caoba, reconocidas por sus propiedades acústicas y estéticas (Bucur, 2006; Yoshikawa, 2010). Sin embargo, la demanda creciente y la tala excesiva han provocado una creciente escasez de estas especies, con precios que alcanzan los \$8,000 por metro cúbico para el ébano macizo de alta calidad (Gil, 2016).

Ante esta problemática, las grandes marcas de instrumentos musicales han explorado el uso de materiales innovadores como resinas, fibras de carbono y compuestos sintéticos (Hart, 2022). Por ejemplo, la compañía norteamericana de instrumentos musicales Fender posee un laboratorio de innovación en California dedicado a explorar estas alternativas, mientras que Gibson otra compañía también ha experimentado con técnicas como el uso de láseres y la ionización para alterar propiedades tonales de metales probando materiales como el aluminio (Devine, 2022; Michon, 2018). No obstante, la adopción generalizada de estas tecnologías aún enfrenta importantes limitaciones económicas, ya que los costos de producción resultan sustancialmente más elevados en comparación con las maderas tradicionales. Además, persiste una resistencia por parte de los músicos y el público, quienes perciben una calidad inferior en instrumentos no fabricados con maderas naturales (Oppermann et al., 2020). Actualmente, a pesar de la innovación constante, la enorme mayoría de los modelos populares y exitosos continúan utilizando construcciones tradicionales o mixtas con maderas nobles, sin embargo cada vez se observan más instrumentos de materiales no convencionales (Michon, 2018).

En este contexto, el cemento polimérico, es una mezcla de cemento Portland con polímeros orgánicos e inorgánicos, (para efectos de este trabajo de titulación, se referirá como **cemento polimérico** a la mezcla específica de cemento portland con resina epóxica) emerge como un material prometedor que podría representar una alternativa viable a la madera en la fabricación de instrumentos musicales de alta calidad (Mohammadi et al., 2009; Singh, 2018; Abd El Rahman et al., 2022;). Este material compuesto ha ganado relevancia en diversas aplicaciones de construcción e ingeniería civil, como la fabricación de tuberías, revestimientos protectores, piezas prefabricadas y paneles de construcción, debido a su versatilidad, resistencia y costo competitivo (Mohammadi et al., 2009; Singh,

2018). Sin embargo, su potencial en la fabricación de instrumentos musicales no ha sido explorado a fondo.

La evaluación de las propiedades mecánicas del cemento polimérico, como la resistencia a la flexo-tracción, la densidad, la resistencia a la compresión y el porcentaje de elasticidad, desempeña un papel crítico en determinar su idoneidad como sustituto de la madera en la construcción de instrumentos musicales. Estas propiedades influyen directamente en aspectos fundamentales como la capacidad de soportar las tensiones de las cuerdas, la resonancia adecuada, la proyección del sonido, la durabilidad y la estabilidad tonal ante cambios de temperatura (Youssef, 1976; Kasal, 2016;).

Investigaciones previas han arrojado resultados para el cemento polimérico. Estudios sobre mezclas de cemento Portland con resina epóxica han alcanzado resistencias a la flexión de hasta 108 MPa (He et al., 2019), superando los 40-150 MPa típicos de maderas como arce y fresno (Yoshikawa, 2010). En cuanto a la densidad, las mezclas con polietileno y polipropileno varían entre 1600 y 2000 Kg/m³ (Mohammadi et al., 2008), y aquellas con resina epóxica llegan a 1980 Kg/m³, adecuadas para instrumentos de 3 Kg (Hunter, 1999; Zhou et al., 2021). La resistencia a la compresión del cemento polimérico también es notable, alcanzando 98 MPa en formulaciones con resina epóxica, superando el rango típico de 25-70 MPa de las maderas (Jo et al., 2007; He et al., 2019). Finalmente, en cuanto al porcentaje de elasticidad, el cemento polimérico con resina epóxica logra hasta 6.4%, mejorando los 4-6% de maderas como fresno, arce y nogal (Kasal, 2016).

A pesar de estos avances prometedores, persisten vacíos en la comprensión de las propiedades mecánicas del cemento polimérico y su aceptabilidad específica en el contexto de la fabricación de instrumentos musicales de alta calidad. Si bien se han realizado investigaciones preliminares sobre este material en aplicaciones de construcción e ingeniería civil, es posible evaluar su idoneidad en el ámbito singular de la Luthería. Por ello, el presente proyecto de investigación tiene como propósito el diseño y evaluación de mezclas de cemento polimérico que presenten propiedades mecánicas específicas y estructurales de los instrumentos musicales. Se llevará a cabo la evaluación de la densidad para lograr un control preciso del peso y la resonancia, así como la medición de la resistencia a la tracción, al impacto y la elasticidad, para garantizar la capacidad del material de soportar las tensiones mecánicas y vibraciones a las que se ve sometido durante la ejecución musical.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar y evaluar mezclas de cemento polimérico con el propósito de determinar si sus propiedades mecánicas son aceptables para fabricar instrumentos musicales.

Objetivos Específicos

- Preparar mezclas de cemento Portland y resina polimérica con diferentes proporciones, siguiendo procedimientos normalizados
- Evaluar las propiedades mecánicas clave de las mezclas cemento-resina polimérica, incluyendo resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, porcentaje de elasticidad y densidad, mediante ensayos normalizados según estándares internacionales.
- Fabricar un prototipo de instrumento musical utilizando la mezcla de cemento polimérico que presentó las mejores propiedades mecánicas, demostrando su aceptabilidad práctica y aplicabilidad.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Fabricación Tradicional de Instrumentos Musicales

El proceso tradicional de fabricación de instrumentos musicales tiene una larga y rica historia que se remonta al siglo XVI en Europa. La luthería como oficio especializado en la creación artesanal de instrumentos de cuerda surge durante el Renacimiento Italiano, época en la que destacan reconocidos luthiers como la familia Stradivari en Cremona. Los violines y otros instrumentos de cuerda creados por Stradivari se consideran obras maestras que hasta el día de hoy son reproducidas e inspiraciones para luthiers modernos (Pollens, 2010).

Además de los Stradivari, otras familias de luthiers italianos sentaron las bases de la fabricación tradicional de instrumentos durante esta época, como los Amati y Guarneri en Cremona, y los Guadagnini en Piacenza. Sus técnicas, materiales y diseños icónicos definen los estándares clásicos en luthería que perduran después de cientos de años (Pollens, 2010).

En los siglos posteriores, la fabricación artesanal de instrumentos musicales continuó concentrándose en Europa, donde surgieron nuevas escuelas y tradiciones regionales. Los luthiers alemanes, franceses y españoles adoptaron técnicas distintivas, dando origen a variaciones en cuanto al modelo, forma, tamaño y sonoridad característica de sus instrumentos. Pero en esencia, se conservó un proceso meticuloso de selección de maderas nobles y un paciente trabajo manual para esculpir y dar forma al instrumento según parámetros acústicos y estéticos.

Hasta el día de hoy, la fabricación puramente artesanal de instrumentos en talleres de luthiers calificados, ha sido muy valorada por procurar alta calidad a partir de maderas selectas y técnicas que confieren a cada instrumento un carácter y cualidades tonales únicas. Sin embargo, este tipo de producción es limitada debido a la complejidad y el tiempo que demanda cada instrumento, lo que restringe el acceso para muchos músicos (Bader, 2013)

1.2 Elección de las Maderas en la Fabricación Tradicional

La selección de las maderas constituye una etapa fundamental dentro del proceso tradicional de fabricación de instrumentos musicales. Las maderas empleadas suelen ser preciosas, escasas y de alto costo, lo que se justifica por sus cualidades tonales y estéticas.

Desde los tiempos de Stradivari, maderas como el arce, el ébano y la caoba han sido históricamente las más cotizadas por luthiers y fabricantes de instrumentos debido a atributos como su densidad, capacidad de propagación del sonido y singular belleza en sus vetas naturales. Por ejemplo, el uso de caoba en la tapa de un violín es esencial para proyectar resonancias cálidas y profundas (Bucur, 2006).

En los bajos eléctricos modernos, maderas como el arce, el fresno, el maple y el nogal se han popularizado por aportar un sonido equilibrado, cálido y con rangos dinámicos balanceados. Las maderas duras como el arce se usan en el cuerpo y mástil, mientras que maderas livianas como el aliso se prefieren para la cejuela por su capacidad de sostener la tensión de las cuerdas afinadas (Yoshikawa, 2010).

Según un informe de la Universidad de Cambridge (Gil, 2016), el precio del ébano macizo de alta calidad supera actualmente los \$8,000 dólares por metro cúbico, mientras que la caoba genuina alcanza \$2,500 dólares por metro cúbico. Estos valores prohibitivos se explican por la tala excesiva y comercio irregular que estas especies han enfrentado. Otras maderas como el maple y el fresno también tienen costos elevados debido a su alta demanda y relativa escasez.

1.3 Propiedades Mecánicas de la Madera

La resistencia a la flexión (o flexo-tracción) se define como el esfuerzo máximo que soporta la madera antes de romperse cuando se somete a una carga de flexión. Esta propiedad es esencial en la construcción de instrumentos musicales, donde el cuerpo del instrumento debe soportar las tensiones producidas por las cuerdas tensadas (Dinulică, Stanciu, & Savin, 2021; Universidad de Washington, 2023).

La densidad, que corresponde a la relación masa/volumen de la madera, usualmente se expresa en Kg/m^3 o g/cm^3 (ISO 13061-2, 2014). Esta propiedad afecta directamente la velocidad de propagación de las ondas sonoras a través de la madera. Una densidad óptima contribuye a alcanzar una resonancia completa y una proyección equilibrada del sonido en todos los rangos de frecuencia (Youssef, 1976).

La resistencia a la compresión, definida como el esfuerzo máximo que puede soportar la madera cuando se aplica una carga de compresión, se mide generalmente en MPa o N/mm^2 (ASTM D143, 2014). Esta propiedad es crucial para evaluar la capacidad de la madera para soportar cargas axiales de compresión sin fracturarse, lo cual es importante en la durabilidad estructural de los instrumentos musicales.

El porcentaje de elasticidad, que corresponde a la deformación máxima recuperable que experimenta la madera al someterse a una carga, antes de sufrir una deformación permanente (Kollmann & Cote, 1968). Esta propiedad permite a la madera flexionarse ligeramente ante fuerzas de tracción o compresión para luego recobrar su forma original una vez cesa la carga, contribuyendo a evitar daños estructurales y proporcionando estabilidad en la respuesta tonal (Forest Products Laboratory, 2010).

Las maderas más nobles y apreciadas como el arce, ébano y caoba, presentan una densidad entre 500-650 Kg/m³, resistencia a la flexión de 60-160 MPa, porcentaje de elasticidad de 2-6% y resistencia a la compresión paralela a la fibra de 20-80 MPa (Green et al., 2010). Estos valores son adecuados para la propagación y proyección del sonido.

Maderas más comunes en instrumentos musicales como el fresno, maple y nogal, poseen rangos mas amplios e inferiores pero adecuados. Por ejemplo, la densidad va de 600-800 Kg/m³, resistencia a la flexión entre 14-120 MPa y resistencia a la compresión paralela a la fibra de 20-70 MPa (Kretschmann, 2010).

La creciente escasez de maderas nobles impulsa la necesidad de desarrollar materiales alternativos que mediante control de propiedades físico-mecánicas puedan igualar o superar las cualidades acústicas de la madera natural, un desafío para la ingeniería moderna.

1.4 Nuevos Materiales y Técnicas en la Fabricación de Instrumentos Musicales

Ante la creciente escasez y costos de maderas nobles, marcas icónicas como Fender y Gibson han comenzado a experimentar con nuevos materiales y técnicas para la fabricación de instrumentos. (Frontier Group, 2023).

Fender posee un avanzado laboratorio de innovación en California dedicado a explorar alternativas como resinas, fibras de carbono y diversos compuestos sintéticos (Hart, 2022)

Por su parte, Gibson investiga métodos como el uso de láseres para perforaciones elaboradas en la madera y técnicas de ionización para alterar propiedades tonales. También han probado materiales como el aluminio en la construcción de guitarras (Devine, 2022; Michon, 2018).

Sin embargo, la adopción masiva de estos materiales y tecnologías innovadoras en instrumentos enfrenta importantes limitaciones. Los costos de producción resultan sustancialmente más elevados comparados con las maderas tradicionales. Por otro lado, los músicos y el público muestran escepticismo y resistencia ante instrumentos no

fabricados con maderas naturales, asociándolos a una calidad y prestigio menores (Oppermann et al., 2020).

Por estas razones, a pesar de los constantes avances e innovación en nuevos materiales y procesos de fabricación por parte de las grandes marcas de instrumentos musicales, la enorme mayoría de los modelos populares y exitosos continúan realizándose con maderas nobles empleando construcción tradicional o mixta, hasta el día de hoy.(Acoustic Guitar, 2023; The Guitar Journal, 2021).

1.5 Cemento Portland

El cemento portland es un material versátil que se produce en diferentes tipos, cada uno con características específicas que lo hacen adecuado para diferentes aplicaciones. Algunos de los tipos más comunes de cemento portland son (Kosmatka et al., 2003):

Cemento Portland Ordinario (Tipo I): Es el cemento más utilizado y se emplea en construcciones generales que no requieren propiedades especiales. Desarrolla una resistencia inicial moderada.

Cemento Portland Moderado (Tipo II): Tiene una resistencia inicial ligeramente más baja que el Tipo I, pero desarrolla una mayor resistencia a largo plazo. Se utiliza cuando se requiere un calor de hidratación moderado.

Cemento Portland de Alta Resistencia Inicial (Tipo III): Desarrolla una alta resistencia a edades tempranas, alcanzando su resistencia de diseño en aproximadamente una semana. Se utiliza cuando se necesita un rápido desencofrado o puesta en servicio.

