UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE DISEÑO Y ARQUITECTURA
CARRERA DE DISEÑO INDUSTRIAL

Desarrollo de un Material en base a yeso reutilizado de moldes de impresión odontológica para aplicaciones en sectores productivos

Modalidad: Proyecto de Investigación

Trabajo de Titulación, proyecto investigación previo a la obtención del Título de Diseño Industrial, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato

Autor: Josué Alexander Pardo López

Tutor: Mg. Martín Benancio Monar Naranjo

Ambato – Ecuador

Marzo - 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación sobre el tema:

"Desarrollo de un Material en base a yeso reutilizado de moldes de impresión odontológica para aplicaciones en sectores productivos" del alumno Josué Alexander Pardo López, estudiante de la carrera de Diseño Industrial, considero que dicho Trabajo de Titulación bajo la Modalidad Proyecto de Investigación ha sido revisado en su totalidad, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Por lo tanto, autorizo la presentación del mismo, ante el organismo pertinente para ser sometido a la evaluación de los profesores calificadores designado por el H. Consejo Directivo de la Facultad.

Ambato, junio 2025

.....

Mg. Martín Benancio Monar Naranjo

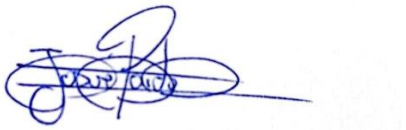
C.C.: 1803474087

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Josué Alexander Pardo López con cédula de ciudadanía No 1804341806, declaro que los criterios emitidos en el trabajo de titulación, modalidad proyecto de investigación bajo el tema: **"Desarrollo de un Material en base a yeso reutilizado de moldes de impresión odontológica para aplicaciones en sectores productivos"**, así como también los contenidos presentados, ideas, análisis, síntesis de datos y conclusiones, son de exclusiva responsabilidad de mi persona, como autor de este trabajo de Titulación

Ambato, junio 2025



.....

Josué Alexander Pardo López

C.C.: 1804341806

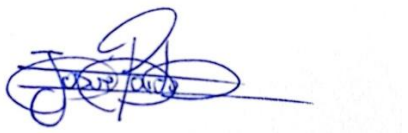
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Yo, Josué Alexander Pardo López con C.C.: 1804341806 en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de **"DESARROLLO DE UN MATERIAL EN BASE A YESO REUTILIZADO DE MOLDES DE IMPRESIÓN ODONTOLÓGICA PARA APLICACIONES EN SECTORES PRODUCTIVOS",** autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible con fines netamente académicos para su lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo una licencia gratuita e intransferible, así como los derechos patrimoniales de mi Trabajo de Titulación a favor de la Universidad Técnica de Ambato con fines de difusión pública; y se realice su publicación en el repositorio institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, siempre y cuando no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor/a.

Ambato, junio 2025



.....

Josué Alexander Pardo López

C.C.: 1804341806

AUTOR

TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado del Trabajo de Titulación, Modalidad Proyecto de Investigación sobre el **"DESARROLLO DE UN MATERIAL EN BASE A YESO REUTILIZADO DE MOLDES DE IMPRESIÓN ODONTOLÓGICA PARA APLICACIONES EN SECTORES PRODUCTIVOS"** de Josué Alexander Pardo López, estudiante de la carrera de Diseño Industrial, de la Facultad de Diseño y Arquitectura de conformidad con el Reglamento para la Titulación de Grado para obtener el título terminal de Tercer Nivel de la Universidad Técnica de Ambato, una vez revisado y calificado

Ambato, junio 2025

Para constancia firman:

_____

Título. Nombres y Apellidos
PRESIDENTE
C.C.:

_____	_____
Título. Nombres Apellidos	Título. Nombres Apellidos
MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO	MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO
C.C.:	**C.C.:**

DEDICATORIA

A mis padres, cuya entrega y amor incondicional han sido la base firme sobre la que he construido este sueño. Por cada sacrificio silencioso, por cada palabra de aliento y por enseñarme que la constancia transforma los anhelos en logros.

A mi hermana, compañera de vida y corazón generoso. Gracias por acompañarme con tu risa, por demostrarme que el amor fraternal puede ser abrigo, impulso y refugio al mismo tiempo y por siempre estar. Has sido luz en los días oscuros y alegría en los días grises; esta meta también lleva tu nombre.

A mis amigos, cómplices de historias, desvelos y momentos compartidos. Gracias por su presencia auténtica, por alentarme a seguir y por recordarme que no estoy solo en esta travesía.

Y a toda mi familia, por ser parte de mi raíz y mi impulso. Cada uno, con su cariño y palabras oportunas, ha sido un fragmento esencial en este camino que hoy llega a una meta.

Este logro también les pertenece.

Josué Alexander Pardo López

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. Gracias por estar siempre a mi lado, por cada palabra de aliento, por su paciencia incondicional y por creer en mí incluso en los momentos en los que yo dudaba. Este logro también es suyo.

A mi familia, por acompañarme en este camino con su cariño y apoyo constante. Sus gestos, su presencia y sus palabras me dieron fuerza para seguir adelante en cada etapa de esta carrera.

A todos los que, de una u otra manera, me acompañaron en este proceso, gracias por su comprensión, por celebrar mis logros y por sostenerme en los momentos difíciles. Cada uno ha sido parte fundamental en la culminación de este proyecto.

Josué Alexander Pardo López

ÍNDICE DE GENERAL

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO 9
1.1 Tema 9
1.2 Planteamiento del problema 9
1.2.1 Contextualización (Macro, Meso, y/o Micro) 10
1.2.2 Árbol de problemas 7
1.3 Justificación 8
1.4 Objetivos 9
1.4.1 Objetivo general 9
1.4.2 Objetivos específicos 9
1.5 Antecedentes de la investigación *(Estado del Arte)* 10
1.6 Fundamentación (Legal, axiológica, ontológica) 17
1.6.1 Legal 17
1.6.2 Axiológica 18
1.6.3 Ontológica 19
1.7 Categorías Fundamentales 19
1.7.1 Redes conceptuales 19
1.7.2 Constelación de ideas 21
1.8 Bases Teóricas 23
1.8.1 Composición y procesamiento del yeso a base de yeso reutilizado 23
1.8.2 Propiedades y aplicaciones del material 27
1.9 Formulación de Hipótesis 48
1.10 Señalamiento de Variables 48
1.10.1 Variable Dependiente 48
1.10.2 Variable Independiente 48
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA 49
2.1 Método 49
2.1.1 Enfoque de la investigación 49
2.1.2 Modalidad Básica de la Investigación 50
2.1.3 Nivel o Tipo de Investigación 50
2.2 Población y Muestra 51
2.2.1 Población 51

2.2.2 Muestra 51
2.3 Operacionalización de Variables 52
2.4 Técnicas de recolección de Datos 54
2.4.1 Recolección de muestras de yeso descartado 54
2.4.2 Procesamiento de material 54
2.4.3 Ensayos de laboratorio 56
2.4.4 Entrevista semiestructurada 57
2.4.5 Registro de datos experimentales 60
2.5 Material Compuesto 60
2.5.1 Resina 60
2.5.2 Fibra de Vidrio 60
2.5.3 Yeso odontológico reutilizado 60
2.5.4 Probetas 60
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 67
3.1 Resultados 67
3.1.1 Tracción 67
3.1.2 Impacto 71
3.1.3 Fatiga Flexionante 72
3.2 Discusión 74
3.2.1 Tracción 74
3.2.2 Impacto 74
3.2.3 Fatiga flexionante 75
3.2.4 Aplicaciones Industriales 76
Conclusiones y Recomendaciones 81
4.1 Conclusiones 81
4.2 Recomendaciones 83
Bibliografía 84
ANEXOS 91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. ***Casting a green future: Recycling the gypsum dental products.*** **10**
Tabla 2. ***Protocolo para el reciclaje de los residuos de yesos generados en los procesos de elaboración de prótesis dentales en una Institución Universitaria de Medellín.*** **11**
Tabla 3. ***Up-cycling the dental waste materials: Going green in dentistry.*** **12**
Tabla 4. ***Modeling the Mechanical Properties of Primary Recycled Type II Dental Plaster Blend Using Desirability Optimization Methodology.*** **13**
Tabla 5. ***Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution.*** **14**
Tabla 6. ***Evaluation of physico-mechanical properties of dental plaster modified with pulverized acrylic waste.*** **15**
Tabla 7. ***Variable Independiente*** **52**
Tabla 8. ***Dependiente*** **53**
Tabla 9. ***Recuperación artesanal del yeso odontológico tipo III mediante calcinación controlada.*** **55**
Tabla 10. ***Entrevista Semiestructurada.*** **57**
Tabla 11. ***Triangulación de datos.*** **59**
Tabla 12. ***Datos experimentales del fraguado de yeso reprocesado*** **59**
Tabla 13. ***Normas y ensayos a realizar*** **61**
Tabla 14. ***Parámetros y resultados de los ensayos de tracción.*** **68**
Tabla 15. ***Parámetros y resultados de los ensayos de impacto*** **71**
Tabla 16. ***Parámetros y resultados de los ensayos de Fatiga flexionante.*** **73**
Tabla 17. ***Relación de materiales en el mercado con los obtenidos.*** **77**
Tabla 18. ***Ponderación de cada material según sus características.*** **78**

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1. ***Mina de sal, Molino de Río de Cantera de yeso, Molino de Río de Aguas.*** **Fuente:** ***Figura adaptada de (A.Barra, 2009).*** **..... 12**

Figura 2. ***Caja de desechos peligrosos generados en consultorios dentales.*** **Fuente:** ***Figura adaptada de (Lara et al., 2024).*** **..... 14**

Figura 3. ***Árbol de problemas.*** **Fuente:** ***Elaboración propia*****..... 7**

Figura 4. ***Redes Conceptuales.*** **Fuente:** ***Elaboración propia.*** **..... 20**

Figura 5. ***Constelación de Ideas Variable Dependiente.*** **Fuente:** ***Elaboración propia.*****..... 21**

Figura 6. ***Constelación de Ideas Variable Independiente.*** **Fuente:** ***Elaboración propia.*****..... 22**

Figura 7. ***Economía Circular.*** **Fuente:** ***Tomado de*** **(Macarthur & Ejecutivo, 2014)*****..... 34***

Figura 8. ***Diferencias entre el modelo lineal y el modelo circular.*** **Fuente:** ***Figura tomada de (Ministerio de Producción, 2024).*** **..... 36**

Figura 9. ***Clasificación de las CMC en función de la naturaleza de la matriz.*** **Fuente:** ***Tomado de (Rajak et al., 2024).*** **..... 37**

Figura 10. ***Categorías de materiales O-CMC*****. Fuente:** ***Tomado de (Rajak et al., 2024).*****..... 38**

Figura 11. ***Ctegorías de materiales no óxidos.*** **Fuente:** ***Tomado de (Rajak et al., 2024).*****..... 38**

Figura 12. ***Pensamiento sistémico.*** **Fuente:** ***Tomado de (Nicolás Capricho Marocci (CTplas) et al., 2021).*****..... 42**

Figura 13. ***Sistema socioecológico.*** **Fuente:** ***Tomado de (Cerón Hernández et al., 2019).*****..... 44**

Figura 14. ***Cadena de valor con base en la cadena de Porter.*** **Fuente:** ***Tomado de (María Arroyave-Puerta et al., 2019).*** **..... 46**

Figura 15. ***Cradle to Cradle.*** **Fuente:** ***Tomado de (Felix Joerg Mueller, 2022).*****47**