Cemento Portland Puzolánico (Tipo IP, P): Contiene puzolanas naturales o artificiales, lo que le confiere una mayor resistencia a los sulfatos y al ataque químico. Además, reduce el calor de hidratación y la permeabilidad.

Cemento Portland Resistente a los Sulfatos (Tipo V): Diseñado para proporcionar una alta resistencia a los sulfatos presentes en suelos y aguas subterráneas. Se utiliza en estructuras expuestas a ambientes agresivos.

Cada tipo de cemento portland tiene sus propias características en términos de resistencia, calor de hidratación, resistencia química y tiempo de fraguado, lo que permite seleccionar el más adecuado para cada proyecto de construcción (Taylor, 1997).

1.5.1 Propiedades

La caracterización de las propiedades mecánicas del cemento Portland es esencial para comprender el comportamiento de este material y evaluar su idoneidad en diversas aplicaciones de ingeniería y construcción. Entre los parámetros críticos que definen el desempeño mecánico del cemento se encuentran la resistencia a la tracción, resistencia al impacto, densidad y porcentaje de elasticidad.

La resistencia a la flexión se define como la máxima tensión que puede soportar el material antes de fracturarse cuando se somete a una carga de flexión y es una medida fundamental de la habilidad del cemento para resistir cargas transversales (Mindess & Young, 2002). Estudios indican que la resistencia a la flexión del cemento Portland puro puede variar entre 3-12 MPa dependiendo de factores como la relación agua/cemento, curado y aditivos (Neville, 2011).

Por otro lado, la resistencia a la compresión determina la capacidad del cemento para soportar cargas axiales de compresión sin fallar (ASTM C109, 2020). Investigaciones reportan valores típicos de 20-40 MPa a los 28 días para especímenes de cemento Portland convencional, aunque con diseños y aditivos especiales se pueden alcanzar hasta 100 MPa (Mehta & Monteiro, 2017).

La resistencia a la compresión de morteros de cemento es una propiedad fundamental, ya que el cemento se utiliza principalmente en elementos estructurales diseñados para soportar cargas de compresión. Según la norma ASTM C109, que utiliza cubos de mortero de 50 mm, los valores mínimos de resistencia a la compresión para cementos Portland Tipo I a los 28 días son de 28 MPa. Sin embargo, en la práctica, los morteros de cemento suelen superar estos valores mínimos. Estudios señalan que la resistencia a la compresión típica de morteros a los 28 días está en el rango de 20 a 50 MPa, dependiendo de factores como la relación agua/cemento (w/c) y la calidad de los materiales (Gambhir, 2013). Con diseños optimizados, bajas relaciones a/c (0.3-0.4) y cementos de alta calidad, es posible alcanzar resistencias de 60 a 70 MPa (Obla, 2014) en estos diseños la incorporación de aditivos como humo de sílice o cenizas volantes puede aumentar aún más la resistencia.

En cuanto a la densidad, es relevante para el peso y la absorción de vibraciones, el cemento Portland puro presenta una densidad media de aproximadamente 3000 Kg/m³ (Kosmatka et al., 2003). No obstante, esta propiedad puede modificarse mediante aditivos, agregados y procesos de curado.

Finalmente, la elasticidad del cemento Portland se reporta entre 1 - 2% dependiendo de la composición de la mezcla (Taylor, Kosmatka, & Voigt, 2019).

1.5.2 Cemento Portland modificado

El cemento portland modificado es un tipo de cemento que puede tener puzolanas, que son materiales silíceos o sílico-aluminosos que por sí mismos tienen poco o ningún valor cementante, pero que finamente molidos y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes (Thomas, 2013).

Una de las características más importantes del cemento portland modificado con puzolanas es su baja generación de calor de hidratación. Durante el proceso de hidratación del cemento, se liberan grandes cantidades de calor debido a las reacciones químicas exotérmicas. En estructuras de gran masa, como presas, esta liberación de calor puede generar gradientes térmicos y esfuerzos internos que pueden conducir a la fisuración y el agrietamiento (Kosmatka & Wilson, 2016).

Las puzolanas presentes reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, consumiendo este compuesto y reduciendo la cantidad de calor liberado. Estudios han demostrado que se puede reducir la generación de calor de hidratación en hasta un 60% en comparación con el cemento portland ordinario (Juenger et al., 2019).

Esta propiedad de baja generación de calor de hidratación hace que el cemento portland modificado con puzolanas sea especialmente adecuado para su uso en donde el control de la temperatura durante el fraguado y el endurecimiento es crucial para evitar agrietamientos y daños (Gartner & Hirao, 2015).

Además de la reducción en la generación de calor, el cemento portland modificado con puzolanas también ofrece otras ventajas, como una mayor resistencia a los sulfatos, una mayor impermeabilidad y una mayor durabilidad en ambientes agresivos (Scrivener et al., 2018).

1.6 Resina Epóxica

La resina epóxica es un material polimérico ampliamente utilizado en diversas aplicaciones de ingeniería y construcción debido a sus propiedades mecánicas. Las resinas epóxicas

consisten en una resina base y un agente catalizador o endurecedor, que al mezclarse desencadenan una reacción de polimerización que solidifica el material (Joshi et al., 2020).

Entre las propiedades críticas que definen el comportamiento mecánico de las resinas epóxicas se encuentran la resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, dureza y porcentaje de elasticidad. La resistencia a la flexión es una propiedad crucial en las resinas epóxicas, especialmente en aplicaciones donde se espera que el material soporte cargas transversales o vibraciones, como en la fabricación de instrumentos musicales. Los valores de resistencia a la flexión para resinas epóxicas pueden variar significativamente dependiendo de la formulación específica, el tipo de endurecedor, la temperatura de curado y la presencia de cargas o refuerzos. Estudios sobre resinas epóxicas terminadas en butadieno, reportan resistencias a la flexión entre 10 y 110 MPa (Jin & Park, 2019). Por otro lado, resinas epóxicas de grado estructural pueden alcanzar resistencias a la flexión de 100 a 150 MPa (Pascault et al., 2002). Estas resinas son comunes en aplicaciones aeroespaciales y de alta ingeniería. Para resinas epóxicas utilizadas en aplicaciones más generales, como adhesivos o recubrimientos, los valores típicos están en el rango de 20 a 120 MPa (Ratna, 2009). Es importante notar que la adición de fibras o partículas (como fibra de vidrio o carbono) puede aumentar dramáticamente estos valores, pero eso ya sería un material compuesto, no una resina pura. La resistencia a la compresión de las resinas epóxicas es una propiedad menos discutida que su resistencia a la tracción o flexión, pero es igualmente importante en aplicaciones donde el material puede estar sujeto a cargas de compresión, las resinas epóxicas típicas tienen resistencias a la compresión en el rango de 10 a 200 MPa (Barbero, 2017). Este rango es consistente con lo reportado en literatura donde se indica que las resinas epóxicas curadas con endurecedores a base de aminas pueden alcanzar resistencias a la compresión de 9 a 190 MPa (Ellis, 1993). Sin embargo, la resistencia puede variar significativamente dependiendo del tipo de resina y endurecedor, algunas formulaciones especiales, como las resinas epóxicas novolacas, pueden alcanzar resistencias a la compresión de hasta 250 MPa debido a su mayor grado de entrecruzamiento (Ratna, 2009). Es interesante notar que, a diferencia de muchos otros materiales, las resinas epóxicas a menudo tienen resistencias a la compresión significativamente mayores que sus resistencias a la tracción o flexión. Esto se debe a su estructura molecular entrecruzada, que es más eficaz para resistir cargas de compresión que cargas de tracción.

Gracias a esta combinación de propiedades, las resinas epóxicas tienen diversas aplicaciones estructurales como adhesivos, recubrimientos protectores, compuestos de

matriz polimérica reforzados con fibra, entre otros usos que aprovechan su alta resistencia y capacidad de unión (Joshi et al., 2020).

1.7 Mezclas de Cemento Portland y Resina Epóxica

El cemento Portland y la resina epóxica son dos materiales que pueden combinarse para formar un material compuesto con propiedades mejoradas. La resina epóxica actúa como aglomerante que refuerza la microestructura de la matriz de cemento Portland y mejora propiedades como resistencia mecánica, adherencia y durabilidad (Hou et al., 2021).

Las proporciones de la mezcla cemento-epóxica pueden variar ampliamente dependiendo de la aplicación y requerimientos específicos. Las investigaciones de Wang et al. (2020) indican que las proporciones mas usadas se encuentran entre 15-25% de resina epóxica en peso respecto al contenido de cemento. Proporciones mayores al 35% no necesariamente incrementan la resistencia mecánica.

Entre los usos más comunes de estas mezclas se encuentran su uso como recubrimientos y revestimientos, la incorporación de resina epóxica en un 10-20%, el recubrimiento cementicio mejora significativamente la resistencia al impacto, abrasión y permeabilidad (Rosales et al., 2022). Se usa en pisos industriales, cerámicas y en revestimientos para concreto expuesto a ambientes agresivos, también se encuentra en materiales compuestos ,las mezclas con 15-35% de resina epóxica se pueden reforzar con fibras naturales y sintéticas, mejorando propiedades como tenacidad y capacidad de carga (Wang et al., 2020). Esto permite crear materiales compuestos de alto desempeño estructural., entre otra de sus aplicaciones se encuentra la reparación y refuerzo de estructuras, la excelente adherencia de la resina epóxica la hace ideal como adhesivo estructural para reparar grietas y unir elementos. También se usa para encapsular varillas de refuerzo y anclajes (Hou et al., 2021). Aprovechando la capacidad de moldeo y los acabados de alta calidad que aporta la resina, es posible fabricar piezas premoldeadas para usos ornamentales y de construcción.

1.8 Cemento polimérico como material alternativo a la madera

El cemento polimérico es un material compuesto definido como una mezcla de cemento Portland con polímeros orgánicos e inorgánicos, que presenta mejoras en las propiedades mecánicas y de durabilidad en comparación con el concreto convencional (Ohama, Y., 1997). Debido a características únicas como versatilidad, resistencia y costo competitivo, el cemento polimérico ha ganado relevancia en diversas aplicaciones de construcción e

ingeniería civil, incluyendo la fabricación de tuberías, revestimientos protectores, piezas prefabricadas, paneles de construcción, entre otros usos estructurales y decorativos (Mohammadi et al., 2009; Singh, 2018).

La evaluación de las propiedades mecánicas del cemento polimérico desempeña un papel crítico para poder plantear este material como una alternativa aceptable a la madera en la construcción de instrumentos musicales. Es esencial comprender y cuantificar sus propiedades mecánicas. El enfoque principal se centra en propiedades mecánicas clave, como la resistencia a la flexión, la densidad, la resistencia a la compresión y el porcentaje de elasticidad (Brandt, 2009).

Esto se debe a que los requerimientos específicos de los instrumentos musicales, como resonancia, proyección del sonido, capacidad de soportar tensiones, durabilidad en general del instrumento y mantenimiento, demandan una caracterización de propiedades mecánicas clave del cemento polimérico para determinar si este material puede desempeñarse como sustituto de la madera (Wegst, 2006).

Estudios han demostrado que la resistencia a la flexión puede variar según la composición de la mezcla. Por ejemplo, investigaciones sobre mezclas de cemento Portland con látex estireno-butadieno (SBR) han demostrado una resistencia a la flexión de hasta 50 MPa (Jo et al., 2007). Sin embargo, el uso de resina epóxica como polímero en la fabricación de cemento polimérico presenta mayores valores. He et al. (2019) obtuvieron una resistencia a la flexión de 108 MPa al añadir resina epóxica al cemento Portland, con aditivos, plastificantes, fibras y fraguado sistemático. Las maderas tradicionales usadas en la fabricación de bajos eléctricos suelen tener valores de resistencia a la flexión de entre 14 y 120 MPa.

La densidad del cemento polimérico impacta en la fabricación de instrumentos musicales, dado que esta propiedad determina si el instrumento puede ser macizo o vaciado (cuando se usan materiales densos, se ajusta el peso del instrumento vaciando partes del cuerpo del mismo). Las maderas tradicionales usadas en la fabricación de bajos eléctricos suelen tener valores de densidad de entre 650 y 800 Kg/m³; el peso de un bajo eléctrico suele estar entre los 3 y 15 Kg (Hunter, 1999). Investigaciones sobre mezclas de cemento polimérico con cemento Portland, polietileno (PE) y polipropileno (PP) han logrado ajustar la densidad entre 1600 y 2000 Kg/m³ (Mohammadi et al., 2008). Utilizando resina epóxica como polímero en la mezcla de cemento, se alcanzó una densidad de 1980 Kg/m³, un valor trabajable para aplicaciones en instrumentos musicales vaciados (Zhou et al., 2021).

El cemento polimérico presenta resistencia a la compresión según su formulación. Jo et al. (2007) obtuvieron una resistencia a la compresión de 55 MPa en mezclas con látex SBR. Con resina epóxica se alcanzan valores mayores, como 98 MPa reportados por He et al. (2019) en mezclas cemento-epoxi. Las maderas tradicionales usadas en la fabricación de bajos eléctricos suelen tener valores de resistencia a la compresión de entre 25 y 70 MPa.

El porcentaje de elasticidad es relevante en instrumentos musicales, pues esta propiedad está relacionada con la capacidad del instrumento para soportar las tensiones de las cuerdas y su estabilidad ante cambios de temperatura. El uso de poliacetato de vinilo (PVAc) con cemento Portland en mezclas de cemento polimérico alcanza un 3% de elasticidad (Palson & Vidivelli, 2017). En mezclas que usan resina epóxica con cemento Portland se mejora este valor, con un 6.4% de elasticidad en mezclas estudiadas por He et al. (2019).

En ese sentido, el presente proyecto de investigación tiene como propósito el diseño y evaluación de mezclas de cemento polimérico que presenten propiedades mecánicas específicas, atendiendo las necesidades de los instrumentos musicales. Se llevará a cabo la evaluación de la densidad para lograr un control preciso del peso y la resonancia, así como la medición de la resistencia a la flexión para garantizar la capacidad del material de soportar las tensiones mecánicas a las que se ve sometido en la construcción de instrumentos. Los resultados sentarán bases para determinar la aceptabilidad del cemento polimérico como alternativa a la madera en la fabricación de instrumentos musicales.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 Diseño metodológico

Se optó por un diseño metodológico de tipo experimental debido a la naturaleza del proyecto, el cual implicaba la preparación y evaluación de mezclas. Este enfoque experimental permitió un control de las variables y la obtención de datos cuantitativos sobre las propiedades mecánicas de las mezclas cemento-resina polimérica. Asimismo, facilitó la comparación objetiva de los resultados obtenidos para diferentes composiciones.

Se seleccionaron cinco proporciones cemento-resina que abarcaron un rango amplio de contenidos de resina epóxica, desde bajas concentraciones hasta proporciones donde la resina fue el componente mayoritario. Esta diversidad en las composiciones permitió identificar tendencias y determinar una proporción con propiedades aceptables para cumplir con los requerimientos de un instrumento musical. Una vez que se prepararon las mezclas, se procedió a la caracterización de las propiedades mecánicas.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se seleccionó la mezcla que presentó una combinación aceptable de propiedades mecánicas para ser utilizada como material alternativo a la madera en la fabricación de un prototipo de un bajo eléctrico. Esta selección se realizó considerando factores clave como una adecuada resistencia a la flexo-tracción para soportar la tensión de las cuerdas, una alta resistencia a la compresión para garantizar la durabilidad del instrumento, un módulo de elasticidad compatible con los requerimientos de expansión-contracción, y una densidad apropiada para el control del peso y la proyección del sonido. El método de fabricación del instrumento fue por vertimiento en molde de silicona.

2.2 Diseño de mezclas cemento-resina polimérica

La selección de las proporciones cemento-resina epóxica a evaluar se realizó considerando varios factores clave. Se buscó que la cantidad de cemento fuera representativa en la mezcla final, dado que uno de los objetivos era obtener un material compuesto económicamente viable como alternativa a la madera. Por lo tanto, el cemento se mantuvo como el componente mayoritario en varias de las proporciones seleccionadas, y en aquellas mezclas en las que actuó como componente minoritario, su cantidad siguió siendo significativa, las cantidades se detallan en la **tabla 1**. Finalmente, se eligieron proporciones

relativamente sencillas de dosificar, con el fin de facilitar un eventual escalamiento a procesos industriales sin complejidades excesivas en la fabricación.

tabla 1. Porcentaje de componentes por formulación

Formulación	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3
Cemento (Porcentaje)	75%	66%	50%	34%	25%
Resina (Porcentaje)	25%	34%	50%	66%	75%

Estas proporciones cubrieron un rango amplio, desde mezclas con bajo contenido de resina hasta composiciones donde la resina fue el componente mayoritario.

Para la preparación de las mezclas, se utilizó cemento Portland “General Use” de la marca ecuatoriana “Guapan”, el cual se caracteriza por su baja generación de calor de hidratación y su resistencia a los sulfatos, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde el material podría estar sujeto a ataque químico. En el contexto de los instrumentos musicales, estas propiedades proporcionarían un instrumento duradero. La preparación de la pasta de cemento para todas las mezclas siguió los lineamientos establecidos en la norma INEN 488, con la consideración de que la relación agua/cemento utilizada fue de 0.3 en lugar de 0.48 como se sugería en la norma. Esta reducción en el contenido de agua tenía como objetivo obtener un cemento más resistente, ya que una menor relación agua/cemento conduce a una mayor resistencia final del material. Esta relación aseguró suficiente agua para la hidratación completa del cemento; una relación menor a la seleccionada no proporcionaría suficiente trabajabilidad y tendría riesgo de no hidratar completamente el cemento (Obla, 2014). Además, un menor contenido de agua en la mezcla redujo el riesgo de interferencia con el mecanismo de polimerización de la resina epóxica. Adicionalmente, se incorporó un plastificante a las mezclas con el fin de mejorar su trabajabilidad y aumentar la resistencia final de los compuestos. El plastificante utilizado fue Plastiment BV-40 de la marca Sika, se optó por este plastificante ya que la marca garantiza resultados consistentes, su trabajabilidad resulta conveniente, su suministro es constante, y esta disponible en volúmenes bajos, el plastificante se dosificó en una proporción de 0.8% en peso con respecto al contenido de cemento de cada mezcla. Este aditivo se añadió al agua de las mezclas siguiendo las instrucciones del fabricante.

La resina epóxica utilizada en las mezclas fue la Wesco Cast - 11, una resina de proporciones 1:1 que implicaba que la resina base y el endurecedor se suministraban en

cantidades iguales, se optó por esta resina ya que su trabajabilidad y tiempo de endurecimiento resultan convenientes y manejables (trabajabilidad durante 25 minutos a 25 °C, secado total en 1 día). Ambos componentes se mezclaron por separado antes de incorporarlos a la pasta de cemento, siguiendo las instrucciones del fabricante para garantizar una correcta polimerización. Finalmente, se combinó la pasta de cemento con la resina mezclada, para obtener la mezcla final de cada dosificación con 3 réplicas por cada una.

2.3 Caracterización de las propiedades mecánicas

La determinación de las propiedades mecánicas de las mezclas cemento-resina polimérica fue un aspecto crítico para evaluar su viabilidad como material alternativo a la madera en aplicaciones de fabricación de instrumentos musicales. Con este fin, se seleccionaron ensayos normalizados que permitieron cuantificar las propiedades clave requeridas para esta aplicación específica.

Los ensayos se llevaron a cabo utilizando una máquina de ensayos universal de la marca “Ele International”, modelo 36-0735/02, la cual contaba con una amplia capacidad de carga y sistemas de adquisición de datos automatizados. Esta máquina permitió aplicar las cargas y registrar las mediciones con precisión, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

2.3.1 Ensayo de resistencia a la flexo-tracción y obtención del porcentaje de elasticidad

Se realizó el ensayo de resistencia a la flexo-tracción en vigas de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM C293: "Método de Ensayo Estándar para la Resistencia a la Flexión del Concreto (utilizando vigas simplemente apoyadas con cargas en el centro del claro)". Este ensayo se llevó a cabo mediante el método de carga en los tercios del claro, donde la viga se apoyó en dos puntos y se aplicó una carga puntual en el tercio central del claro.

El procedimiento que se siguió durante la realización de este ensayo fue el siguiente:

1. Preparación de las probetas prismáticas de dimensiones 75 x 75 x 250 mm
2. Curado de las probetas durante 28 días en condiciones normalizadas antes del ensayo.
3. Acondicionamiento de las probetas a una temperatura de 23 ± 3 °C antes del ensayo.

4. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo, apoyada sobre dos puntos de soporte separados a un tercio de la luz entre apoyos (distancia entre apoyos de 250 mm).
5. Aplicación de una carga puntual en el tercio central del claro de la probeta, mediante un cabezal de carga a una velocidad constante de 0.05 a 0.08 mm/s.
6. Registro continuo de la carga aplicada y la deflexión correspondiente en el centro del claro, utilizando un sistema de adquisición de datos electrónico.
7. Continuación de la aplicación de carga hasta que se produjera la falla por flexión de la probeta.
8. Determinación de la carga máxima soportada por la probeta antes de la falla.
9. Cálculo de la resistencia a la flexo-tracción utilizando la carga máxima registrada y las dimensiones de la probeta, según la **ecuación 1**

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3 * \text{Carga (Kgf)} * \text{Longitud (cm)}}{2 * \text{Ancho (cm)} * \text{Profundidad}^2 \text{ (cm)}} \quad (\text{ec.1})$$

Durante este ensayo, además de determinar la resistencia a la flexo-tracción, se obtuvo el porcentaje de elasticidad del material utilizando la **ecuación 2** a partir de los datos de carga-deformación registrados.

$$\text{Porcentaje de elasticidad} = \frac{\text{Deformacion (mm)}}{\text{Longitud de la probeta (mm)}} * 100 \quad (\text{ec.2})$$

Esta propiedad fue crítica para evaluar la capacidad del instrumento musical para mantener una afinación estable ante variaciones de temperatura y adaptarse a la tensión ejercida por las cuerdas sin sufrir deformaciones permanentes.

El porcentaje de elasticidad se calculó mediante la relación entre la deflexión elástica y la deflexión máxima, utilizando las ecuaciones proporcionadas en el Anexo de la norma ASTM C293. Un adecuado porcentaje de elasticidad garantizaría que el instrumento pudiera recuperar su forma original después de someterse a las cargas temporales causadas por la tensión de las cuerdas, y cambios en la temperatura ambiental.

2.3.2 Ensayo de Resistencia a la Compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma INEN 488 "Hormigón de Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cúbicos de Hormigón". Esta norma ecuatoriana se basó

en la norma ASTM C109 "Método de Ensayo Estándar para la Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico".

El procedimiento que se siguió durante la realización de este ensayo fue el siguiente:

1. Preparación de las probetas cúbicas de 50 mm de arista
2. Curado de las probetas durante 28 días en condiciones normalizadas antes del ensayo.
3. Acondicionamiento de las probetas a una temperatura de 23 ± 3 °C antes del ensayo.
4. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo universal, asegurándose de que la carga se aplicara perpendicularmente a una de las caras de la probeta.
5. Aplicación de la carga a una velocidad constante hasta que se produjera la falla por compresión de la probeta.
6. Registro de la carga máxima soportada por la probeta antes de la falla.
7. Cálculo de la resistencia a la compresión utilizando la carga máxima registrada y el área de la sección transversal de la probeta, según la **ecuación 3**

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{\text{Carga (Kgf)}}{\text{Area Transversal (cm}^2\text{)}} \text{ (ec.3)}$$

2.3.3 Obtención de la densidad

Para obtener la densidad de las mezclas, se siguió un procedimiento sencillo y directo que consistió en la medición de la masa y el volumen de los especímenes preparados para los ensayos de resistencia a la compresión, es decir, los cubos de 50 mm de arista.

El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

1. Preparación de las probetas cúbicas de 50 mm de arista para cada una de las mezclas cemento-resina polimérica siguiendo los requisitos de la norma INEN 488.
2. Curado de las probetas durante 28 días en condiciones normalizadas.
3. Acondicionamiento de las probetas a una temperatura de 23 ± 3 °C antes de las mediciones.
4. Determinación de la masa de cada probeta utilizando una balanza de precisión de la marca "Ohaus Explorer", modelo EX24001, con una resolución de 0.001 g.
5. Registro de la masa de cada probeta.
6. Cálculo del volumen de cada probeta utilizando las dimensiones de 50 mm de arista, lo que resultó en un volumen conocido de 125 cm³ o 1.25×10^{-4} m³.

7. Cálculo de la densidad de cada probeta utilizando la **ecuación 4**

$$\text{Densidad} = \text{Masa/Volumen (ec.4)}$$

8. Cálculo de la densidad promedio para cada mezcla cemento-resina polimérica utilizando los valores individuales de las probetas correspondientes.

Este procedimiento se llevó a cabo con sumo cuidado para garantizar la precisión de las mediciones de masa y la integridad de las probetas. Todas las mediciones se realizaron en el laboratorio bajo condiciones controladas.

2.4 Selección de la mezcla con mejores propiedades mecánicas

Una vez determinadas las propiedades mecánicas de las diferentes mezclas cemento-resina polimérica evaluadas, se procedió a comparar los resultados obtenidos con los valores típicos reportados para las maderas comúnmente empleadas en la fabricación de bajos eléctricos, como el arce, el fresno y el nogal.

Esta comparación permitió identificar la mezcla que presentó la combinación más adecuada de propiedades mecánicas, tales como resistencia a la flexo-tracción, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y densidad, para cumplir con los requisitos estructurales y acústicos de un instrumento musical.

Es importante destacar que, si bien se buscó que las propiedades de la mezcla seleccionada igualaran o superaran los valores típicos de las maderas tradicionales, se contempló la posibilidad de que algunas propiedades se encontraran ligeramente por debajo de estos valores de referencia. En tal caso, se realizó una comparación con los valores de literatura para las maderas utilizadas en la fabricación de instrumentos musicales, para determinar si los valores obtenidos eran cercanos, y aceptables.

2.5 Fabricación del molde para bajo eléctrico

Para la fabricación del prototipo de bajo eléctrico utilizando la mezcla cemento-resina polimérica seleccionada, se requirió un molde adecuado que permitiera dar forma al instrumento. En este proyecto, se optó por contratar a la empresa local “La casa del molde” para la fabricación de un molde blando de silicona, esta empresa se especializa en la fabricación de moldes de este tipo que se emplean principalmente en el moldeado de piezas de cemento.

La elección de un molde de silicona se debió a las ventajas que ofrece este material para la fabricación de piezas con geometrías complejas y detalles finos. La silicona es un material flexible y elástico que facilita el desmoldeo de las piezas sin dañar el molde ni la pieza moldeada.

Se fabricó un molde de dos piezas para vaciado, diseñado específicamente para moldear las dos partes principales de un bajo eléctrico: el cuerpo y el mástil. Este enfoque de molde dividido en dos piezas facilitó el proceso de desmoldeo y permitió obtener piezas con geometrías complejas sin necesidad de realizar cortes o uniones posteriores.

El proceso de fabricación del molde comenzó con el uso de un modelo base en madera de un bajo eléctrico comercial de la marca “Long Xing”. Este modelo contaba con las dimensiones y la forma híbrida de un bajo eléctrico de 4 cuerdas estándar de las marcas Peavey e Ibanez.

Se aplicaron capas de silicona líquida sobre el modelo de madera, permitiendo que el material curara y adquiriera la forma deseada. Después de varios ciclos de aplicación y curado, se obtuvieron las dos piezas molde de silicona flexible y resistente.