Figura 16. ***Probeta prueba de impacto*****. Fuente. Elaboración propia..... 61**

Figura 17. ***Probeta Tracción.*** **Fuente. Elaboración propia. 62**

Figura 18. ***Probeta Fatiga flexionante método B.*** **Fuente. Elaboración propia. 62**

Figura 19. ***Máquina de ensayo de impacto.*** **Fuente.** ***Elaboración propia.*** **..... 63**
Figura 20. ***Ensayo tracción.*** **Fuente.** ***Elaboración propia.*** **..... 65**
Figura 21. ***Ensayo fatiga flexionante*** **Fuente.** ***Elaboración propia.*** **..... 66**
Figura 22. ***Resultado probetas ensayo de tracción.*** **Fuente.** ***Autoría Propia.*** **... 70**
Figura 23. ***Deformación de las diferentes probetas.*** **Fuente.** ***Autoría propia.*** **... 70**
Figura 24. ***Resultados probetas ensayo de impacto.*** **Fuente.** ***Elaboración Propia.*** **..... 72**
Figura 25. ***Resultado probeta ensayo fatiga flexionante.*** **Fuente.** ***Elaboración propia.*** **..... 73**
Figura 26. ***Diagrama de araña*****. Fuente.** ***Elaboración propia.*** **..... 79**

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación aborda la problemática del desecho de yeso proveniente de moldes de impresión odontológica, un material que, pese a su potencial de reutilización, suele descartarse sin tratamiento adecuado, generando impactos negativos en el ambiente y la salud pública. Desde un enfoque de diseño industrial, se plantea el desarrollo de un material compuesto a partir de yeso recuperado, mezclado con resina y fibra de vidrio, para su posible aplicación en sectores productivos no clínicos.

El proceso metodológico incluyó la recolección, limpieza, trituración, calcinación y reprocesamiento del yeso descartado, seguido de la fabricación de probetas sometidas a ensayos de tracción, impacto y fatiga flexionante. Los resultados experimentales respaldan el uso de yeso dental reciclado como un recurso viable en materiales compuestos, especialmente en aplicaciones donde se priorice la resistencia al impacto y la sostenibilidad del recurso.

Este estudio valida la posibilidad técnica y ambiental de reutilizar residuos odontológicos, proponiendo un modelo sostenible basado en los principios de la economía circular. Además, promueve la implementación de sistemas accesibles de recuperación de materiales dentro de clínicas y laboratorios dentales, reduciendo costos operativos y contribuyendo a la reducción de residuos peligrosos.

Se concluye que el yeso reutilizado representa una oportunidad para innovar en el manejo de desechos clínicos, aportando tanto a la sostenibilidad ambiental como a la diversificación de usos industriales del material, y sentando las bases para futuras normativas e investigaciones aplicadas en el campo del diseño responsable.

Palabras clave: yeso odontológico, reciclaje, economía circular, materiales compuestos, sostenibilidad.

ABSTRACT

This research addresses the problem of gypsum waste from dental impression moulds, a material that, despite its potential for reuse, is often discarded without proper treatment, generating negative impacts on the environment and public health. From an industrial design perspective, the development of a composite material made from recovered plaster, mixed with resin and fibreglass, is proposed for possible application in non-clinical production sectors.

The methodological process included the collection, cleaning, grinding, calcination, and reprocessing of discarded gypsum, followed by the manufacture of test specimens subjected to tensile, impact, and flexural fatigue tests. The experimental results support the use of recycled dental gypsum as a viable resource in composite materials, especially in applications where impact resistance and resource sustainability are prioritised.

This study validates the technical and environmental feasibility of reusing dental waste, proposing a sustainable model based on the principles of the circular economy. In addition, it promotes the implementation of accessible material recovery systems within dental clinics and laboratories, reducing operating costs and contributing to the reduction of hazardous waste.

It is concluded that reused plaster represents an opportunity to innovate in clinical waste management, contributing both to environmental sustainability and to the diversification of industrial uses of the material, and laying the foundations for future regulations and applied research in the field of responsible design.

Keywords: dental gypsum, recycling, circular economy, composite materials, sustainability.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la odontología, el uso frecuente de yeso especialmente para crear moldes y modelos protésicos produce un volumen considerable de desechos, los cuales, en muchos casos, no son gestionados correctamente. Al ser eliminados junto con otros residuos médicos, estos materiales pueden dañar el medio ambiente, ya que tienen la capacidad de liberar sustancias nocivas que contaminan el suelo y los recursos hídricos.

Aunque el yeso dental es reciclable, en la práctica clínica su reutilización es casi nula. Esto se debe a tres barreras principales: falta de infraestructura para su recolección y procesamiento, desconocimiento técnico entre los profesionales odontológicos sobre métodos de reciclaje, y ausencia de normativas que obliguen o incentiven su gestión sostenible. Ante este escenario, el diseño industrial emerge como un campo clave para desarrollar procesos innovadores que transformen estos residuos en materias primas secundarias, útiles para otros sectores productivos.

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un material compuesto utilizando yeso odontológico reciclado como materia prima principal. El proceso implica varias etapas: recolección y limpieza, triturado, tratamiento térmico (calcinación), Molienda controlada y mezcla con un aglutinante para mejorar sus características. El material resultante será sometido a ensayos físico-mecánicos estandarizados (tracción, impacto y fatiga flexionante) para evaluar su potencial en aplicaciones industriales, contribuyendo así a una odontología más sostenible y reduciendo significativamente el volumen de residuos generados por esta práctica clínica.

El estudio también busca diseñar un modelo escalable que pueda implementarse en clínicas, laboratorios y pequeñas empresas, probando que la economía circular no solo es factible, sino esencial para abordar los retos ecológicos actuales.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema

“Desarrollo de un Material en base a yeso reutilizado de moldes de impresión odontológica para aplicaciones en sectores productivos"

1.2 Planteamiento del problema

En los laboratorios de prótesis dental se produce una cantidad significativa de desechos de yeso, cuyo manejo final representa un desafío tanto económico como ecológico. En la actualidad, este material suele depositarse en vertederos o rellenos sanitarios, lo que puede ocasionar graves consecuencias ambientales. Entre los principales riesgos se encuentra la contaminación de fuentes hídricas, la emisión de gases perjudiciales para la salud y el aumento en la explotación de recursos naturales, especialmente cuando el descarte se realiza sin las medidas de control adecuadas. Estas prácticas no solo afectan al medio ambiente, sino que también implican costos elevados para su gestión, evidenciando la necesidad de implementar alternativas más sostenibles para el tratamiento de estos residuos. Aunque el yeso posee características que permitirían su reprocesamiento, en la realidad clínica esto no ocurre. Las principales barreras incluyen la falta de infraestructura adecuada para su tratamiento, el desconocimiento sobre técnicas de reciclaje aplicables y la ausencia de incentivos regulatorios o económicos que motiven su reutilización. Como consecuencia, gran cantidad de este material terminan en rellenos sanitarios, donde pueden alterar la composición del suelo y liberar partículas al medio ambiente (Sonia Elena Pineda-Higuita et al., 2018).

Frente a este escenario, resulta necesario desarrollar alternativas que permitan integrar prácticas sostenibles en el quehacer odontológico. Muchos profesionales estarían dispuestos a implementar sistemas de reciclaje, pero enfrentan limitaciones técnicas y económicas. No existen, por ejemplo, equipos accesibles que permitan procesar el yeso usado directamente en la clínica, ni protocolos estandarizados que garanticen su calidad tras la reprocesamiento.

Desde la perspectiva del diseño industrial, esta problemática abre un campo de oportunidad para innovar en soluciones circulares. El yeso odontológico desechado podría transformarse en materia prima para nuevos productos, siempre

que se desarrollen métodos eficientes de limpieza, trituración y reactivación. Además, su potencial aplicación podría extenderse más allá del ámbito dental, incorporándose a otros sectores como la construcción o la fabricación de materiales educativos.

Este proyecto de investigación se enfoca en analizar las propiedades del yeso odontológico usado y evaluar diferentes técnicas para su valorización. El objetivo principal es diseñar un sistema que permita su reincorporación productiva, considerando factores como viabilidad técnica, rentabilidad y beneficios ambientales. A través de pruebas experimentales, se buscará determinar las condiciones óptimas para transformar este residuo en un recurso útil, contribuyendo así a reducir el impacto ecológico de la práctica odontológica.

La implementación de estas soluciones no solo representaría un avance en términos de sostenibilidad, sino que también podría generar ahorros significativos para las clínicas. Más allá de los beneficios económicos, este enfoque promovería un cambio cultural dentro del sector, fomentando la adopción de principios de economía circular en el manejo de los insumos odontológicos. Los resultados de esta investigación sentarían las bases para desarrollar normativas y programas de gestión de residuos más efectivos, alineados con los desafíos ambientales actuales.

En definitiva, abordar el problema del yeso odontológico desde una perspectiva innovadora permitiría transformar un pasivo ambiental en una oportunidad de mejora para el sector. Este trabajo busca no solo ofrecer soluciones técnicas concretas, sino también inspirar un cambio de mentalidad hacia modelos de producción y consumo más responsables en el campo de la salud dental.

1.2.1 Contextualización (Macro, Meso, y/o Micro)

1.2.1.1 Macro

El yeso (sulfato de calcio dihidratado - $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) es un mineral sedimentario de origen natural, históricamente empleado en construcción y arte desde la antigüedad. Caracterizado por su tonalidad blanca en estado puro, adquiere matices grises, rosados o marrones debido a impurezas como óxidos de

hierro o materia orgánica. Su denominación varía según etimologías: 'aljez' (del árabe al-ǧiss) y 'gypsum' (del latín), ambas refiriéndose al mismo compuesto (Sonia Elena Pineda-Higuita et al., 2018).

El yeso es un mineral ampliamente distribuido en el mundo, con España, Tailandia, Estados Unidos, Turquía y Rusia como algunos de los mayores productores. En Estados Unidos, los depósitos más importantes se ubican en estados como Nueva York, Michigan, Virginia, Ohio, Iowa, Kansas, Texas, Nevada y el sur de California. Por su parte, Canadá extrae yeso principalmente en las provincias de Nueva Escocia y Nuevo Brunswick para su exportación. En Europa, Francia destaca por sus yacimientos en la Cuenca de París, especialmente en Montmartre, donde el mineral se encuentra asociado a margas y arcillas, dando origen al famoso "yeso de París" (Britannica, 2025).

El yeso odontológico, producto de décadas de innovación tecnológica, ha consolidado su papel como material indispensable en clínica y laboratorio dental. Mediante procesos avanzados de deshidratación térmica y modificación química de sus componentes, se han desarrollado variedades especializadas como el yeso tipo III (piedra dental) y tipo IV (alta resistencia), cada uno optimizado para aplicaciones específicas: desde la obtención de modelos de estudio hasta la fabricación de prótesis definitivas. Esta versatilidad deriva de la capacidad de ajustar propiedades críticas como tiempo de fraguado, expansión de setting y resistencia a la compresión, permitiendo su adaptación a protocolos clínicos estandarizados (Sonia Elena Pineda-Higuita et al., 2018).

En la Figura1 se observa un paisaje industrial que incluye una cantera de yeso, reflejando procesos de extracción y transformación de recursos naturales.