2.6 Fabricación del prototipo de bajo eléctrico

Una vez seleccionada la mezcla cemento-resina polimérica más adecuada, se procedió a la fabricación del prototipo de bajo eléctrico utilizando el molde de silicona.

El proceso de fabricación del prototipo se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Preparación de la mezcla cemento-resina polimérica seleccionada, siguiendo las proporciones y procedimientos establecidos en la etapa de diseño de mezclas.
2. Vertido de la mezcla en el molde de silicona, llenando inicialmente solo la mitad del volumen correspondiente al cuerpo y mástil del prototipo de bajo eléctrico.
3. Vibración y compactación adecuada de la mezcla para eliminar burbujas de aire atrapadas y garantizar una distribución uniforme del material en el molde.
4. Después de un período de curado parcial, se procedió a verter la segunda mitad de la mezcla, completando el llenado del molde y formando el cuerpo y mástil del prototipo de bajo eléctrico.
5. Vibración y compactación adicional para asegurar la integración adecuada de las dos secciones vertidas.

6. Curado completo de la pieza moldeada siguiendo los tiempos y condiciones recomendadas por el fabricante de la resina epóxica utilizada.
7. Desmoldeo cuidadoso de la pieza, aprovechando la flexibilidad del molde de silicona para extraer el prototipo de bajo eléctrico sin dañarlo.
8. Pulido y refinado del prototipo para obtener un acabado liso y uniforme en toda su superficie.

Una vez fabricado y refinado, el prototipo de bajo eléctrico fue entregado a un técnico mecatrónico especializado, quien se encargó de instalar los componentes electrónicos necesarios, como micrófonos, clavijeros, puente, cejilla y anclajes para la correa.

2.7 Análisis de interacción de variables (ANOVA, MANOVA)

En el presente estudio, se buscó examinar la influencia de las proporciones de cemento y resina epóxica en las propiedades del cemento polimérico, tales como resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, porcentaje de elasticidad y densidad. Para analizar la interacción de estas variables independientes (proporciones de cemento y resina) sobre las variables dependientes (propiedades mecánicas y físicas), se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y un análisis multivariado de varianza (MANOVA).

ANOVA es una técnica estadística que permitió evaluar la existencia de diferencias significativas entre las medias de una variable dependiente, para dos o más grupos definidos por los niveles de las variables independientes (proporciones de cemento y resina). Este análisis determinó si las proporciones de los componentes tenían un efecto estadísticamente significativo en cada propiedad evaluada individualmente.

Por otro lado, el análisis MANOVA es una extensión del ANOVA que permitió evaluar la influencia de las variables independientes en múltiples variables dependientes simultáneamente. El MANOVA es adecuado cuando las variables dependientes están correlacionadas entre sí, lo cual es común en propiedades mecánicas y físicas de materiales. Este análisis brindó una visión más completa de la interacción de las variables, considerando las posibles correlaciones entre las propiedades evaluadas.

Tanto el ANOVA como el MANOVA se llevaron a cabo utilizando el software estadístico Minitab. Este programa informático es ampliamente utilizado en análisis estadísticos y ofrece herramientas confiables para realizar estos análisis de manera precisa y eficiente.

Los resultados obtenidos a través de estos análisis proporcionaron información sobre cómo las proporciones de cemento y resina afectaron las propiedades del cemento polimérico, tanto de manera individual (ANOVA) como en conjunto (MANOVA). Esto permitió identificar las formulaciones más aceptables que condujeran a las mejores características mecánicas y físicas para la aplicación prevista en la fabricación de instrumentos musicales.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Características generales de las mezclas de cemento polimérico

La preparación de las mezclas de cemento Portland y resina polimérica se realizó conforme a procedimientos normalizados, destacándose la aplicación de la norma INEN 488 para la pasta de cemento y el estricto seguimiento de las condiciones recomendadas por el fabricante para la resina epóxica, incluyendo proporciones de resina y endurecedor, así como tiempos y temperaturas de mezclado. Estas formulaciones, en diversas proporciones, lograron una integración completa, sin fases visibles separadas, lo que indica una dispersión adecuada de los componentes y una buena compatibilidad entre ellos.

El proceso de preparación de estas mezclas varió en complejidad y limpieza, dependiendo de la proporción de los componentes. La mezcla 3:1 fue relativamente sencilla de preparar, aunque el mezclado fue algo dificultoso debido a la alta viscosidad de la pasta de cemento. A medida que aumentaba la proporción de resina, como en la mezcla 2:1, el proceso se volvió ligeramente más complejo y ensuciante, aunque el mayor contenido de resina facilitó el mezclado. La mezcla 1:1, con proporciones iguales de cemento y resina, presentó un nivel de complejidad comparable al de la mezcla 2:1, pero con un mezclado más fácil debido al equilibrio de los componentes. Por otro lado, las mezclas 1:2 y 1:3, con mayor contenido de resina, fueron las menos complicadas y menos ensuciantes de preparar, debido a su alta fluidez y menor cantidad de cemento.

A medida que se incrementaba la proporción de resina, se observó un cambio notable en la apariencia de las mezclas, pasando de un aspecto de cemento común a un material con características plásticas y un color gris brillante, como se observa en la **figura 1**. Este cambio visual, acompañado de una transición en la textura de áspera a lisa, subraya el impacto de la resina en el acabado superficial, lo cual es crucial para la fabricación de instrumentos musicales donde el acabado estético es importante.

Es importante señalar que las observaciones respecto a las propiedades visuales y texturales de las mezclas, como su color, textura y acabado, corresponden a una valoración subjetiva realizada por el investigador. Estas interpretaciones no se basan en parámetros cuantitativos establecidos, sino en apreciaciones visuales y organolépticas propias, dirigidas a identificar la aplicabilidad estética del material en la fabricación de instrumentos musicales. Este enfoque busca proporcionar un contexto práctico a las características observadas,

pero debe considerarse que su naturaleza subjetiva podría diferir según otros criterios o evaluadores.

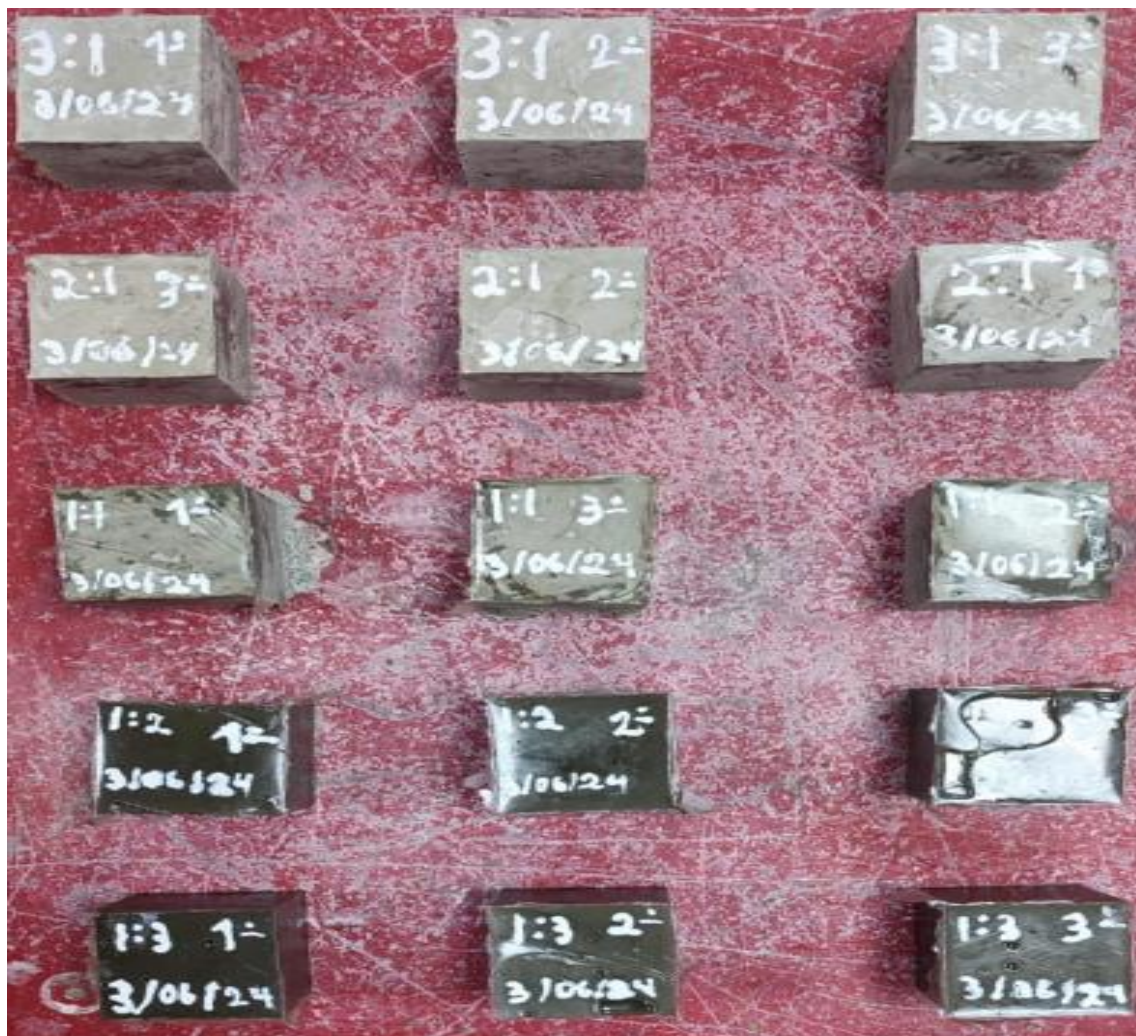


figura 1. Aspecto de las probetas para compresión

Además, el plastificante actuó como agente defloculante lo que resultó en una dispersión uniforme de las partículas de cemento dentro de la matriz polimérica, evitando la formación de aglomeraciones y favoreciendo una reacción de curado más eficiente. Este factor es clave para la homogeneidad y estabilidad del material final, contribuyendo a una mayor durabilidad y calidad del producto (Wang et al., 2015).

Durante el proceso de curado, todas las mezclas demostraron una buena estabilidad dimensional, manteniendo volúmenes constantes sin contracciones ni expansiones. Este resultado es esencial para garantizar que los instrumentos musicales fabricados con estas mezclas cumplan con la estabilidad dimensional requerida. Además, el proceso de

desmolde se realizó sin complicaciones tras el curado, lo que indica una buena cohesión y estabilidad dimensional, incluso con un tiempo de curado reducido, lo que sugiere que la incorporación del cemento Portland podría haber facilitado el fraguado y endurecimiento de las mezclas poliméricas.

Las mezclas con mayor contenido de cemento, como la 3:1 y la 2:1, presentaron características más cercanas al concreto convencional, con mayor densidad y una textura más rugosa. Estas formulaciones fueron más complicadas de mezclar debido a la viscosidad de la pasta de cemento, pero presentaron una mayor cohesión del material. Por otro lado, las mezclas con mayor contenido de resina, como la 1:1, 1:2 y 1:3, mostraron características más plásticas, con texturas lisas y una menor densidad. Estas mezclas fueron más fáciles de preparar y menos ensuciantes, lo que podría ser ventajoso en procesos de fabricación a nivel industrial.

No se observaron interacciones negativas entre el polímero y el agua de la mezcla, ni con los plastificantes. Esto se debe probablemente a que el agua ya estaba reaccionando con el cemento, eliminando su disponibilidad para interferir en la polimerización de la resina. Además, la resina epóxica fue pre-polimerizada durante 20 minutos antes de su incorporación a la mezcla, lo que ayudó a obtener pesos moleculares altos y prevenir posibles reacciones indeseables con el plastificante.

La mezcla 1:1, en particular, ofreció un buen equilibrio entre apariencia, textura, y materiales. Aunque no es la formulación más estética, presentó un acabado aceptable, lo suficientemente estético para su uso en instrumentos musicales, y logró un equilibrio adecuado en términos de materiales. La selección de la mezcla adecuada dependerá de las propiedades específicas requeridas para la aplicación final, como rigidez, flexibilidad, y apariencia.

3.2 Densidad

Se realizaron mediciones de densidad en las probetas cúbicas de 50 mm de arista de diferentes proporciones de mezcla cemento-resina. Los resultados obtenidos, observables en la **figura 2** (los datos utilizados para realizar esta figura se encuentran en el **anexo A**), muestran una disminución progresiva de la densidad, con el aumento de la proporción de resina. La mezcla 3:1 resultó ser la de mayor densidad debido al alto contenido de cemento. La mezcla 2:1 tuvo una densidad menor que la 3:1 pero aún significativa. La mezcla 1:1 presentó la menor densidad de estas tres formulaciones. Finalmente, las mezclas 1:2 y 1:3

fueron las de menor densidad de todas, reflejando el mayor contenido de resina epoxi. Esta tendencia es consistente con la menor densidad de la resina en comparación con el cemento Portland, lo que se observa en los valores de densidad promedio para cada mezcla.

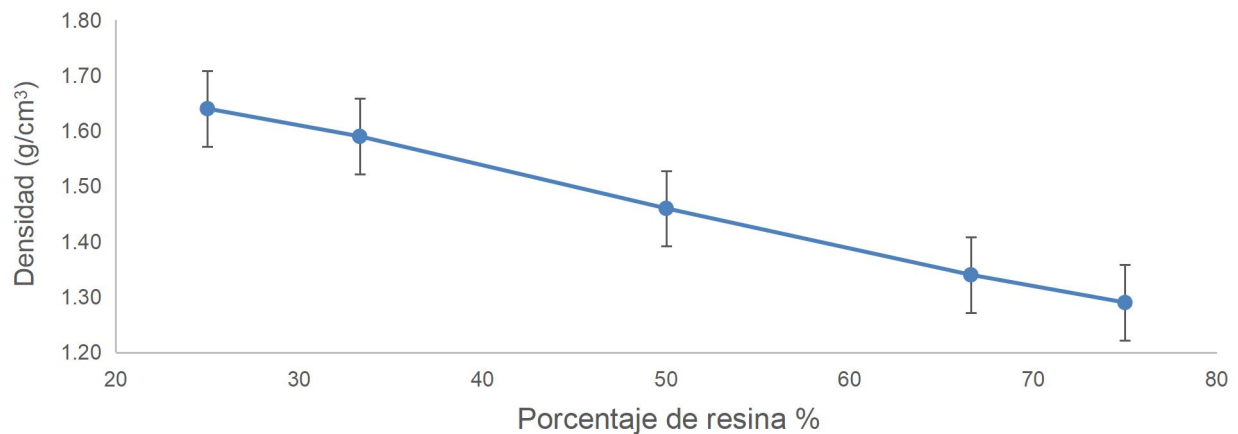


figura 2. Porcentaje de resina % vs Densidad

La mezcla 1:1 se destaca como la opción más aceptable para la fabricación de instrumentos musicales debido a su equilibrio entre densidad y costo de fabricación. Con una densidad de 1.46 g/cm³, esta mezcla es lo suficientemente baja para permitir la fabricación de instrumentos tanto de cuerpo sólido, como semi-vaciado. Esta característica es importante, ya que una densidad intermedia asegura que el instrumento sea manejable en términos de peso.

Comparando estos resultados con la densidad de maderas comúnmente utilizadas en la fabricación de instrumentos musicales, como el arce y el fresno, que tienen densidades que oscilan entre 0.6 y 0.8 g/cm³, se observa que la mezcla 1:1 es más densa. Sin embargo, la técnica de vaciado parcial puede ser utilizada para reducir el peso del instrumento final, manteniendo al mismo tiempo su integridad estructural.

3.3 Ensayo de compresión

Durante los ensayos de compresión, las distintas mezclas de cemento y resina mostraron comportamientos característicos que permiten agruparlas en dos categorías principales

según su respuesta mecánica. Las mezclas 3:1, 2:1 y 1:1 presentaron un patrón de fractura frágil, mientras que las mezclas 1:2 y 1:3 exhibieron un comportamiento más tenaz con deformación plástica.

Las mezclas 3:1, 2:1 y 1:1 (cemento-resina) compartieron un comportamiento típico de materiales con alto contenido de cemento. En todos los casos, se observó un aumento consistente de la carga hasta llegar a la falla de la probeta, seguido de la aparición de una fractura a lo largo de toda la probeta, indicando una ruptura frágil. Este comportamiento uniforme fue evidente en todas las probetas de cada formulación, demostrando una tendencia homogénea en la resistencia a la compresión. Los ensayos de compresión para estas mezclas duraron de 3 a 4 minutos, sugiriendo una alta rigidez y una rápida respuesta a la carga aplicada sin deformación plástica significativa. Sin embargo, se observaron algunas variabilidades atípicas en ciertas probetas, como en la mezcla 3:1 donde la probeta #3 mostró un valor de resistencia significativamente más bajo, lo cual podría deberse a imperfecciones internas no visibles. De manera similar, la mezcla 2:1 tuvo una probeta (#1) con resistencia menor, y la mezcla 1:1 presentó una discrepancia en la probeta #2. Estas variaciones pueden atribuirse a la homogeneidad de la mezcla y posibles defectos internos.

Al analizar la relación entre el porcentaje de resina en la mezcla y la resistencia a la compresión, se observa una tendencia decreciente en la resistencia a medida que aumenta la proporción de resina, tal como se ilustra en la **figura 3** (Los datos utilizados para realizar esta figura se encuentran en el **anexo A**). La mezcla 3:1, con el menor porcentaje de resina (25%), exhibió la mayor resistencia a la compresión, alcanzando un promedio de 31.65 MPa. Por su parte, la mezcla 2:1, con un 33% de resina, mostró una resistencia ligeramente menor, con un promedio de 23.53 MPa. La mezcla 1:1, que contiene un 50% de resina, tuvo una resistencia a la compresión promedio de 25.35 MPa, mostrando una ligera mejoría con respecto a la mezcla 2:1, lo que podría atribuirse a la posible compensación de defectos internos en ciertas probetas. Las mezclas con mayor contenido de resina, 1:2 (66%) y 1:3 (75%), presentaron las resistencias más bajas, con 15.3 MPa y 16.2 MPa respectivamente, confirmando la tendencia observada.

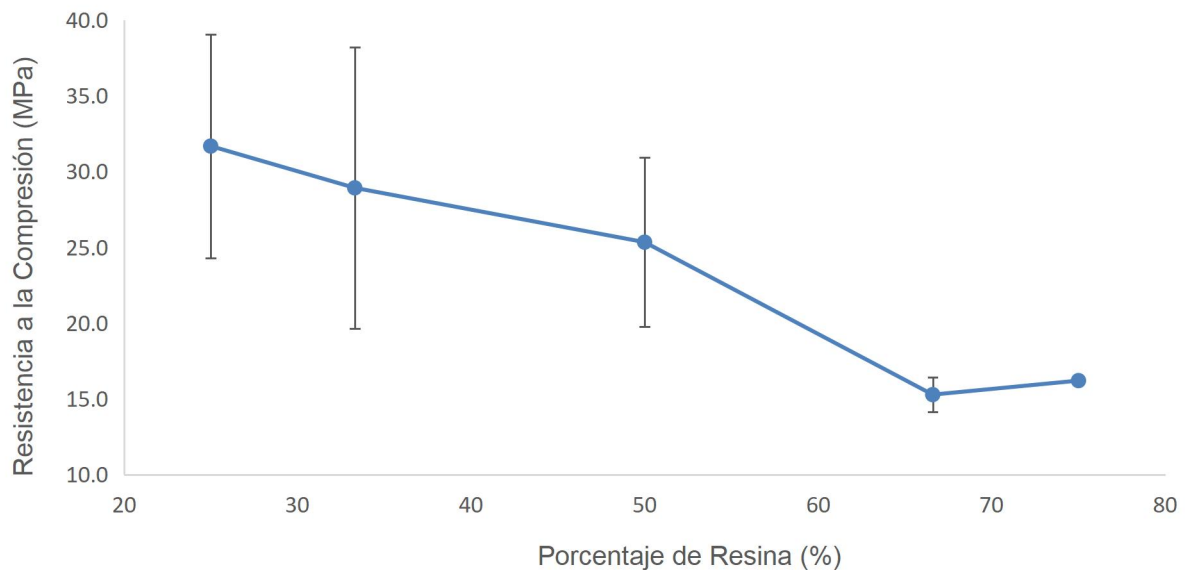


figura 3. Porcentaje de resina vs Resistencia a la compresión

Por otro lado, las mezclas 1:2 y 1:3 (cemento-resina) mostraron un comportamiento notablemente diferente durante los ensayos de compresión. En lugar de fracturarse, las probetas de estas mezclas se deformaron plásticamente en su totalidad sin llegar a romperse, exhibiendo un comportamiento muy tenaz. La máquina aplicaba carga y las probetas se deformaban, con los valores de carga oscilando y luego aumentando, lo que indica que el material absorbía la energía y se adaptaba a la carga aplicada. Este ciclo de deformación y aumento de carga continuó hasta que las probetas alcanzaron un estado de deformación plástica estable, con el ensayo deteniéndose cuando la máquina de ensayo universal (MUE) mostraba valores constantes. Los tiempos de ensayo para estas mezclas fueron superiores a los 5 minutos por probeta, reflejando su capacidad para soportar deformaciones significativas sin fallar catastróficamente. Este comportamiento es indicativo de una alta tenacidad, característica deseable en materiales que necesitan resistir cargas dinámicas y absorber energía. En términos de resistencia a la compresión, los valores de las mezclas 1:2 y 1:3 fueron los más bajos entre todas las formulaciones evaluadas, debido a la mayor proporción de resina en la mezcla. A diferencia de las mezclas con alto contenido de cemento, no se observó variabilidad significativa en los valores de resistencia entre las probetas de cada formulación, lo que sugiere una buena homogeneidad y consistencia en el comportamiento mecánico de estas mezclas.

La mezcla 1:1 (cemento-resina) se destaca como la opción más equilibrada en términos de resistencia a la compresión para la fabricación de instrumentos musicales. Los valores

obtenidos en los ensayos de compresión para esta mezcla fueron: 24.9 MPa para la Muestra 1, 15.7 MPa para la Muestra 2, y 25.8 MPa para la Muestra 3. Al descartar el valor atípico de la Muestra 2, se obtiene un valor promedio de resistencia a la compresión de aproximadamente 25.35 MPa. La norma INEN 488, basada en la norma ASTM C109, no establece de manera explícita el procedimiento para descartar valores atípicos en los ensayos de compresión de cementos. Sin embargo, en normas relacionadas, como la norma ASTM E178, se recomiendan métodos estadísticos para la detección y eliminación de datos atípicos, lo cual es una práctica común en el análisis de materiales cementicios para asegurar la representatividad y precisión de los resultados. Además, el enfoque está alineado con normas internacionales de control de calidad de mediciones, como la norma ISO 5725-2, que establecen que el descarte de valores que puedan distorsionar el análisis estadístico es adecuado siempre que haya una justificación técnica clara y consistente.

En este caso, la justificación técnica se basa en que no existe un proceso estandarizado específico para el armado de probetas cúbicas con mezclas de diferentes composiciones de cemento y resina. La variación en el número de apisonamientos y la diferencia en la viscosidad de cada mezcla generan niveles de homogeneidad distintos, lo cual puede dar lugar a datos o valores atípicos en los ensayos de compresión.

Según los rangos de literatura, las maderas como el arce y el fresno presentan una resistencia a la compresión que oscila entre 25 y 50 MPa. Comparando estos valores con los obtenidos para la mezcla 1:1, observamos que la resistencia a la compresión de esta mezcla, con un promedio ajustado de 25.35 MPa, se encuentra en el límite inferior del rango de resistencia a la compresión de las maderas tradicionales. Esto la hace adecuada para la fabricación de instrumentos eléctricos, además dado que su falla fue frágil pero con cierta holgura para deformación, se presume que esta mezcla proporciona suficiente rigidez y soporte estructural.

3.4 Ensayo de flexión y porcentaje de elasticidad

Durante los ensayos de flexión, las diferentes mezclas de cemento y resina exhibieron comportamientos característicos que permitieron agruparlas en dos categorías principales según su respuesta mecánica: las mezclas 3:1, 2:1 y 1:1 mostraron fracturas frágiles, mientras que las mezclas 1:2 y 1:3 presentaron una mayor deformación elástica sin llegar a fallar completamente, esto se visualiza en la **figura 4**.



figura 4. Fractura Mezclas (3:1, 2:1, 1:1, 2:1, 3:1)

Todas las probetas de estas formulaciones mostraron tendencias uniformes en la resistencia a la flexión, con comportamientos similares y valores consistentes. El alargamiento registrado por el deformímetro para la mezcla 3:1 no superó los 2 mm, la mezcla 2:1 mostró un mayor alargamiento, superando los 3 mm, y la mezcla 1:1 presentó un mayor alargamiento que las anteriores, superando los 4 mm. En todas las formulaciones, se observó que una probeta tendía a fallar a una carga más alta en comparación con las demás, aunque la diferencia en los valores de resistencia fue consistente dentro de un rango estrecho, estos valores se obtienen de la **figura 5** (Los datos utilizados para realizar esta figura se encuentran en el **anexo A**). Los porcentajes de elasticidad que se encuentran en la **figura 6** (Los datos utilizados para realizar dicha figura se encuentran en el **anexo A**), muestran que para la mezcla 3:1 el valor fue de aproximadamente 0.64%, para la mezcla 2:1 fue de aproximadamente 1.2% y para la mezcla 1:1 fue de aproximadamente 1.76%, reflejando un aumento en la capacidad de deformación elástica en orden ascendente de proporción de resina, así como también un orden ascendente de resistencia a la flexión.