Figura1. *Mina de sal, Molino de Río de Cantera de yeso, Molino de Río de Aguas.*
Fuente: *Figura adaptada de (A.Barra, 2009).*

1.2.1.2 Meso

En clínicas y laboratorios, el yeso es un aliado imprescindible para moldes y prótesis, pero rara vez se piensa en su destino final. Aunque existen normativas ambientales, muchas veces faltan alternativas prácticas o incentivos para reciclar. Aquí es donde el diseño industrial puede tender un puente: imaginar cómo convertir esos restos de yeso en materiales para construcción, mobiliario o incluso arte, no solo aliviaría a las clínicas de un problema logístico, sino que abriría nuevas oportunidades de negocio y colaboración entre sectores.

En Ecuador, la gestión de residuos peligrosos ha adquirido especial importancia en el ámbito institucional, tanto público como privado, durante la última década. Este creciente interés responde a tres factores clave: la priorización de la seguridad ocupacional en entornos hospitalarios, la urgencia por minimizar el impacto ecológico, y la optimización de los estándares de atención médica. Frente a esto, autoridades locales y gobiernos regionales han implementado estrategias para aplicar normativas técnicas y legales en el manejo de estos desechos. Simultáneamente, el Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Salud

Pública han liderado iniciativas regulatorias mediante instrumentos como el 'Reglamento para la Gestión de Desechos en Establecimientos de Salud' y el 'Reglamento Interministerial de Gestión de Desechos Sanitarios', marcando un precedente en la política ambiental del país (Lara et al., 2024).

Los laboratorios de mecánica dental generan volúmenes significativos de residuos durante sus procesos rutinarios, los cuales actualmente son manejados sin protocolos de bioseguridad estandarizados. Esta situación representa un riesgo dual: por un lado, contamina el ecosistema debido a la disposición inadecuada de materiales potencialmente tóxicos, y por otro, expone a trabajadores y estudiantes a peligros ocupacionales. En el contexto ecuatoriano, si bien existen regulaciones específicas para la gestión de desechos en áreas clínicas hospitalarias, estas no incluyen directrices aplicables al ámbito protésico dental. Esta brecha regulatoria evidencia la necesidad imperante de investigaciones que establezcan pautas técnicas para el manejo seguro y sostenible de estos residuos especializados (Cabezas Salazar, 2024).

En el contexto ecuatoriano, la matriz de autoevaluación para consultorios odontológicos evalúa dos dimensiones clave: la administrativa y la operativa. En el ámbito administrativo, se analizan elementos como la formulación de políticas institucionales, la gestión documental, la capacitación continua del equipo de trabajo y el apego a la normativa vigente. Un alto nivel de cumplimiento en esta área asegura: sistemas de registro detallados, protocolos optimizados para manejo de residuos, y la consolidación de una cultura organizacional basada en seguridad y normativa. Por otro lado, la dimensión operativa examina la aplicación práctica de los procesos de gestión de desechos, abarcando desde la segregación inicial hasta el almacenamiento temporal, transporte y tratamiento final. Un desempeño óptimo en este aspecto minimiza significativamente los riesgos de contaminación ambiental y exposición ocupacional, protegiendo tanto al personal como a la comunidad (Cruz Ramos et al., 2024).

La Figura 2 muestra valores acerca de residuos peligrosos (materiales biológicos) utilizados en consultorios dentales, destacando su diseño y etiquetado según normativas sanitarias.

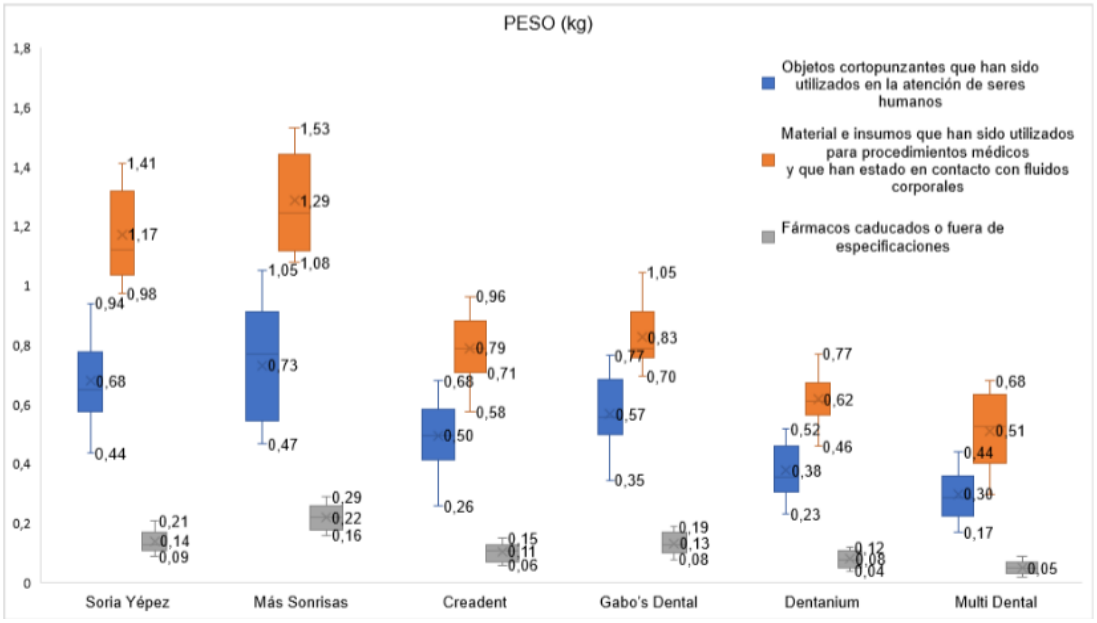


Figura 2. *Caja de desechos peligrosos generados en consultorios dentales.*
Fuente: *Figura adaptada de (Lara et al., 2024).*

1.2.1.3 Micro

Es considerable la cantidad de yeso desechado por parte de los odontólogos, material que actualmente termina en vertederos sin ningún tratamiento. Sin embargo, imaginemos el impacto si se implementa un sistema sencillo de clasificación y reciclaje que permitiera transformar estos residuos en nueva materia prima. Esta acción individual, replicada por miles de profesionales a nivel nacional, podría mejorar la sostenibilidad ambiental del sector odontológico.

La falta de investigaciones locales en Ambato sobre la gestión de residuos infecciosos en odontología ha generado un vacío de conocimiento crítico. Esta carencia de datos científicos y estadísticas confiables contribuye a que tanto estudiantes como profesionales subestimen los riesgos asociados al manejo inadecuado de estos desechos, incrementando la probabilidad de accidentes ocupacionales, contaminación cruzada y problemas de salud pública (Villacreses Medina & Tasipanta Suntasig, 2017).

La Figura 3 presenta un diagrama en forma de árbol donde se jerarquizan las causas (raíces), el problema central (tronco) y sus efectos (ramas), facilitando el análisis estructural de una situación.

1.2.2 Árbol de problemas

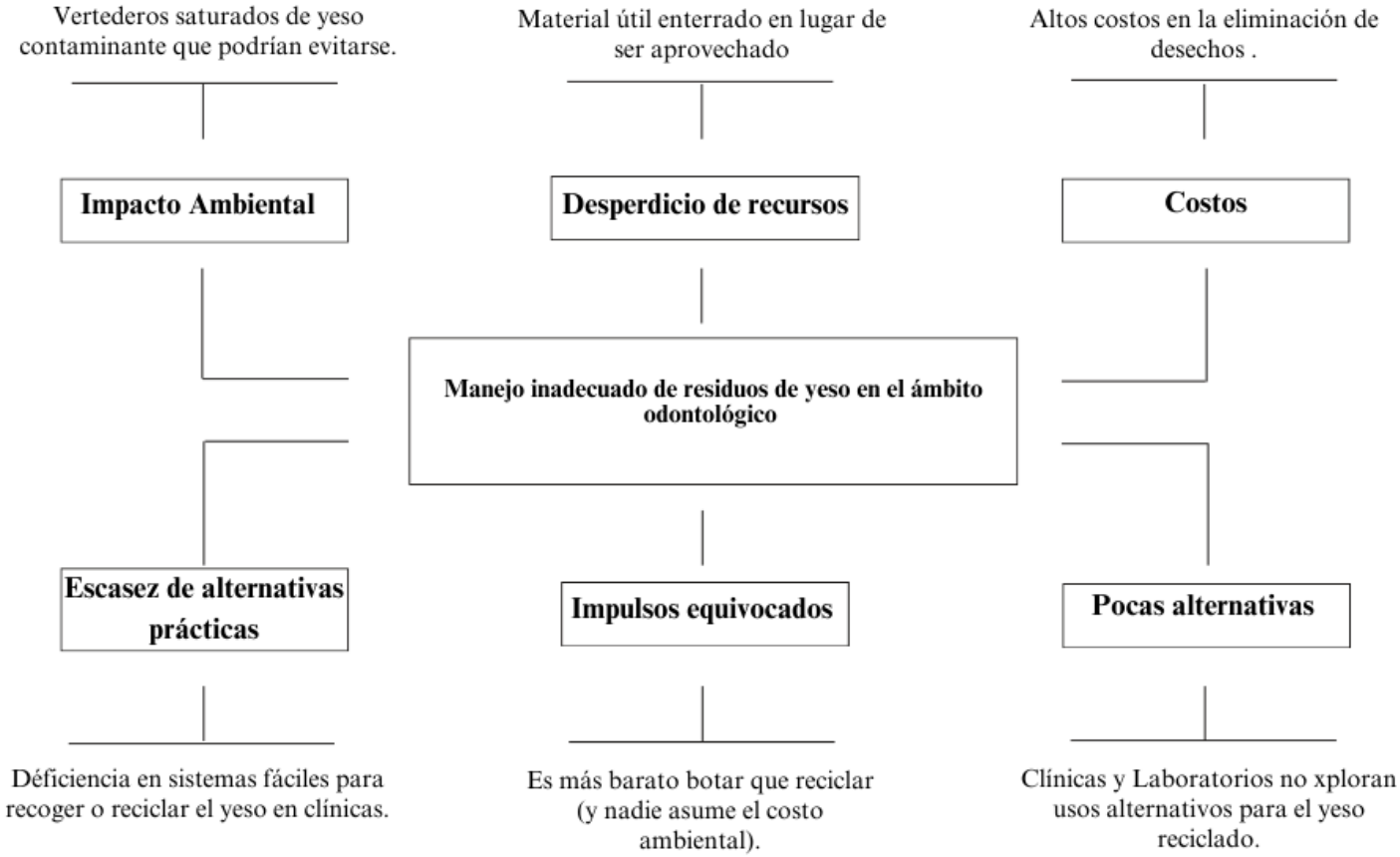


Figura 3. *Árbol de problemas.*
Fuente: *Elaboración propia***.**

1.3 Justificación

Este estudio tiene como objetivo equipar a técnicos dentales, estudiantes y pequeños emprendedores con herramientas prácticas para transformar sus realidades ambientales. A través de protocolos accesibles y bajo costo, demostramos que la sostenibilidad en odontología se materializa cuando: se adaptan tecnologías simples, se implementan circuitos locales de recolección diferenciada, y se fomenta la innovación colaborativa entre actores del territorio. Más que un concepto teórico, proponemos un manual de acciones concretas donde cada aporte individual, multiplicado en red, configura un nuevo estándar de práctica profesional responsable.