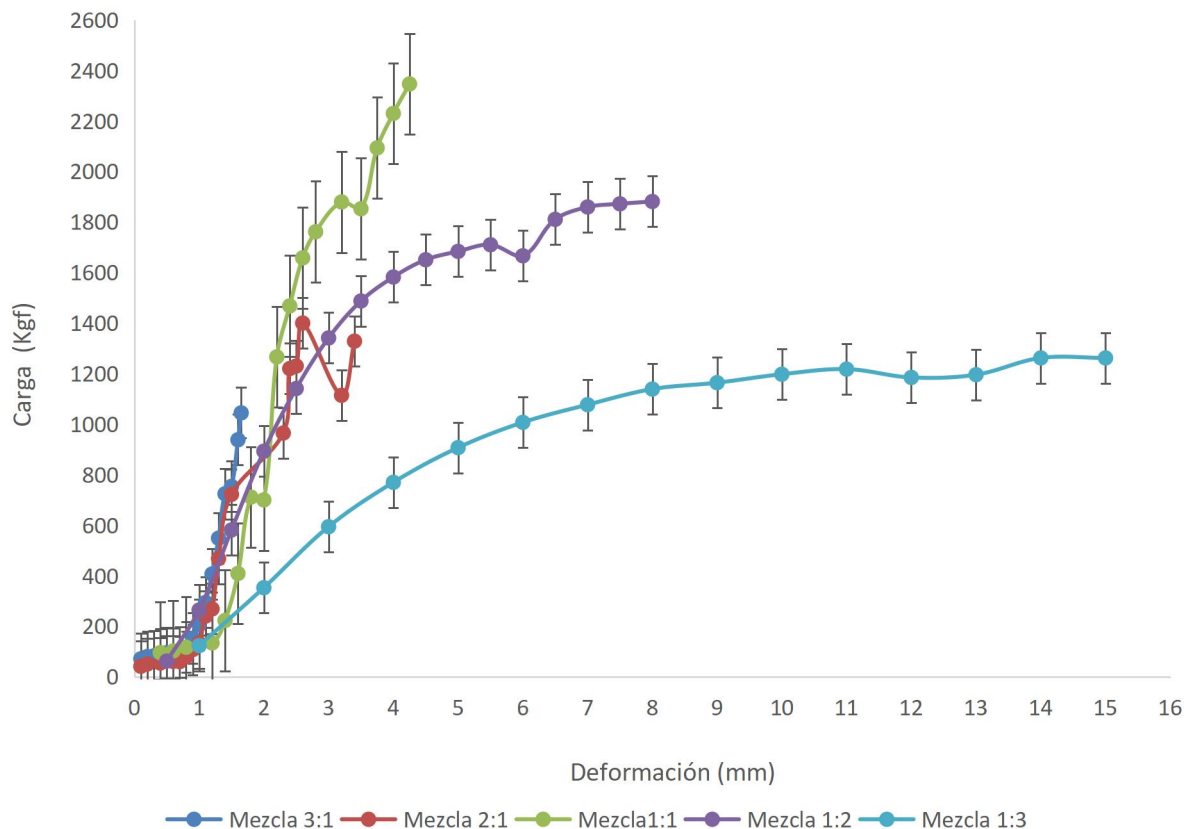


Figura 5. Curva deformimétrica alargamiento vs Carga

Por otro lado, las mezclas 1:2 y 1:3 (cemento-resina) mostraron comportamientos distintivos durante los ensayos de flexión. A diferencia de las mezclas con alto contenido de cemento, estas mezclas no llegaron a la falla completa de las probetas. La mezcla 1:2 presentó un alargamiento significativo, superando los 8 mm, con las probetas 1, 2 y 3 alcanzando cargas máximas menores que las de la mezcla 1:1. En particular, la probeta 3 mostró una capacidad de carga ligeramente superior antes de que la carga se estabilizara, reflejando una alta capacidad de deformación elástica. El porcentaje de elasticidad para la mezcla 1:2 fue de aproximadamente 3.2% ilustrado la **figura 6**. De manera similar, la mezcla 1:3 mostró deformaciones aún mayores, superando los 14 mm, y las probetas 1, 2 y 3 alcanzaron cargas máximas menores en comparación con la mezcla 1:2. La probeta 2 mostró una capacidad de carga mayor antes de la estabilización de la carga. El porcentaje de elasticidad para la mezcla 1:3 ilustrado en la **figura 6** fue de aproximadamente 5.6%, indicando una capacidad aún mayor de deformación elástica.

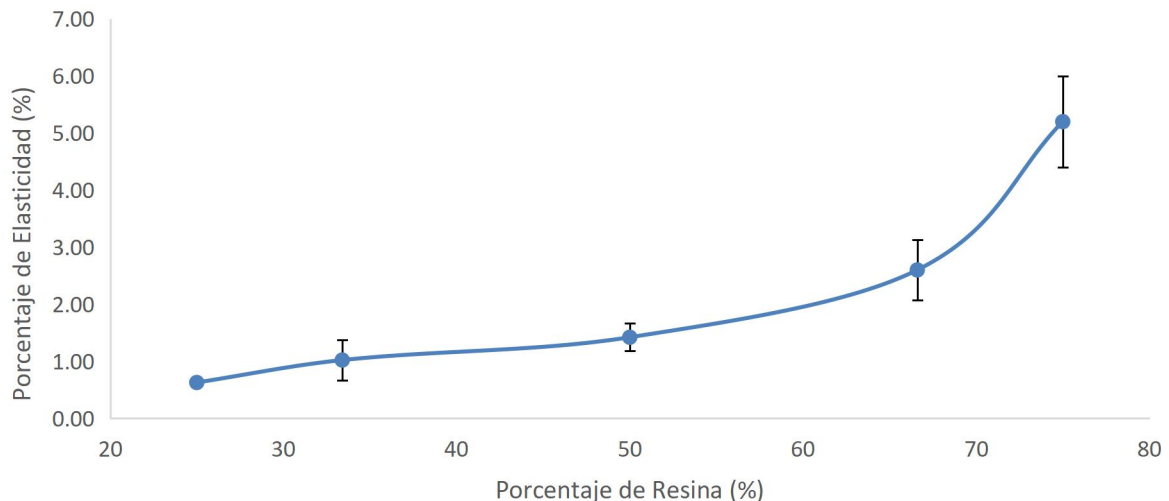


Figura 6. Porcentaje de Resina vs Porcentaje de Elasticidad

Al analizar la relación entre el porcentaje de resina y la resistencia a la flexión, se observa una tendencia ascendente hasta un punto máximo, seguido de una disminución, como se muestra en la **figura 7** (Los datos utilizados para realizar dicha figura se encuentran en el **anexo A**). La mezcla 3:1, con un 25% de resina, mostró una resistencia a la flexión de aproximadamente 7.0 MPa. A medida que se incrementó el porcentaje de resina, la mezcla 2:1, con un 34% de resina, presentó un aumento en la resistencia a la flexión, alcanzando un valor de alrededor de 9.0 MPa. La mezcla 1:1, con un 50% de resina, alcanzó el punto máximo de resistencia a la flexión, con un valor cercano a 14 MPa. Sin embargo, al continuar aumentando el contenido de resina, se observó una disminución en la resistencia. La mezcla 1:2, con un 66% de resina, mostró una resistencia a la flexión de aproximadamente 11.5 MPa, mientras que la mezcla 1:3, con un 75% de resina, presentó la menor resistencia, alcanzando alrededor de 7.5 MPa. Este comportamiento sugiere que existe un punto óptimo de contenido de resina que maximiza la resistencia a la flexión, después del cual la adición de más resina reduce la capacidad del material para soportar cargas flexibles.

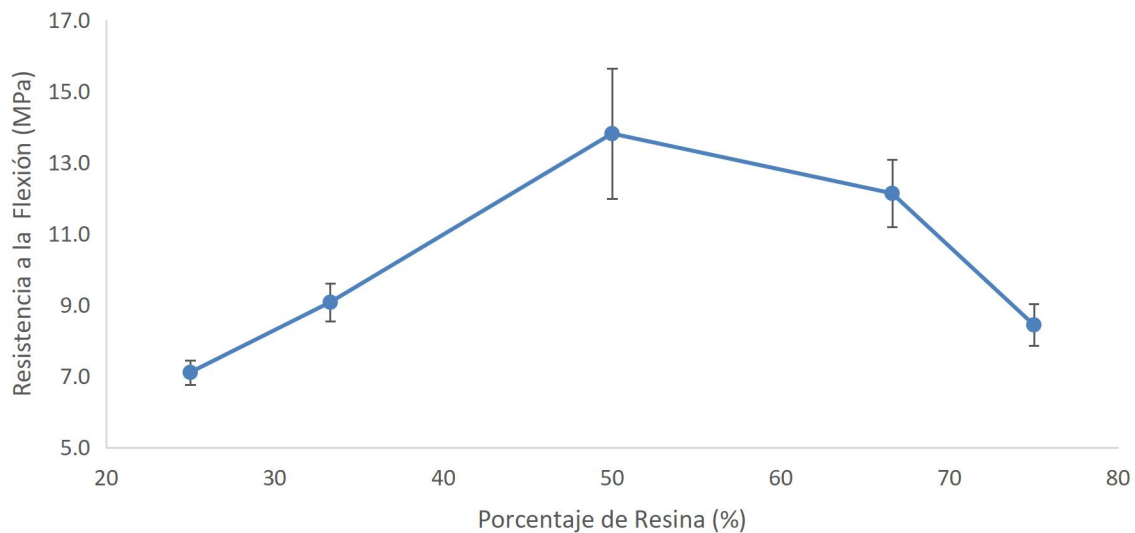


figura 7. Porcentaje de Resina vs Resistencia a la flexión

La mezcla 1:1 (cemento-resina) se destaca como la opción con mejores resultados en términos de resistencia a la flexión y una opción aceptable en capacidad de deformación elástica. Los valores obtenidos en los ensayos de flexión para esta mezcla mostraron una resistencia elevada, con la probeta 1 alcanzando hasta 2346 Kgf antes de fallar, mientras que las probetas 2 y 3 alcanzaron cargas menores con mayores deformaciones, esto puede deberse a variaciones en la compactación, y homogenización de la mezcla.

El porcentaje de elasticidad calculado para esta mezcla fue de aproximadamente 1.76%, lo que indica una mayor capacidad de deformación elástica en comparación con las mezclas 3:1 y 2:1. Esta elasticidad es esencial para aplicaciones que requieren un balance entre rigidez y flexibilidad, permitiendo que el material soporte tensiones sin fallar catastróficamente.

La resistencia a la flexión promedio de la mezcla 1:1 fue de 14 MPa. En comparación con los rangos de resistencia a la flexión de las maderas utilizadas en instrumentos musicales como el fresno, maple y nogal, que oscilan entre 14 y 120 MPa (Kretschmann, 2010), la mezcla 1:1 se encuentra en el límite inferior del rango.

3.5 Análisis ANOVA

En el análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar las diferentes propiedades de las mezclas de cemento-resina, se utilizaron los siguientes términos en las tablas:

- **Grados de Libertad (GL)** : Indica el número de valores en el cálculo que son libres de variar.
- **Suma de Cuadrados (SC)**: Representa la variabilidad total en los datos para la propiedad en cuestión.
- **Media Cuadrática (MC)**: Es la suma de cuadrados dividida por los grados de libertad, utilizada para calcular el valor F.
- **F**: Es el estadístico de la prueba ANOVA, que compara la variabilidad entre las medias de los diferentes grupos con la variabilidad dentro de cada grupo. Un valor F más alto sugiere que las diferencias entre las medias de los grupos son grandes en comparación con la variabilidad dentro de los grupos.
- **p**: Es el valor p, que indica la probabilidad de que las diferencias observadas entre los grupos sean debidas al azar. Un valor p bajo (por lo general < 0.05) sugiere que las diferencias observadas son estadísticamente significativas.

Los resultados obtenidos a través del ANOVA no solo son consistentes con las observaciones prácticas realizadas durante los ensayos de las diferentes mezclas de cemento y resina, sino que también proporcionan una validación estadística sólida de las diferencias observadas en las propiedades mecánicas y físicas de las formulaciones.

Densidad (g/cm³)

El ANOVA mostró diferencias altamente significativas en la densidad entre las diferentes formulaciones de cemento y resina, con un valor F de 2256.81 y un valor p de 0.000 (ver **tabla 2**). Un valor F tan alto indica que las diferencias en la densidad entre las formulaciones son muy marcadas, mucho más de lo que cabría esperar si solo se debieran al azar. El valor p de 0.000 confirma que estas diferencias son estadísticamente significativas, lo que significa que la proporción de cemento y resina en la mezcla tiene un efecto real y relevante sobre la densidad. Este resultado es coherente con las observaciones prácticas, donde se notó que las mezclas con mayor proporción de cemento eran más densas debido a la mayor cantidad de material sólido presente. A medida que se incrementa la proporción de resina, la densidad disminuye, lo que valida la relación entre estos componentes.

tabla 2. Resultados ANOVA Densidad Cemento - Resina

Análisis de varianza de Densidad (g/cm³)					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Cemento-Resina	6	797.532	132.922	2256.81	0.000
Error	14	0.00825	0.00059	-	-
Total	20	798.356	-	-	-

Resistencia a la Compresión (MPa)

El análisis de la resistencia a la compresión arrojó un valor F de 4.65 y un valor p de 0.008, lo que indica diferencias estadísticamente significativas entre las formulaciones (ver **tabla 3**). Un valor F de 4.65 sugiere que las diferencias en la resistencia a la compresión entre las distintas mezclas son significativas, aunque no tan pronunciadas como en el caso de la densidad. El valor p de 0.008, que es menor a 0.05, refuerza que estas diferencias no son atribuibles al azar, sino que reflejan un efecto real de la proporción de cemento y resina en la mezcla sobre su resistencia a la compresión. Esto coincide con lo observado en los ensayos, donde las mezclas con mayor contenido de cemento mostraron mayor resistencia a la compresión, mientras que aquellas con más resina fueron menos resistentes pero más tenaces.

tabla 3. Resultados ANOVA Compresión Cemento - Resina

Análisis de varianza de Compresión (MPa)					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Cemento-Resina	6	690.6	115.11	4.65	0.008
Error	14	346.9	24.78	-	-
Total	20	1037.5	-	-	-

Resistencia a la Flexión (MPa)

El valor F de 43.08 y el valor p de 0.000 en el análisis de la resistencia a la flexión confirman que existen diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas (ver **tabla 4**). Un valor F elevado como 43.08 indica que las diferencias en la resistencia a la flexión entre las formulaciones son notables y no se deben al azar. El valor p de 0.000 refuerza la idea de que estas diferencias son reales y significativas. Durante los ensayos, se observó que las mezclas con mayor contenido de cemento tendían a fracturarse de manera frágil, mostrando valores más altos de resistencia a la flexión. En cambio, las mezclas con mayor proporción de resina, aunque más flexibles, tenían menor resistencia. Esto subraya la influencia significativa de la proporción de resina en la capacidad de las mezclas para resistir fuerzas de flexión.

tabla 4. Resultados ANOVA Flexión - Cemento Resina

Análisis de varianza de Flexión (MPa)					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Cemento-Resina	6	184.68	307.796	43.08	0.000
Error	14	10.00	0.7145	-	-
Total	20	194.68	-	-	-

Elasticidad (%)

El análisis de elasticidad reveló un valor F de 237.72 y un valor p de 0.000, lo que indica diferencias altamente significativas entre las mezclas (ver **tabla 5**). Un valor F tan alto como 237.72 muestra que la capacidad de deformación elástica varía de manera significativa entre las diferentes formulaciones. El valor p de 0.000 confirma que estas diferencias son estadísticamente significativas y no se deben al azar. Las observaciones prácticas respaldan este resultado: las mezclas con mayor proporción de resina mostraron una mayor elasticidad, mientras que las mezclas con más cemento fueron menos elásticas debido a su naturaleza más rígida y frágil.

tabla 5. Resultados ANOVA Porcentaje de elasticidad - Cemento Resina

Análisis de varianza de Elasticidad (%)					
Fuente	GL	SC	MC	F	P
Cemento-Resina	6	225.141	375.235	237.72	0.000
Error	14	2.210	0.1578	-	-
Total	20	227.351	-	-	-

3.6 Análisis MANOVA

El análisis MANOVA realizado para las mezclas de cemento y resina proporciona una visión integral de cómo las diferentes proporciones de estos componentes afectan múltiples propiedades mecánicas y físicas de manera simultánea. Los resultados obtenidos son consistentes con los comportamientos observados en los ensayos individuales y ofrecen una validación robusta de las diferencias significativas entre las mezclas evaluadas.