En la práctica odontológica actual, los moldes dentales terminados suelen tener solo dos destinos: su almacenamiento indefinido o su eliminación como residuos comunes. Sin embargo, estos materiales especialmente los basados en sulfato de calcio poseen componentes que los clasifican como potencialmente tóxicos cuando se mezclan con desechos generales. Zakiyuddin et al. (2020). Su gestión diferenciada mediante procesos de reciclaje especializado ofrece una triple ventaja: minimiza el impacto ambiental al evitar la generación de sulfuro de hidrógeno en vertederos, optimiza recursos al reintroducir el material en nuevos ciclos productivos, y reduce costos al disminuir la necesidad de yeso virgen para procedimientos que no requieren máxima precisión, como modelos de estudio (Zakiyuddin et al., 2020).

Este estudio adquiere relevancia al contribuir activamente a la transición hacia modelos de producción sostenibles, donde los residuos odontológicos se transforman en recursos valiosos. Al integrar los principios de la economía circular, no solo se minimiza el impacto ambiental, sino que también se impulsa la creatividad tecnológica para una nueva aplicación. Según la Organización de las Naciones Unidas la adopción de prácticas sostenibles en la gestión de residuos es fundamental para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente en lo relacionado con la producción y el consumo responsables.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un material a partir de yeso reutilizado de moldes de impresión odontológica, evaluando sus propiedades físico – mecánicas, procesos de recuperación eficientes y su potencial aplicación en sectores productivos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar procesos de recuperación y acondicionamiento del yeso provenientes de moldes de impresión odontológica para su reutilización.

- Caracterizar las propiedades físico – mecánicas del yeso recuperado, verificando su comportamiento y rendimiento en diversas condiciones de uso.

- Analizar posibles aplicaciones del yeso reutilizado en sectores productivos, identificando oportunidades, ventajas y limitaciones en su incorporación.

1.5 Antecedentes de la investigación *(Estado del Arte)*

Tabla 1. *Casting a green future: Recycling the gypsum dental products.*

Caso 1	
Nombre	Sakshi Sharma
Título	Casting a green future: Recycling the gypsum dental products.
Año	2020
Ubicación	India
Descripción	En este artículo se pudo conocer que el yeso dental es un residuo subestimado pero masivo, especialmente en un país como la India, donde la alta demanda de servicios odontológicos choca con la falta de gestión sostenible de sus desechos. Según los cálculos, solo las 345 facultades de odontología del país generan aproximadamente 173 toneladas anuales de yeso residual, y al sumar los consultorios privados, esta cifra podría duplicarse o incluso triplicarse. Pero lo más preocupante es que estos residuos no desaparecen: se entierran, se amontonan en vertederos o, en el peor de los casos, se incineran sin control, liberando sulfuro de hidrógeno (H_2S) y contribuyendo a la contaminación del suelo, el agua y el aire.
Resultados	Para gestionar sosteniblemente los residuos de yeso dental, el primer paso es separarlos de otros desechos y optar por su reciclaje o eliminación responsable según normativas ambientales. El método químico, desarrollado en India, utiliza bicarbonato de amonio para transformar el yeso en bicarbonato de calcio (útil en metalurgia) y sulfato de amonio (empleado en fertilizantes e industrias), mientras que el método físico reciclaje en circuito cerrado tritura y recalienta el yeso para reutilizarlo sin perder propiedades. Además, el yeso reciclado tiene múltiples aplicaciones: en agricultura mejora suelos y cultivos, en ganadería optimiza camas de animales, en industria actúa como estabilizador de residuos y material de construcción, y en jardinería acondiciona terrenos. Estas soluciones demuestran que el yeso dental, lejos de ser un simple residuo, puede convertirse en un recurso valioso con un manejo adecuado, reduciendo así su impacto ambiental
Fuente	(Sakshi Sharma, 2020)

Tabla 2. *Protocolo para el reciclaje de los residuos de yesos generados en los procesos de elaboración de prótesis dentales en una Institución Universitaria de Medellín.*

Caso 2	
Nombre	Mosquera Palomino y Vélez Gómez
Título	Protocolo para el reciclaje de los residuos de yesos generados en los procesos de elaboración de prótesis dentales en una Institución Universitaria de Medellín
Año	2023
Ubicación	Colombia
Descripción	Se realizó un estudio experimental de enfoque cuantitativo, descriptivo, transversal y prospectivo, enfocado en el yeso como residuo en la fabricación de prótesis dentales. Se recolectaron desechos de yeso durante cuatro meses en laboratorios universitarios, los cuales fueron lavados, triturados, calcinados, molidos y tamizados para obtener un material reciclado de granulometría fina. Este yeso procesado se utilizó para fabricar probetas cilíndricas sometidas a pruebas de compresión uniaxial según la Norma Técnica Colombiana NTC 562, evaluando su resistencia mecánica. Los resultados permitieron establecer protocolos para su reutilización en modelos de trabajo, zócalos y montajes de articulador. El proyecto, aprobado por el Comité de Investigación de la Institución Universitaria Visión de las Américas (código PS017-2019), fue financiado internamente y clasificado como de riesgo mínimo.
Resultados	Para las pruebas mecánicas, se utilizó una máquina de ensayos universales Shimadzu AGS-X de 50 kN, siguiendo la norma NTC 562 (materiales dentales, yeso dental). Se evaluaron cinco probetas cilíndricas (20 mm de diámetro × 40 mm de altura) bajo una velocidad de carga de 5 kN/min, obteniendo un comportamiento normal según los criterios de la norma. Los resultados mostraron un módulo elástico promedio de 303,62 MPa y una resistencia última a compresión de 4,35 MPa. Además, se verificó un impacto positivo en la reducción de residuos, con 18 kg de yeso reciclado en cuatro meses, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental en laboratorios dentales.
Fuente	(Mosquera Palomino & Vélez Gómez, 2023)

Tabla 3. *Up-cycling the dental waste materials: Going green in dentistry.*

Caso 3	
Nombre	Rajesh Khadse et al.
Título	Up-cycling the dental waste materials: Going green in dentistry.
Año	2024
Ubicación	India
Descripción	Este estudio analiza el reciclaje y reutilización de materiales dentales como el yeso dental (Tipo II) y la piedra dental (Tipo III), comúnmente desechados en laboratorios de prótesis. Estos materiales, derivados del yeso, se someten a procesos de desinfección, calcinación (seca o húmeda) y molienda para convertirlos en polvo reutilizable en nuevos moldes. Esta técnica no solo supera las limitaciones de los métodos tradicionales minimizando la contracción y mejorando la precisión de las impresiones sino que también promueve la sostenibilidad al reducir desechos, optimizar costos y disminuir el impacto ambiental en la práctica odontológica.
Resultados	Si todas las facultades de odontología de la India (aproximadamente 329) implementaran el reciclaje de materiales dentales como yeso y piedra dental, se generaría un impacto económico significativo, además de reducir residuos. Sin embargo, estudios sobre este tema son escasos. Una encuesta realizada en Chhattisgarh distribuida a 3.500 estudiantes y clínicas privadas, con 900 respuestas (800 estudiantes y 100 odontólogos) reveló que, aunque el 96% de los encuestados conocía la gestión de residuos, pocos dominaban técnicas específicas de reciclaje, como el reprocesamiento del yeso dental. Los hallazgos indican que el yeso reciclado mantiene propiedades químicas similares al comercial, pese a variaciones en granulometría y densidad, lo que permite su reutilización múltiple sin perder calidad. No obstante, se requiere mayor investigación para optimizar los procesos y garantizar uniformidad en el material obtenido. La adopción generalizada de estas técnicas no solo reduciría costos, sino que posicionaría a la odontología india como líder en sostenibilidad.
Fuente	(Khadse et al., 2024)

Tabla 4. *Modeling the Mechanical Properties of Primary Recycled Type II Dental Plaster Blend Using Desirability Optimization Methodology.*

Caso 4	
Nombre	Barnabas et al.
Título	Modeling the Mechanical Properties of Primary Recycled Type II Dental Plaster Blend Using Desirability Optimization Methodology.
Año	2023
Ubicación	Nigeria
Descripción	Los métodos convencionales de eliminación, como incineración y vertederos, han demostrado ser ineficaces para gestionar los residuos dentales. Este estudio propone un enfoque innovador basado en el reciclaje y reutilización de estos materiales, específicamente mediante el yeso dental Tipo II reciclado. La metodología empleó un modelo de optimización de deseabilidad para evaluar las propiedades mecánicas de mezclas primarias de yeso reciclado, estableciendo así parámetros técnicos que garantizan su calidad para aplicaciones clínicas. Este enfoque no solo ofrece una solución ecológicamente viable, sino que también sienta las bases para programas estandarizados de reciclabilidad en odontología, superando las limitaciones de los sistemas tradicionales de disposición final.
Resultados	El estudio caracterizó las propiedades mecánicas del yeso dental reciclado mediante pruebas estandarizadas: compresión (ASTM D695), resistencia a flexión (ASTM D6272) y dureza Vickers (ASTM E384). Los resultados demostraron un desempeño comparable al yeso dental virgen, validando la viabilidad técnica del material reciclado. Esta equivalencia en propiedades mecánicas sustenta su potencial para reemplazar al material convencional en aplicaciones odontológicas, respaldando así su integración en protocolos clínicos sostenibles sin comprometer la calidad técnica. Los hallazgos refuerzan y se alinean con los principios de economía circular.
Fuente	(Barnabas et al., 2023)

Tabla 5. *Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution.*

Caso 5	
Nombre	Geraldo et al.
Título	Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution.
Año	2017
Ubicación	Sao Paulo
Descripción	El estudio desarrolló un protocolo sistemático para transformar residuos de yeso dental en material reutilizable mediante un proceso escalable de secado solar, trituración (80% < 0.297 mm) y calcinación en horno estacionario (150°C ± 5°C). Para evaluar la reciclabilidad, el material se sometió a múltiples ciclos, manteniendo relaciones agua/yeso (A/P) de 0.7-0.8 para garantizar trabajabilidad homogénea. • Propiedades físicas: Densidad aparente, granulometría (normas ABNT) y superficie específica (BET). • Composición química: EDX, DRX (Shimadzu XRD-6000) y análisis térmico (TG/DTG/DTA, Shimadzu DTG 60H) para identificar fases cristalinas y contenido de hemihidrato/dihidrato. • Propiedades mecánicas: Resistencia a compresión/flexión (Versa Tester, 150 kN) y dureza superficial en 1 a 91 días. Se aplicó un método rápido basado en termogravimetría para cuantificar componentes principales (hemihidrato, dihidrato, $CaCO_3$) mediante estequiometría, comparando curvas TG de muestras hidratadas y no hidratadas en base calcinada.
Resultados	El protocolo evita molienda adicional, reduciendo costos energéticos para pequeños recicladores. Los resultados demuestran que el yeso mantiene propiedades críticas tras múltiples ciclos, validando su circularidad en aplicaciones odontológicas y de construcción. Este enfoque optimiza recursos y promueve sostenibilidad en la gestión de residuos dentales.
Fuente	(Geraldo et al., 2017)

Tabla 6. *Evaluation of physico-mechanical properties of dental plaster modified with pulverized acrylic waste.*

Caso 6	
Nombre	Ponnapalli et al.
Título	Evaluation of physico-mechanical properties of dental plaster modified with pulverized acrylic waste.
Año	2023
Ubicación	India
Descripción	Se crearon discos de resina acrílica (50×2 mm) mediante moldes de cera desparafinados. La resina autopolimerizable (proporción 3:1 polvo/monómero) se procesó hasta obtener un polvo fino mediante molienda manual y tamizado. Tamaño muestral calculado (n=120) con G*Power (95% confianza, 80% potencia) 5 subgrupos por concentración de aditivo (0%, 0.5%, 1%, 5%, 10% peso polvo acrílico) 1. **Diseño experimental:** o Tamaño muestral calculado (n=120) con G*Power (95% confianza, 80% potencia) o 4 grupos principales (n=30 cada uno) evaluando: ▪ Tiempos de fraguado (Gillmore) ▪ Resistencia a compresión (1h y 24h) ▪ Reproducibilidad superficial o 5 subgrupos por concentración de aditivo (0%, 0.5%, 1%, 5%, 10% peso polvo acrílico) Protocolos de evaluación: • **Tiempos de fraguado**: o Medición con agujas Gillmore (113.4g y 453.65g) o Criterios: Ausencia de hendidura en superficie • **Resistencia mecánica**: o Probetas cilíndricas (Ø20×40mm) según ANSI/ADA 25

- Ensayo en máquina universal (1mm/min)
- Fórmula: $CS = F/(\pi r^2)$

- **Reproducibilidad superficial**:
  - Evaluación con troquel maestro (patrón de líneas)
  - Puntuación cualitativa (1-4) mediante estereomicroscopio (7X)

Análisis estadístico:

- ANOVA unidireccional y prueba HSD de Tukey (SPSS v24)
- Nivel de significancia $p<0.05$
- Variables comparadas: concentración vs propiedades mecánicas/superficiales

Innovaciones metodológicas:

1. Sistema estandarizado de evaluación de reproducción superficial mediante patrones geométricos
2. Protocolo de modificación con residuos acrílicos sin procesos complejos
3. Control estricto de variables de mezcla (120 rpm, vibración)

Resultados **Tiempos de fraguado**

- El grupo control mostró el menor tiempo de fraguado inicial ($p=0.049$ en ANOVA).
- La adición de 0.5% de polvo acrílico aumentó significativamente ambos tiempos de fraguado vs control ($p=0.024$ inicial) y vs concentraciones mayores (5-10%, $p=0.011$-0.017 final).
- **Tendencia**: El fraguado final disminuyó progresivamente al incrementar la concentración de aditivo.

2. Resistencia a compresión

- **A 1 hora:** Los grupos modificados superaron al control ($p<0.001$), con aumento gradual según la concentración (excepto 0.5% vs 1.0%, NS).
- **A 24 horas**: Solo las concentraciones ≥5% superaron al control ($p<0.05$). La resistencia máxima se obtuvo con 10% de polvo acrílico.

3. Reproducibilidad superficial

- El control y el grupo con 0.5% mostraron la mejor calidad

(puntuación 1-2).

- Concentraciones ≥1% redujeron significativamente la nitidez (p=0.018), especialmente con 10% (puntuación 3-4).
- **Limitación**: El análisis post-hoc no detectó diferencias intergrupales claras, excepto entre 0.5% vs 10%.

Implicaciones prácticas:

- El polvo acrílico mejora la resistencia mecánica (óptimo: 10%), pero compromete el fraguado y detalle superficial.
- La concentración 0.5% ofrece equilibrio entre propiedades, siendo viable para aplicaciones que no requieran máxima precisión.
- **Validación estadística**: Todos los resultados fueron significativos ($p<0.05$) mediante ANOVA y pruebas post-hoc (Tukey).

Fuente (Ponnapalli et al., 2023)

1.6 Fundamentación (Legal, axiológica, ontológica)

1.6.1 Legal

Según el planteamiento de las Naciones Unidas (2020) el ODS 12 establece la transición hacia sistemas de producción y consumo responsables como pilar para preservar los recursos naturales y asegurar equidad intergeneracional. Su implementación busca equilibrar el desarrollo económico actual con la capacidad de carga ecológica del planeta, evitando comprometer las necesidades futuras (Naciones Unidas, 2020). Al promover eficiencia en el uso de materias primas, reducción de residuos y economías circulares, este objetivo actúa como salvaguarda contra el colapso de ecosistemas claves para la supervivencia humana, desde fuentes hídricas hasta suelos productivos.

Código Orgánico del Ambiente (COA): El "Art 233.-Aplicación de la Responsabilidad extendida Productor sobre la gestión de residuos y desechos no peligrosos, peligrosos y especiales. Los productores tienen la responsabilidad de la gestión del producto en todo el ciclo de vida del mismo. Esta responsabilidad incluye los impactos inherentes a la selección de los

materiales, del proceso de producción y el uso del producto, así como lo relativo al tratamiento o disposición final del mismo cuando se convierte en residuo o desecho luego de su vida útil o por otras circunstancias (Presidencia de la República del Ecuador, 2017).

Código Orgánico del Ambiente (COA): Art. 42.-Sistemas de gestión.- Las obligaciones establecidas en el marco de la economía circular inclusiva y responsabilidad extendida del productor, deberán cumplirse a través de un sistema de gestión que puede ser individual, colectivo o asociativo entre productores de residuos o entre productores de residuos y gestores de residuos, priorizando a las personas y/o asociaciones de recicladores de base que serán debidamente registrados (Presidencia de la República del Ecuador, 2017).

1.6.2 Axiológica

El artículo 261 de la Constitución de la República determina, entre las competencias exclusivas del Estado Central, el desarrollo de la política económica, tributaria, aduanera, arancelaria, fiscal, monetaria, comercio exterior y endeudamiento (LEY ORGÁNICA PARA EL DESARROLLO ECONÓMICO Y SOSTENIBILIDAD FISCAL, 2021).

Fomentar el uso de métodos sostenibles en la gestión de residuos impulsa una mayor conciencia ecológica y compromiso con el medioambiente. En el contexto ecuatoriano, el reciclaje ha adquirido un rol clave, no solo como estrategia para reducir el impacto ambiental, sino también como un catalizador para el progreso. Esta práctica no solo beneficia al planeta, sino que también genera oportunidades económicas y mejora la calidad de vida de las comunidades, integrando crecimiento social y sostenibilidad. Así, Ecuador demuestra que la gestión responsable de los desechos puede ser un pilar fundamental para construir un futuro más equilibrado y próspero.

El artículo titulado "Del diseño al desarrollo: el reciclaje como motor económico en Ecuador", publicado en el diario "Expreso" el 13 de marzo de

2025, aborda cómo el reciclaje se ha convertido en un impulsor del desarrollo económico y social en Ecuador. En él, Byron Bravo (2025), experto en el sector del reciclaje, destaca que transformar residuos en materia prima para nuevos productos es esencial para consolidar la economía circular en el país. Esta estrategia busca reducir la dependencia de recursos importados, generar empleo y minimizar el impacto ambiental mediante la reutilización de materiales como plástico, cartón, papel y metales. Además, el artículo subraya la importancia de integrar a los recicladores en una cadena de valor sostenible e inclusiva, promoviendo una cultura de consumo responsable y fortaleciendo iniciativas de reciclaje en diversos sectores de la sociedad.

1.6.3 Ontológica

El término *yeso* tiene su origen en la palabra griega *gypsus*, que significa "gis". Se trata de un mineral que se extrae de yacimientos mineros en diversas regiones del mundo. En su estado natural, se presenta como una roca conocida como *aljez*, la cual pasa por un proceso de deshidratación para su uso en diferentes campos. Gracias a sus propiedades, este material es ampliamente utilizado en odontología, arquitectura, escultura, pintura e incluso en aplicaciones médicas, demostrando su versatilidad y utilidad en múltiples disciplinas (Carrillo Manjarrez Sofía Gabriela, 2018)

1.7 Categorías Fundamentales

Variable Dependiente: Propiedades y aplicaciones del material en sectores productivos

Variable Independiente: Composición y procesamiento del material a base de yeso reutilizado.

1.7.1 Redes conceptuales

En la Figura 4 se identifica una red que representa conceptos clave y sus relaciones, empleada para visualizar estructuras teóricas o marcos conceptuales.

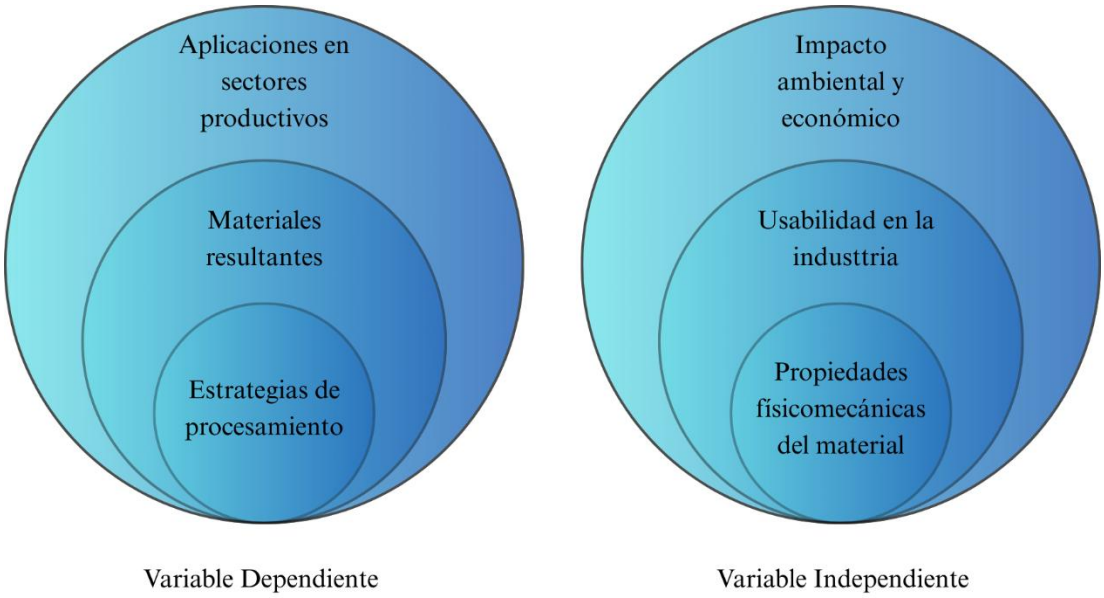


Figura 4. *Redes Conceptuales.*
Fuente: *Elaboración propia.*

1.7.2 Constelación de ideas

La Figura 5 ilustra un conjunto de ideas o factores agrupados alrededor de una variable dependiente, mostrando su influencia y conexiones dentro de un sistema de estudio.