En la tabla de resultados MANOVA (ver **tabla 6**), se utilizan los siguientes términos:

- **Estadística de Prueba:** Es la métrica utilizada para evaluar la significancia del modelo multivariante.
- **Approx F:** Es el valor aproximado del estadístico F, que compara la variabilidad entre grupos con la variabilidad dentro de los grupos.
- **Grados de Libertad (GL):** Se divide en **GL Numerador** (número de variables dependientes) y **GL Denominador** (tamaño de la muestra menos el número de variables dependientes).
- **p:** Es el valor p, que indica la probabilidad de que las diferencias observadas se deban al azar. Un valor p bajo (por lo general < 0.05) sugiere que las diferencias observadas son estadísticamente significativas

tabla 6. Resultados MANOVA Cemento Resina

Pruebas MANOVA para Cemento-Resina					
Criterio	Estadística de prueba	Approx F	Núm	Denom	P
De Wilks	0.0000	94.307	24	39	0.000
Lawley-Hotelling	152.818.965	604.908	24	38	0.000
De Pillai	311.146	8.171	24	56	0.000
De Roy	143.436.175	-	-	-	0.000

Criterio de Wilks

La prueba del **Criterio de Wilks** (Criterio de Wilks-Lambda) mostró un estadístico de prueba de 0.000, un valor de F aproximado de 94.307, con 24 grados de libertad en el numerador y 39 en el denominador, y un valor p de 0.000 (ver **tabla 6**). Un valor de Wilks-Lambda cercano a cero sugiere que la variabilidad en las propiedades mecánicas y físicas no explicada por las proporciones de cemento y resina es mínima. Esto implica que las proporciones de cemento y resina tienen un efecto significativo en las variables dependientes analizadas (densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y elasticidad). La alta significancia estadística indicada por el valor p de 0.000 refuerza la conclusión de que existen diferencias notables entre las mezclas en función de sus propiedades.

Criterio de Lawley-Hotelling

La prueba del **Criterio de Lawley-Hotelling** arrojó una estadística de 1528.2, con un valor de F aproximado de 604.9, 24 grados de libertad en el numerador y 38 en el denominador, y un valor p de 0.000 (ver **tabla 6**). Este criterio también sugiere diferencias significativas entre las mezclas de cemento y resina. Los altos valores de F y la significancia estadística ($p < 0.05$) confirman que las distintas proporciones de cemento y resina afectan significativamente las propiedades del material. La estadística de Lawley-Hotelling, que se enfoca en la suma de las raíces características, respalda la robustez del modelo multivariante en este contexto.

Criterio de Pillai

La prueba del **Criterio de Pillai** (Traza de Pillai) arrojó una estadística de 3.11146, con un valor de F aproximado de 8.171, 24 grados de libertad en el numerador y 56 en el denominador, y un valor p de 0.000 (ver **tabla 6**). La traza de Pillai es conocida por ser una medida robusta, especialmente en situaciones con pequeñas muestras o cuando las asunciones del MANOVA se desvían ligeramente. El valor obtenido refuerza la conclusión de que las diferentes proporciones de cemento y resina tienen un efecto significativo en las propiedades mecánicas y físicas estudiadas.

Criterio de Roy

Finalmente, la prueba del **Criterio de Roy** (Raíz Mayor de Roy) presentó una estadística de 1434.36175, con un valor de F aproximado de 56, y un valor p de 0.000 (ver **tabla 6**). Este criterio se enfoca en la mayor raíz característica, lo que sugiere que una combinación lineal de las variables dependientes explica una gran parte de la varianza observada. Los resultados significativos obtenidos aquí confirman la fuerte influencia de la composición de cemento y resina en las propiedades del material.

En conjunto, los resultados de las pruebas MANOVA proporcionan una evidencia sólida de que las diferentes proporciones de cemento y resina afectan significativamente las propiedades mecánicas y físicas del material. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de los análisis ANOVA individuales y con las observaciones prácticas realizadas durante los ensayos.

3.7 Selección de la mezcla

La selección de la mezcla de cemento-resina más adecuada para la fabricación de instrumentos musicales se basa en un análisis de las propiedades de flexión, porcentaje de elasticidad, resistencia a la compresión, así como aspectos estéticos. Tras una evaluación de todas las mezclas, se ha determinado que la mezcla 1:1 (cemento-resina) es la opción más equilibrada, a continuación en la **tabla 7** se presentan los resultados esperados.

tabla 7. Valores obtenidos - Valores esperados

Propiedad	Límite Inf	Límite Sup	Valores obtenidos
Resistencia a la Compresión (MPa)	25	70	25
Resistencia a la Flexión (MPa)	14	120	13.8
Densidad (g/cm ³)	0.5	0.8	1.4
Porcentaje de Elasticidad (%)	2	6	1.76

Resistencia a la Flexión: La mezcla 1:1 mostró una resistencia promedio de 13.8 MPa (Ver **tabla 7**), esta mezcla se encuentra en el límite inferior del rango de resistencia a la flexión de las maderas comúnmente utilizadas en instrumentos musicales (14-120 MPa). Este valor es suficientemente alto para proporcionar la rigidez necesaria en aplicaciones musicales, asegurando que el instrumento no se deforme fácilmente bajo tensiones mecánicas típicas durante su uso. Además, la fractura visible y la naturaleza frágil del comportamiento de flexión indican que la mezcla tiene una alta capacidad para soportar cargas antes de la falla.

Porcentaje de Elasticidad: El porcentaje de elasticidad para la mezcla 1:1 fue de aproximadamente 1.76% (Ver **tabla 7**), lo que sugiere capacidad de deformación elástica, en este caso se encuentra cercano al límite inferior del rango de porcentajes de elasticidad. Esta elasticidad es importante para aplicaciones que requieren un equilibrio entre rigidez y flexibilidad, permitiendo que el material soporte tensiones sin fallar catastróficamente.

Resistencia a la Compresión: La mezcla 1:1 también mostró una resistencia a la compresión adecuada, con un promedio ajustado de 25.35 MPa (Ver **tabla 7**). Aunque este valor está en el límite inferior del rango de resistencia a la compresión de maderas como el arce y el fresno (25-50 MPa), es suficiente para proporcionar el soporte estructural necesario en la fabricación de instrumentos eléctricos. La capacidad de la mezcla 1:1 para soportar cargas de compresión sin deformación plástica significativa asegura que los instrumentos fabricados con este material mantendrán su forma y funcionalidad bajo tensiones mecánicas típicas.

Estética: Desde un punto de vista estético, la mezcla 1:1 (cemento-resina) ofrece un balance visual y textural atractivo, caracterizado por un color gris brillante y uniforme y una textura lisa y dura. Comparada con el cemento regular, que suele presentar un acabado rugoso, opaco, y poroso, la mezcla 1:1 logra un nivel de homogeneidad visual y un acabado más fino, lo cual es adecuado para aplicaciones donde el aspecto del material es relevante, como en instrumentos musicales. Aunque su nivel de brillantez y suavidad no iguala el de las mezclas con mayor contenido de resina, que aportan una apariencia más plástica y pulida, la mezcla 1:1 resulta satisfactoria para las aplicaciones más comunes en el ámbito musical. Este equilibrio entre textura y estética proporciona un acabado aceptable en comparación con otros materiales convencionales y hace de la mezcla 1:1 una opción práctica y visualmente agradable para la fabricación de instrumentos musicales.

3.8 Prototipo de bajo eléctrico

Durante la fabricación del prototipo utilizando la mezcla 1:1 de cemento y resina, se presentaron algunas dificultades leves, especialmente durante el vertido de la mezcla en los moldes de dos piezas. La alta viscosidad de la mezcla dificultó el llenado uniforme de los moldes. Sin embargo, este problema se solucionó eficazmente con el uso de una mesa vibratoria, que permitió una distribución homogénea de la mezcla.

Las piezas formadas fueron desmoldadas después de 3 días sin ninguna complicación. El proceso de desmolde fue sencillo, se presume que esto se debe a la adecuada cohesión de la mezcla y a la estabilidad dimensional lograda durante el curado. El trabajo para retirar rebabas y corregir defectos superficiales también fue relativamente fácil, indicando una buena manejabilidad del material en su fase post-moldeado.

El peso final del instrumento después del curado inicial fue de 6 kg. Posteriormente, tras los procesos de desbastado, lijado, acabado y vaciado, el peso final del instrumento se redujo a 4 kg. Esta reducción de peso es consistente con las expectativas para la mezcla 1:1, proporcionando un equilibrio adecuado entre resistencia y manejabilidad.

Se presume que la adquisición de resistencia a los 30 días fue satisfactoria pues la instalación de los accesorios del instrumento se realizó sin novedades. El prototipo final es totalmente funcional y no exhibió signos de deformación tras la colocación de las cuerdas hasta el 27/10/2024. La apariencia del instrumento es consistente con los resultados estéticos esperados para la mezcla 1:1, mostrando una superficie lisa y un color uniforme, observable en la **figura 8**.



figura 8. Prototipo de bajo eléctrico

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Las mezclas de cemento Portland y resina epoxi fueron preparadas logrando una homogeneidad y estabilidad que cumplieron con los objetivos planteados. A medida que se incrementó la proporción de resina en las mezclas, se observó una notable progresión en el color y la textura superficial, desde un gris convencional hasta tonos más brillantes y superficies más suaves. Estos cambios se lograron sin problemas de polimerización incompleta ni aglomeraciones, lo que indica una correcta integración de los componentes. Durante el proceso de curado, todas las muestras mantuvieron volúmenes estables, sin contracciones ni expansiones, y no se detectaron interacciones adversas entre el polímero y otros aditivos como el agua o los plastificantes.
- En cuanto a las propiedades mecánicas, los ensayos revelaron que las mezclas con mayor contenido de cemento (3:1 y 2:1) ofrecieron alta resistencia a la compresión, por otro lado, la mezcla 1:1 destacó por su equilibrio entre densidad, porcentaje de elasticidad adecuado, resistencia a la compresión y flexión.
- Las mezclas con mayor contenido de resina (1:2 y 1:3), aunque menos densas mostraron mayor tenacidad y capacidad de deformación elástica.
- El análisis estadístico mediante ANOVA y MANOVA confirmó que la proporción de cemento-resina tiene un impacto significativo en todas las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas. Se observó que a medida que aumenta la proporción de resina, la densidad y la resistencia a la compresión disminuyen, mientras que la elasticidad y la capacidad de deformación aumentan.
- En la fabricación del prototipo con la mezcla 1:1, se superaron desafíos como la alta viscosidad durante el vertido, mitigada con una mesa vibratoria. A pesar de esta dificultad inicial, las piezas se desmoldearon sin problemas después de tres días, y el proceso de acabado fue sencillo. El peso del instrumento se redujo de 6 kg a 4 kg después de todos los procesos, resultando en un instrumento manejable y cómodo de usar. La apariencia del instrumento fue coherente con los resultados estéticos previstos. Además, la mezcla 1:1 alcanzó valores satisfactorios de resistencia a la compresión (25.35 MPa), resistencia a la flexión (13.8 MPa), densidad (1.46 g/cm³) y porcentaje de elasticidad (1.76%).
- La instalación de los accesorios del instrumento no presentó problemas, y el prototipo final resultó ser totalmente funcional, sin mostrar deformaciones tras la colocación de las cuerdas. La mezcla 1:1 es adecuada para la creación de instrumentos sólidos,

combinando buenas propiedades mecánicas con un rendimiento estético y funcional satisfactorio.

4.2 Recomendaciones

- Es recomendable explorar el uso de otras resinas además de la epóxica, con el fin de identificar posibles mejoras en las propiedades del material. Experimentar con diferentes tipos de resinas podría ofrecer una mayor flexibilidad en el diseño y optimización de las mezclas, permitiendo ajustarse mejor a las necesidades específicas de los instrumentos musicales.
- Además, se recomienda incorporar fibras en la mezcla de cemento y resina para mejorar la resistencia mecánica y la tenacidad del material. La adición de fibras podría reducir la fragilidad de las mezclas y aumentar su capacidad para soportar cargas dinámicas, lo cual es especialmente relevante en aplicaciones donde se requiere una alta durabilidad y resistencia al impacto.
- Para evitar la variabilidad observada en algunas probetas, se recomienda que la mezcla de la pasta de cemento y la resina se realice con una mezcladora mecánica. Esto asegurará una homogeneidad mayor en las mezclas, reduciendo las posibles discrepancias en las propiedades mecánicas y garantizando resultados más consistentes en los ensayos.
- Se recomienda realizar un análisis económico de las diferentes formulaciones de cemento-resina evaluadas en este estudio. Esto incluiría el cálculo de costos de materiales, procesos de fabricación, y posibles escalas de producción. Al abordar el estudio de viabilidad económica e industrial, sería posible identificar qué mezclas podrían ser factibles para una producción a gran escala, considerando factores como el costo-beneficio en comparación con materiales convencionales y la demanda potencial en aplicaciones industriales y de fabricación de instrumentos musicales.
- Finalmente, en futuros estudios, se sugiere implementar un diseño experimental de mezclas aleatorias para explorar un rango más amplio de combinaciones de componentes. Este enfoque permitirá identificar de manera más precisa las proporciones óptimas y podría revelar interacciones entre los componentes que no se han considerado en el presente estudio.