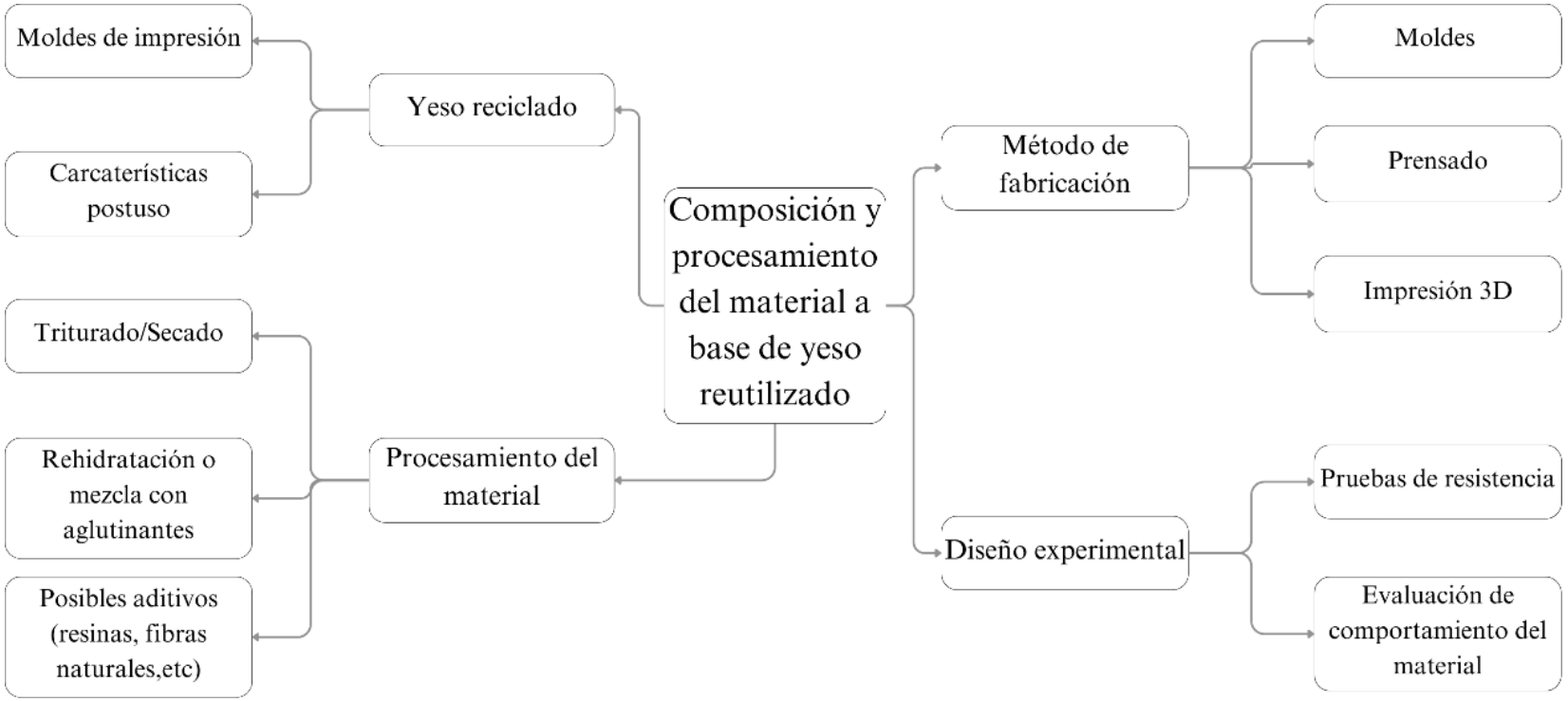


Figura 5. *Constelación de Ideas Variable Dependiente.*
Fuente: *Elaboración propia.*

La Figura 6 organiza conceptos o elementos que actúan como variables independientes, resaltando su papel causal o determinante en un modelo teórico.

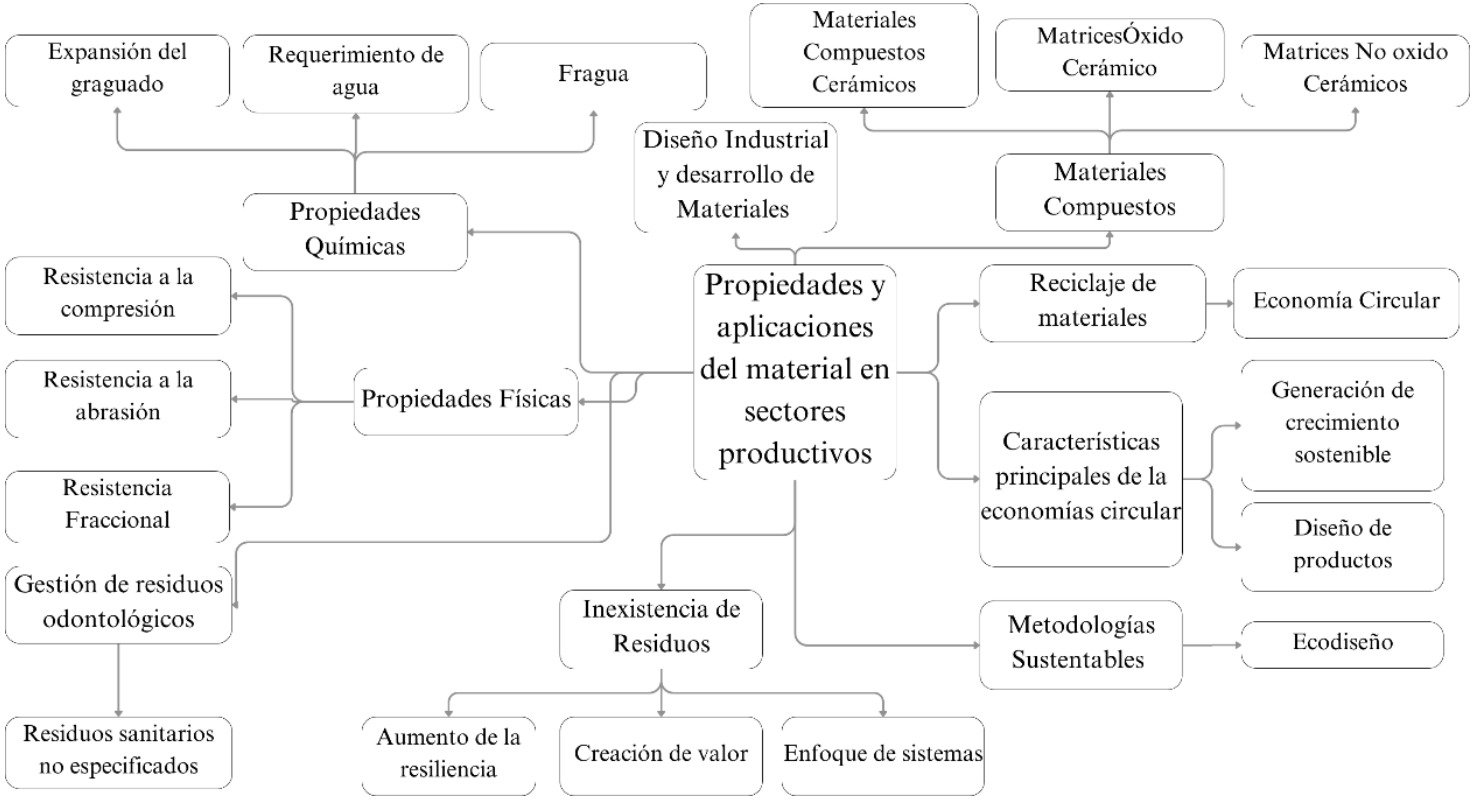


Figura 6. *Constelación de Ideas Variable Independiente.*
Fuente: *Elaboración propia.*

1.8 Bases Teóricas

El yeso es un mineral de origen natural que se extrae de yacimientos sedimentarios, donde se forma a partir de la interacción entre el ácido sulfúrico y minerales ricos en calcio, dando lugar a una roca compuesta principalmente por sulfato de calcio. Para su uso en odontología, este material se somete a un proceso de calcinación a temperaturas cercanas a los 120°C, eliminando así el agua de su estructura. Posteriormente, se mezcla con agua en proporciones controladas para lograr un fraguado óptimo, transformándose en una masa sólida de sulfato de calcio deshidratado. Este producto final, conocido como yeso dental o escayola, es ampliamente utilizado en la fabricación de modelos y prótesis debido a su precisión y facilidad de manipulación. Su obtención y preparación garantizan propiedades físicas adecuadas para aplicaciones clínicas (Joel & Velázquez, 2018).

Los yesos tipo 3, conocidos como yeso piedra para modelos, se caracterizan por su alta resistencia a la compresión y a la abrasión, propiedades esenciales para su uso en odontología. Este material es ideal para la elaboración de modelos de estudio, modelos antagonistas, estructuras para articuladores y muflas, debido a su durabilidad y precisión dimensional. Su composición y proceso de fabricación garantizan una superficie lisa y detallada, lo que lo convierte en una opción confiable para procedimientos diagnósticos y de planificación en laboratorios dentales. Además, su manipulación sencilla y su capacidad para soportar fuerzas mecánicas lo hacen indispensable en la fabricación de prótesis y dispositivos odontológicos auxiliares (Zhermack., 2024).

1.8.1 Composición y procesamiento del yeso a base de yeso reutilizado

1.8.1.1 Yeso reciclado

Moldes de impresión

Estudios sobre yesos de construcción destacan que pueden reciclarse al 100%, permitiendo reemplazar hasta el 25% del yeso natural en nuevos paneles. Además, el material reciclado tiene usos alternativos, como mejorar suelos, absorber grasas o tratar aguas. Aunque las clínicas dentales generan menos

residuos que la industria constructora, es relevante conocer que estos desechos pueden reutilizarse, reduciendo su impacto ambiental (Dentaltix, 2022).

Características post – uso

Un estudio realizado por H. Begliardo y colaboradores en Argentina (2007) reveló que el 84% del yeso dental reciclado pudo reutilizarse, mientras que el 16% restante debió descartarse debido a la presencia de contaminantes que impedían su procesamiento. Estos resultados indican que la mayor parte de este material puede recuperarse, lo que justifica la inversión en sistemas de reciclaje para su aplicación en clínicas dentales. Aunque una pequeña fracción no es reusable, el alto porcentaje de aprovechamiento demuestra que implementar estas prácticas es viable y beneficioso, tanto económicamente como para reducir el impacto ambiental. Por tanto, adoptar métodos de reciclaje de yeso en el ámbito odontológico representa una estrategia sostenible y eficiente (Walter Chaverri Carvajal, 2012).

1.8.1.2 Procesamiento del material

Triturado o secado

El procesamiento industrial del yeso natural inicia con la selección de piedras de aproximadamente 50 cm de diámetro, las cuales son sometidas a un proceso de deshidratación mediante calcinación a temperaturas entre 110°C y 140°C. Este paso elimina parcialmente el agua de cristalización, transformando el sulfato de calcio dihidratado en hemihidratado. Cabe destacar que, al incrementar la temperatura, se remueve el agua residual. Posteriormente, el material se tritura hasta alcanzar un tamaño de 4 a 5 cm y se muele para homogenizarlo (Carrillo Manjarrez Sofía Gabriela, 2018).

Rehidratación o mezcla con aglutinantes

Al mezclar el sulfato de calcio hemihidratado con agua para elaborar modelos dentales, ocurre una reacción química exotérmica (con liberación de calor), donde el hemihidratado se reconvierte en dihidratado, solidificándose la mezcla. Este proceso no solo garantiza las propiedades físicas requeridas en

aplicaciones odontológicas, sino que también evidencia la versatilidad del yeso como material reutilizable en diversos contextos industriales y clínicos (Carrillo Manjarrez Sofía Gabriela, 2018).

Aditivos

Las resinas compuestas o "composites" son materiales odontológicos versátiles compuestos por una matriz orgánica y partículas inorgánicas (relleno) unidas mediante un agente acoplante. Se emplean principalmente en restauraciones dentales, tanto en dientes anteriores como posteriores, para recuperar su función masticatoria, forma y aspecto estético. Su estructura híbrida (orgánica-inorgánica) les proporciona propiedades mecánicas y estéticas ideales para rehabilitaciones dentales (Said Rojas Pérez, 2022).

1.8.1.3 Método de fabricación

Moldes

Esta técnica consiste en crear un modelo de yeso que permite extraer las piezas dentales de forma individual, replicando su disposición natural en los alvéolos dentarios mientras se preservan los tejidos gingivales circundantes a la preparación. El método facilita el análisis y manipulación de cada diente por separado, manteniendo la relación anatómica entre las estructuras dentales y periodontales. Es particularmente útil en procedimientos protésicos y de planificación odontológica, donde se requiere visualizar la posición exacta de los dientes y su interacción con los tejidos blandos adyacentes (Lozano et al., 2023).

Prensado

Las placas de yeso se producen industrialmente mediante laminación continua de una mezcla de yeso, agua y aditivos entre láminas de cartón, cumpliendo con la Norma EN 520+A1. Se comercializan en formatos rectangulares con diversos espesores y dimensiones. Se impulsa la sostenibilidad en este proceso mediante la recolección selectiva de residuos, que son reciclados y reincorporados a la producción de nuevas placas. Este enfoque circular reduce

desechos y optimiza recursos, manteniendo los estándares de calidad en la fabricación (Gyptec, 2018).

1.8.1.4 Diseño Experimental

Pruebas de Resistencia

Resistencia a la tensión

Los yesos odontológicos para modelos presentan una resistencia a la tensión inicial de 330 lbs/in² (2.3 MPa) durante la primera hora de fraguado. Una vez completado este proceso, dicha resistencia se duplica, alcanzando valores significativamente mayores. Sin embargo, estos materiales siempre muestran menor resistencia a la tensión en comparación con su resistencia a la compresión, característica inherente a su estructura cristalina. Esta propiedad mecánica diferencia claramente el comportamiento del yeso frente a diferentes tipos de fuerzas, siendo crucial para entender su desempeño en aplicaciones clínicas donde se somete a esfuerzos mecánicos variables (Eduardo José María Carrillo Martínez, 2022).

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del yeso dental depende directamente de su densidad al fraguar. Para maximizarla, es fundamental preparar la mezcla con la mínima cantidad de agua necesaria, evitando excesos que reduzcan su concentración. Esta relación proporcional demuestra que a mayor densidad del material endurecido, mayor será su resistencia mecánica. Por tanto, la técnica de mezclado resulta crucial para optimizar las propiedades físicas del yeso en aplicaciones odontológicas, donde se requiere durabilidad y precisión dimensional (Eduardo José María Carrillo Martínez, 2022)

Evaluación del comportamiento del material

Un modelo odontológico se considera aceptable cuando mantiene su estabilidad dimensional, evitando alteraciones significativas durante el fraguado del yeso. Estas deformaciones potenciales surgen de reacciones químicas inherentes al proceso de endurecimiento, donde la formación de cristales de

dihidrato genera fuerzas internas. Específicamente, la expansión dimensional ocurre por el choque, crecimiento y empuje mutuo de estos cristales al entrelazarse durante su desarrollo. Este fenómeno físico-químico debe controlarse meticulosamente, ya que afecta directamente la precisión de los modelos dentales, siendo crucial para procedimientos restauradores que requieren exactitud milimétrica. La comprensión de este comportamiento permite seleccionar yesos con propiedades de expansión controlada adecuadas para cada aplicación clínica (Josemanuel & Solares, 2018).

1.8.2 Propiedades y aplicaciones del material

1.8.2.1 Química

El principal componente de los yesos dentales es el sulfato de calcio hemihidratado, un material que experimenta diversas transformaciones cuando se expone a temperaturas entre 20°C y 1,000°C. Sin embargo, su forma más estable se mantiene únicamente en un rango térmico más reducido, aproximadamente entre 45°C y 90°C. Fuera de este intervalo, su estructura puede alterarse, afectando sus propiedades físicas. A temperatura ambiente y en condiciones secas, el hemihidrato permanece estable, lo que permite su almacenamiento y manipulación sin degradación. Esta estabilidad es crucial para su uso en odontología, ya que garantiza la consistencia del material durante la fabricación de modelos y prótesis dentales. Su comportamiento térmico define las condiciones óptimas de procesamiento y aplicación clínica (Joel & Velázquez, 2018).

La hidratación del yeso dental puede producirse cuando sus partículas están expuestas a una atmósfera con elevada presión de vapor de agua. Entre 75°C y 105°C, ocurre una segunda transformación hacia el sulfato cálcico hexagonal alfa, una fase inestable que, por debajo de los 75°C, se rehidrata rápidamente. Al superar los 300°C, se produce un cambio estructural a una forma ortorrómbica anhidra, que es termodinámicamente estable. Estas transiciones dependen del método de calcinación empleado, el cual determina la formación de dos variedades de hemihidrato: alfa (α) y beta (β). Ambas difieren en propiedades cristalográficas, como el tamaño de los cristales, la perfección de su red cristalina

y su área superficial. Estas variaciones influyen en características clave como resistencia, porosidad y velocidad de fraguado, factores determinantes para su aplicación en odontología (Joel & Velázquez, 2018).

Fraguado

La conversión del hemihidrato en dihidrato (sulfato de calcio dihidratado) puede explicarse mediante dos teorías principales: a) teoría Gélica de Michaelis: Propone que el yeso actúa como un sistema coloidal, donde el dihidrato inicialmente se forma como una fase dispersa dentro de un gel. Posteriormente, los cristales de dihidrato crecen a partir de esta matriz coloidal y b) Teoría Cristalina de Le Chatelier: Sugiere que, al mezclarse el hemihidrato con agua, se forma una sustancia de baja solubilidad que permite el endurecimiento. Esto genera una solución sobresaturada inestable, que precipita hasta alcanzar un equilibrio estable como solución saturada, cristalizando en dihidrato (Joel & Velázquez, 2018).

La densidad aparente del polvo determina directamente la cantidad de agua necesaria para el mezclado en los distintos tipos de yesos dentales (yeso París, yeso piedra y yeso piedra mejorado), ya que esta propiedad depende de la adhesividad entre partículas que se mantiene incluso al suspender el polvo en agua. Cuando el yeso se calcina en seco, su baja densidad aparente genera partículas más porosas y ligeras que forman una suspensión floculada, requiriendo mayor cantidad de agua para lograr una consistencia manejable, mientras que los hemihidratos obtenidos mediante calcinación húmeda presentan alta densidad aparente con partículas más compactas y menos espacio interparticulado, reduciendo significativamente la demanda de agua durante el mezclado. Esta diferencia explica por qué formulaciones como el yeso piedra mejorado -que suele procesarse por métodos húmedos- necesitan proporciones agua/polvo más bajas, optimizando así su resistencia final y minimizando la porosidad del material resultante (Joel & Velázquez, 2018).

Requerimiento de agua

La densidad aparente del polvo determina los diferentes requerimientos de agua en los yesos dentales como el yeso París, yeso piedra y yeso piedra mejorado, ya que las características adhesivas de las partículas en estado seco se mantienen al suspenderse en agua. Los yesos con baja densidad aparente, producto de una calcinación en seco, forman suspensiones floculadas que requieren más agua para lograr una mezcla trabajable, mientras que los polvos de alta densidad aparente, obtenidos mediante calcinación húmeda, necesitan menos agua debido a su estructura más compacta y menor espacio interparticulado. Esta relación directa entre el método de calcinación, la densidad aparente resultante y la demanda de agua explica las diferencias en las proporciones de mezcla entre los distintos tipos de yesos dentales, afectando directamente sus propiedades finales como resistencia y porosidad (Joel & Velázquez, 2018).

La relación agua/polvo para el yeso piedra es de 0,30 a 0,33. Durante el proceso de fraguado, 100 gramos de hemihidrato requieren exactamente 18.6 gramos de agua (agua de cristalización) para completar la reacción química de transformación en dihidrato; sin embargo, en la práctica siempre se utiliza un exceso de agua que no participa en la reacción y permanece en la masa hasta su evaporación durante el secado. Este exceso de agua no combinada genera porosidad en la estructura final del yeso, un fenómeno indeseable que reduce significativamente la resistencia mecánica del material. La magnitud de este efecto varía según el tipo de yeso: es más pronunciado en el yeso París (que requiere mayor exceso de agua) que en el yeso piedra, lo que explica la notable diferencia en resistencia mecánica entre ambos materiales, siendo el yeso piedra considerablemente más resistente debido a su menor porosidad residual (Joel & Velázquez, 2018).

Expansión del fraguado

La expansión de fraguado en los yesos dentales presenta un rango variable entre 0.07% y 0.5%, mostrando una relación inversamente proporcional con la cantidad de agua utilizada en la mezcla: a mayor proporción de agua, menor será

la expansión. Por otro lado, la intensidad del espatulado influye directamente en este fenómeno, ya que un mezclado más enérgico o prolongado incrementa la expansión debido a la mayor formación de núcleos de cristalización y a la liberación de tensiones internas durante la reacción. Estos dos factores clave (relación agua/polvo y técnica de mezcla) deben controlarse cuidadosamente en la práctica clínica, ya que determinan la precisión dimensional y las propiedades mecánicas finales del yeso (Joel & Velázquez, 2018).

1.8.2.2 Propiedades Físicas

Resistencia Compresiva

La resistencia del yeso dental puede evaluarse en estado húmedo (inmediatamente después del fraguado final) o seco, presentando diferencias significativas: la resistencia húmeda equivale a aproximadamente la mitad de la resistencia seca, lo que es crítico para procedimientos como la elaboración de muflas, donde la máxima resistencia se alcanza progresivamente hasta estabilizarse a los 7 días de secado. Este comportamiento se debe a la evaporación gradual del agua residual y a la consolidación de la estructura cristalina, factores que determinan el momento óptimo para utilizar las piezas en aplicaciones clínicas (Joel & Velázquez, 2018).

Resistencia a la abrasión

La resistencia natural del yeso dental es relativamente baja, lo que limita su uso en aplicaciones que requieren mayor durabilidad. Sin embargo, esta limitación puede superarse mediante la aplicación de barnices endurecedores, que forman una película protectora sobre la superficie del yeso, mejorando significativamente sus propiedades mecánicas y resistencia a la abrasión. Estos tratamientos superficiales son particularmente útiles en procedimientos donde se necesita mayor estabilidad dimensional y durabilidad, como en la fabricación de modelos de trabajo o dispositivos protésicos temporales (Joel & Velázquez, 2018).

Resistencia fraccional

Los yesos dentales presentan dos tipos de resistencia mecánica claramente diferenciadas: resistencia húmeda (medida inmediatamente después del fraguado) y resistencia seca (evaluada tras la evaporación completa del agua residual). Estudios demuestran que la resistencia húmeda equivale a aproximadamente el 50% de la resistencia seca, debido a que el agua libre debilita los enlaces cristalinos temporales. Esta diferencia es crítica en aplicaciones clínicas, como la elaboración de muflas o modelos de trabajo, donde se recomienda esperar 24-72 horas (según el tipo de yeso) para alcanzar la máxima resistencia antes de someterlas a fuerzas mecánicas (Joel & Velázquez, 2018).

1.8.2.3 Gestión de residuos odontológicos

La gestión adecuada de residuos se ha convertido en un pilar fundamental para combatir los problemas ecológicos actuales. Una mala gestión genera contaminación multisistémica -afectando aire, agua y suelo con sustancias tóxicas- mientras contribuye al cambio climático mediante emisiones de gases de efecto invernadero, pérdida de biodiversidad y aparición de enfermedades. En el ámbito sanitario, donde las opciones de reducción son limitadas, los residuos dentales representan un riesgo particular por contener sustancias peligrosas como el mercurio (Hg) de las amalgamas, metal altamente tóxico y bioacumulativo usado históricamente en odontología. Aunque los métodos convencionales (reciclaje, incineración, vertederos) siguen vigentes, el sector dental requiere estrategias específicas debido al potencial contaminante de sus desechos. Los datos disponibles confirman que la actividad odontológica puede impactar significativamente el medio ambiente, haciendo imperativa la implementación de protocolos estrictos para minimizar la generación de residuos peligrosos y mitigar sus efectos ecológicos (Myszograj, 2023).