Referencias

- Abd El Rahman, A. M., El-Didamony, H., Abd El Aal, G. G., & El-Kholy, A. M. (2022). Revisión sobre compuestos de cemento polimérico. *Materiales de construcción y edificación*, 323, 126515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126515>
- Acoustic Guitar. (2023). How Guitar Makers are Responding to Climate and Supply Threats by Turning to Sustainable Sources, Alternate Materials, and More. Acoustic Guitar. Recuperado de <https://acousticguitar.com/>
- ASTM C109 / C109M-20b. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
- ASTM D143. (2014). Standard test methods for small clear specimens of timber.
- ASTM C293 / C293M-20. (2020). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0293_C0293M-20
- ASTM E178-16: Standard Practice for Dealing With Outlying Observations. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0178-16>
- Bader, R. (2013). *Nonlinearities and Synchronization in Musical Acoustics and Music Psychology*. Springer.
- Barbero, E. J. (2017). *Introduction to Composite Materials Design* (3rd ed.). CRC Press.
- Brandt, A. M. (2009). *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties, and Performance*. Taylor & Francis.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood*. CRC Press.
- Day, P. (2000). *The Fender bass: An illustrated history*. Hal Leonard.
- Devine, J. (2022). Gibson: 121 years of innovation and eccentricity. Reverb. <https://reverb.com/news/gibson-121-years-of-innovation-and-eccentricity>
- Dilworth Violins. (2022). Dilworth quality. <https://www.dilworthviolins.com/dilworth-quality>
- Dinulică, F., Stanciu, M. D., & Savin, A. (2021). Correlation between anatomical grading and acoustic–elastic properties of resonant spruce wood used for musical instruments. *Forests*, 12(8), 1122. <https://doi.org/10.3390/f12081122>

- Ellis, B. (Ed.). (1993). Chemistry and Technology of Epoxy Resins.
- Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Forsyth, M. (2021). Material Heritage in Modern Instrument Manufacturing. Musical Instrument Journal, 19(2), 152-160.
- Frontier Group. (2023). The rise of sustainable guitars: How an industry is innovating to save our forests. Recuperado de <https://frontiergroup.org>
- Gambhir, M. L. (2013). Concrete Technology: Theory and Practice. McGraw-Hill Education.
- Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. Cement and Concrete Research, 78, 126-142.
- Gil, A., & Morales, D. (2016). Sustainable Timber Management: Challenges and Achievements. Springer.
- Green, D. W., Winandy, J. E., & Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical properties of wood. En R. J. Ross (Ed.), Wood handbook: Wood as an engineering material (pp. 5.1-5.46). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Hart, C. (2022). A tour of Fender's R&D lab with three master builders. Reverb. <https://reverb.com/news/a-tour-of-fenders-rd-lab-with-3-master-builders>
- He, Ming & Li, Ming & Yu, Yong & Wang, Hao & Xiao, Wei & Yang, Jun. (2019). Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Resin Enhanced Oil-Well Cement Stone. Materials Science Forum, 944, 1103-1107. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.944.1103>
- Heron-Allen, E. (1885). Violin-Making: As It Was and Is. Ward Lock & Co.
- Hou, D. et al. (2021). High-performance cementitious composites: Types, properties, and applications. Applied Sciences, 11(21), 10205. <https://doi.org/10.3390/app112110205>
- Hunter, D. (1999). The Ultimate Guitar Book. Dorling Kindersley.

- ISO 13061-2. (2014). Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. ISO.
- ISO 179-1. (2010). Plastics - Determination of Charpy impact properties - Part 1: Non-instrumented impact test. ISO.
- ISO 5725-2:2019: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method. Geneva, Switzerland: ISO.
<https://www.iso.org/standard/69419.html>
- Jin, F. L., & Park, S. J. (2019). Polymer Testing, 75, 86-92.
- Jo, B.W., Park, S.K., & Park, J.C. (2007). Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and latex polymer cement. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2281-2291.
- Joshi, S., Rawat, K., Karunamurthy, K., & Arora, N. (2020). Epoxy composites: status, challenges and opportunities. In *Epoxy Polymers and Composites: Preparation, Properties and Applications* (pp. 1-41). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0001>
- Kasal, B. (2016). Relationship between static and dynamic modulus of elasticity of wood. *BioResources*, 11(3), 6656-6662.
- Kollmann, F. & Cote, W. (1968). *Principles of Wood Science and Technology, I. Solid Wood*. Springer-Verlag.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2003). *Design and control of concrete mixtures*. Portland Cement Association.
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2016). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Portland Cement Association.
- Kretschmann, D. E. (2010). Mechanical properties of wood. En R. J. Ross (Ed.), *Wood handbook: Wood as an engineering material* (pp. 5.1-5.46). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Mehta, P., & Monteiro, P. (2017). *Concrete microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.

- Michon, R., Chafe, C., & Granzow, J. (2018). 3D Printing and Physical Modeling of Musical Instruments: Casting the Net. Sound and Music Computing Conference.
- Millard, A. (2004). The Electric Guitar: A History of an American Icon. JHU Press.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete (2nd ed.). Prentice Hall.
- Mohammadi, Y., Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2008). Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. Construction and Building Materials, 22(5), 956-965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.008>
- Mohammadi, Y., Singh, S.P., & Kaushik, S.K. (2008). Properties of latex modified concrete containing silica fume. Cement and Concrete Research, 38(11), 1359-1367.
- Neville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Obla, K. H. (2014). Improving Concrete Quality. CRC Press.
- Ohama, Y. (1997). Aditivos a base de polímeros. Compuestos de cemento y concreto., 19(2-3), 189-212. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00015-6)
- Oppermann, L., Blunck, E., Zingel, C., & AACT, W. (2020). The importance of traditional materials for musical instruments. Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics, Le Mans, France. <https://archives.ismal.cnrs.fr>
- Palson, P. & Vidivelli, B. (2017). Mechanical properties of latex modified concrete with silica fume. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8, 701-710.
- Pascault, J. P., et al. (2002). Thermosetting Polymers.
- Pollens, S. (2010). Stradivari. Cambridge University Press.
- Ratna, D. (2009). Handbook of Thermoset Resins.
- Rosales, E. et al. (2022). Effect of epoxy content on the properties of epoxy-modified cement mortars. Journal of Building Engineering, 48, 104218. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104218>
- Rossing, T. D. (2010). The science of string instruments. Springer.
- Scrivener, K., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. Cement and Concrete Research, 114, 2-26.

Taylor, H. F. W. (1997). Cement chemistry. Thomas Telford.

Taylor, P. C., Kosmatka, S.H., & Voigt, G. F. (2019). Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual. National Concrete Pavement Technology Center.

The Guitar Journal. (2021). Guitar Tonewoods Explained. Recuperado de <https://www.theguitarjournal.com>

Thomas, M. D. A. (2013). Supplementary Cementing Materials in Concrete. CRC Press.

University of Washington. (2020). Material properties for musical instrument design. Retrieved from <https://www.washington.edu>

Wang, H. et al. (2020). Mechanical characterization of cement mortar composites reinforced with jute fibers. Construction and Building Materials, 232, 117225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117225>

Wang, M., Wang, R., Zheng, S., Farhan, S., Yao, H., & Jiang, H. (2015). Investigación sobre el mecanismo químico en el sistema de cemento modificado con látex de poliacrilato. Cement and Concrete Research, 76, 62-69.

Wegst, U. G. K. (2006). Wood for sound. American Journal of Botany, 93(10), 1439-1448.

Yoshikawa, S. (2010). Acoustical classification of woods for string instruments. Journal of Acoustical Society of America, 127(3), 1577-1585. <https://doi.org/10.1121/1.3290988>

Youssef, H. (1976). The effect of density on the acoustic properties of wood. Wood Science, 9(1), 67-73.

Zhou, B., Zhang, M., Wang, L., & Ma, G. (2021). Experimental study on mechanical property and microstructure of cement mortar reinforced with elaborately recycled GFRP fiber. Cement and Concrete Composites. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103908>

Anexos

Anexo A Tablas para gráficas de propiedades mecánicas

Datos medición de densidad

Volumen (cm ³)			125	
Proporción	Muestra	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)	Promedio por mezcla
(3:1)	1	200,8	1,61	
(3:1)	2	210,4	1,68	1,64
(3:1)	3	205,5	1,64	
(2:1)	1	195,3	1,56	
(2:1)	2	203	1,62	1,59
(2:1)	3	199	1,59	
(1:1)	1	184	1,47	
(1:1)	2	178	1,42	1,46
(1:1)	3	185	1,48	
(1:2)	1	165	1,32	
(1:2)	2	167	1,34	1,34
(1:2)	3	170	1,36	
(1:3)	1	160	1,28	
(1:3)	2	160	1,28	1,29
(1:3)	3	165	1,32	

Datos ensayo de compresión

Proporción	Porcentaje (%)	Muestra	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia a la compresión (Kgf/cm ²)
(3:1)	25	1	31,2	318,5
(3:1)	25	2	32,1	327,5

(3:1)	25	3	18,9	192,7
(2:1)	33,3	1	12,8	130,7
(2:1)	33,3	2	28,9	294,8
(2:1)	33,3	3	28,9	294,9
(1:1)	50	1	24,9	253,7
(1:1)	50	2	15,7	160,2
(1:1)	50	3	25,8	263
(1:2)	66,6	1	15,9	162,3
(1:2)	66,6	2	14,0	142,5
(1:2)	66,6	3	16,0	163,5
(1:3)	75	1	16,2	165,3
(1:3)	75	2	16,3	166,4
(1:3)	75	3	16,1	163,7

Datos ensayo de flexión

Proporción	Porcentaje (%)	Muestra	Resistencia a la flexión (Mpa)	Carga de flexión (Kgf/cm2)
(3:1)	25	1	7,4	1094,6
(3:1)	25	2	7,1	1052,5
(3:1)	25	3	6,7	994,5
(2:1)	33,3	1	9,6	1419,6
(2:1)	33,3	2	8,6	1264
(2:1)	33,3	3	9,0	1328,4
(1:1)	50	1	12,6	1858,6
(1:1)	50	2	12,9	1900
(1:1)	50	3	15,9	2346
(1:2)	66,6	1	12,8	1881,2
(1:2)	66,6	2	11,0	1627
(1:2)	66,6	3	12,6	1855
(1:3)	75	1	7,8	1150,3
(1:3)	75	2	9,0	1319
(1:3)	75	3	8,6	1262

Porcentaje de elasticidad

3:1

Alargamiento (mm)	Carga Media (Kgf)	Desviación Std (Kgf)
0,1	71,2	16,2
0,2	80,4	10,9
0,3	82,6	10,9

0,4	88,9	17,4
0,5	95,6	14,9
0,6	91,2	21,4
0,7	96,3	21,6
0,8	116,8	18,7
0,9	152,2	44,5
1	205,6	86,5
1,1	294,5	155,5
1,2	406,9	231,0
1,3	548,5	276,6
1,4	724,3	285,6
1,5	753,6	16,9
1,6	938,1	44,6
1,65	1044,6	70,8

2:1

Deformación (mm)	Carga Media (Kgf)	Desviación Std (Kgf)
0,1	41,8	2,6
0,2	50,7	15,5
0,4	54,5	14,7
0,6	61,1	14,1
0,7	60,1	9,1
0,8	78,6	11,3
0,9	107,7	60,0
1	133,5	94,9
1,1	240,4	231,6
1,2	268,8	306,5
1,3	467,9	509,5
1,5	722,2	787,4
2,3	964,9	0,0
2,4	1220,0	523,9
2,5	1230,0	0,0
2,6	1400,0	561,5
3,2	1114,1	0,0
3,4	1328,4	0,0

1:1

Deformación (mm)	Carga Media (Kgf)	Desviación Std (Kgf)
0,4	95,8	25,5
0,6	102,3	28,3
0,8	117,1	35,1
1,2	134,1	54,0
1,4	222,9	179,5
1,6	409,0	380,6
1,8	711,2	394,2
2	700,1	565,2
2,2	1266,1	245,5
2,4	1468,1	162,7
2,6	1658,1	56,1
2,8	1761,5	30,8
3,2	1879,3	29,2
3,5	1852,5	0,0
3,75	2093,3	0,0
4	2229,7	0,0
4,25	2346,4	0,0

1:2

Deformación (mm)	Carga Media (Kgf)	Desviacion Std (Kgf)
0,5	62,4	29,5
1	264,3	156,4
1,5	581,2	233,0
2	892,8	255,2
2,5	1141,1	254,0
3	1341,2	260,7
3,5	1487,4	218,6
4	1582,2	206,8
4,5	1650,7	186,2
5	1683,8	150,8
5,5	1710,1	126,0
6	1666,3	55,6
6,5	1810,4	0,0
7	1859,5	0,0
7,5	1872,0	0,0
8	1881,2	0,0

1:3

Deformación (mm)	Carga Media (Kgf)	Desviacion Std (Kgf)
1	123,5	44,0
2	352,7	87,0
3	594,2	63,4
4	769,7	70,3
5	907,1	82,4
6	1007,0	93,5
7	1077,0	103,4
8	1138,8	96,4
9	1164,0	110,3
10	1197,5	106,5
11	1217,7	92,0
12	1184,8	48,7
13	1195,8	64,3
14	1262,0	0,0
15	1262,0	0,0