Tipo II: Residuos sanitarios no especificados

Los residuos biosanitarios en odontología comprenden tanto materiales biológicos procedentes de la actividad clínica (como tejidos o fluidos) como productos no biológicos que han estado en contacto con ellos o están

destinados a su eliminación. Según la clasificación de la OMS, estos desechos provenientes principalmente de pacientes no infecciosos constituyen aproximadamente el 45% del total de residuos generados en una clínica dental, requiriendo protocolos específicos de segregación (contenedores amarillos) y tratamiento para minimizar riesgos ambientales, aunque no presenten peligrosidad biológica (Viviana Cifuentes & María Mateos, 2022).

Entre ellos se puede encontrar:

- Guantes
- Mascarillas
- Servilletas babero
- Algodones
- Batas desechables
- Material desechable
- Gasas
- Modelos de yeso

Los residuos odontológicos no contaminados deben gestionarse de forma diferenciada: los materiales reciclables como papel, plástico y vidrio pueden destinarse a reciclaje previa verificación de su limpieza, mientras que el resto deben almacenarse en recipientes rígidos, semirrígidos o bolsas de un solo uso con capacidad inferior a 90 litros, que cumplan con características de resistencia a perforaciones y cargas, además de contar con cierre hermético para garantizar un manejo seguro; esta clasificación permite optimizar los procesos de reciclaje y disposición final, reduciendo significativamente el volumen de residuos que terminan en vertederos y promoviendo prácticas más sostenibles en la clínica dental (Viviana Cifuentes & María Mateos, 2022).

Investigaciones sobre yesos de construcción demuestran la viabilidad del reciclaje integral de este material, destacando técnicas que permiten reutilizar el 100% de los residuos de paneles laminados para sustituir hasta el 25% del yeso

virgen en nuevos productos. Además, el yeso reciclado tiene aplicaciones innovadoras como acondicionador de suelos, absorbente de grasas o agente depurador en tratamiento de aguas. Aunque las clínicas dentales generan volúmenes significativamente menores que la industria constructora, estos hallazgos revelan el potencial de circularidad del yeso odontológico, donde modelos descartados o sobrantes de mezcla podrían reprocesarse para usos no clínicos (ej. materiales educativos o artesanales), reduciendo así su impacto ambiental. Este conocimiento invita a explorar sistemas de recolección y reciclaje específicos para el sector dental, transformando un residuo en recurso (Viviana Cifuentes & María Mateos, 2022).

1.8.2.4 Reciclaje de Materiales

Economía Circular

El principio fundamental de la economía circular busca maximizar el valor de los materiales y productos extendiendo su vida útil, minimizando la generación de desechos y reintegrando los residuos al ciclo productivo como recursos valiosos (Deckymn, 2018; Solórzano, 2018; Ellen MacArthur Foundation, 2013). Este modelo contrasta con el enfoque lineal tradicional, promoviendo en cambio un sistema donde los "residuos" se transforman en insumos para nuevos procesos (Zaman, 2010). En el contexto odontológico, esto implica rediseñar protocolos para: 1) optimizar el uso de materiales, 2) recuperar componentes de productos descartados (como yesos, metales o plásticos), y 3) desarrollar alternativas biodegradables. La implementación de estos principios no solo reduce el impacto ambiental de la práctica dental, sino que también genera eficiencias económicas al convertir costos de disposición final en oportunidades de reutilización (Naciones Unidas, 2030).

- Meta 8.4: “Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre Modalidades

de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados" (Naciones Unidas, 2030).

• Meta 11.6:" De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo".

• Meta 12.3: "De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha" (Naciones Unidas, 2030).

• Meta 12.5: "De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización" (Naciones Unidas, 2015, págs. 22, 25 y 26) (Naciones Unidas, 2030).

La Figura 7 esquematiza el modelo de economía circular, donde flujos de materiales y energía se mantienen en ciclos cerrados, contrastando con sistemas lineales tradicionales.

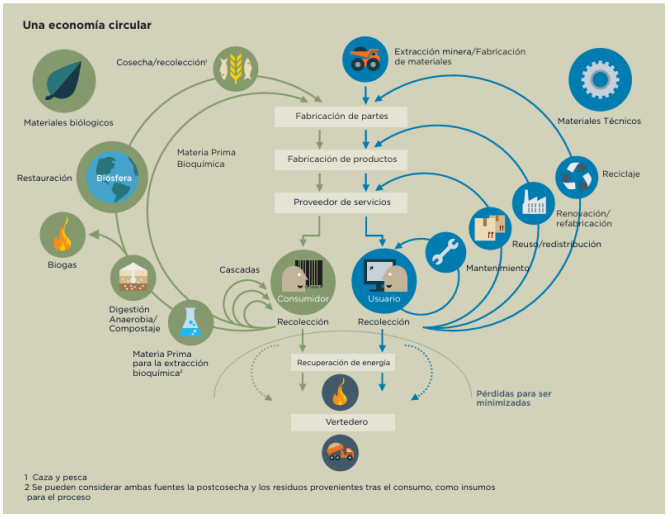


Figura 7. *Economía Circular.*
Fuente: *Tomado de (Macarthur & Ejecutivo, 2014).*

En el marco de la sostenibilidad ambiental, la economía circular (EC) surge como un modelo transformador que mitiga el impacto ecológico al reemplazar el sistema lineal tradicional (extraer-producir-desechar) por uno regenerativo. A diferencia del enfoque convencional -donde el valor culmina con el consumo-, la EC promueve: la extensión de la vida útil de los productos mediante diseño durable, la producción de bienes con ciclos prolongados, y la transición hacia modelos de servicio (como alquiler de instrumental o reciclaje profesional) (EU-LAC Kowszyk & Maher, 2018).

Los gobiernos de países desarrollados están implementando estrategias concretas para transitar hacia la economía circular (EC), redefiniendo sus patrones de consumo y relaciones con proveedores. En Europa destacan instrumentos como: la Ley de Cambio Climático y Transición Energética (UE, 2020), el Acuerdo de París, y el Plan de Acción del Pacto Verde Europeo, complementados en España con la Estrategia Española de Economía Circular (enfocada en reducción de materiales, eficiencia hídrica y gestión de residuos). Fuera de Europa, China aplica su Ley de Promoción de la EC (2008) y Reino Unido la Norma BS 8001:2017, que guía a empresas en implementación práctica (Pauliuk, 2017; Niero & Schmidt, 2018). Estas iniciativas reflejan un consenso global: la EC ya no es opcional, sino un requisito para modelos productivos sostenibles, con implicaciones directas en sectores como el odontológico, donde el uso de materiales y generación de residuos son significativos (Díaz et al., 2020).

La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENECI) representa un cambio de paradigma hacia un modelo económico sostenible y resiliente, basado en tres pilares fundamentales: la preservación del capital natural mediante el uso racional de recursos, la optimización del rendimiento de materiales a través de innovación tecnológica, y la minimización radical de residuos mediante diseños regenerativos (Ministerio de Producción, 2024). Esta hoja de ruta actúa como motor para la competitividad empresarial, transformando los desafíos ambientales en oportunidades de innovación. Sectores clave como el odontológico deben adaptar sus procesos a estos principios, implementando desde la selección de

materiales de bajo impacto hasta sistemas de recuperación de residuos clínicos, cerrando así el círculo entre salud bucal y salud.

En la Figura 8 se comparan visualmente ambos modelos: el lineal (extracción-desecho) frente al circular (reutilización-regeneración), enfatizando sus impactos ambientales y económicos.

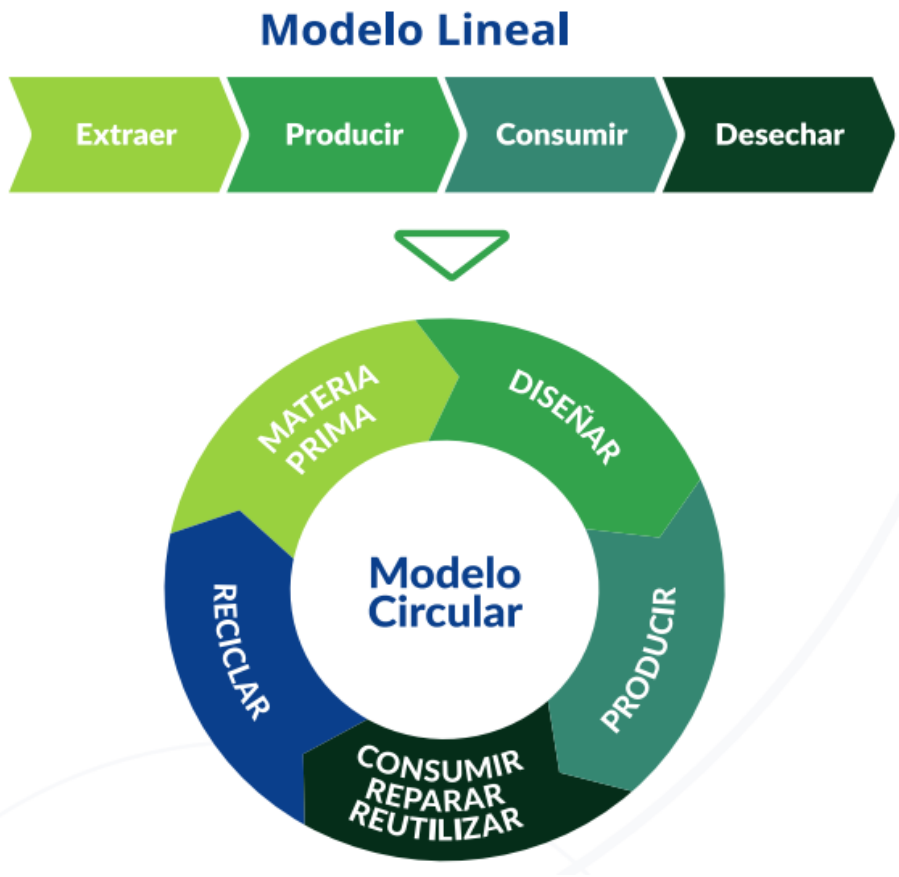


Figura 8. *Diferencias entre el modelo lineal y el modelo circular.*
Fuente: *Figura tomada de (Ministerio de Producción, 2024).*

1.8.2.5 Materiales Compuestos

Los materiales cerámicos son compuestos inorgánicos formados por elementos metálicos y no metálicos, unidos principalmente mediante enlaces iónicos o covalentes. Aunque tradicionalmente se fabricaban de manera artesanal, su uso en ingeniería se debe a su abundancia en la naturaleza y a sus propiedades

mecánicas y físicas únicas, que los diferencian notablemente de los metales (Javiera Osorio Aracena, 2020).

Los compuestos de matriz cerámica (CMC) son materiales avanzados diseñados para aplicaciones en condiciones de alta temperatura, compuestos por una matriz cerámica reforzada con fibras cortas o whiskers de carburo de silicio (SiC) o nitruro de boro (BN), que mejoran significativamente su resistencia mecánica y térmica. Estos materiales combinan la ligereza y estabilidad de las cerámicas con la tenacidad de los refuerzos, permitiendo su uso en entornos extremos (como componentes aeroespaciales o sistemas de frenado) donde los materiales convencionales fallarían, gracias a su capacidad para soportar temperaturas altas y su baja expansión térmica.

La Figura 9 presenta una taxonomía de Materiales Compuestos Cerámicos (CMC), categorizados según la composición de su matriz (óxidos, no óxidos, híbridos, etc.).

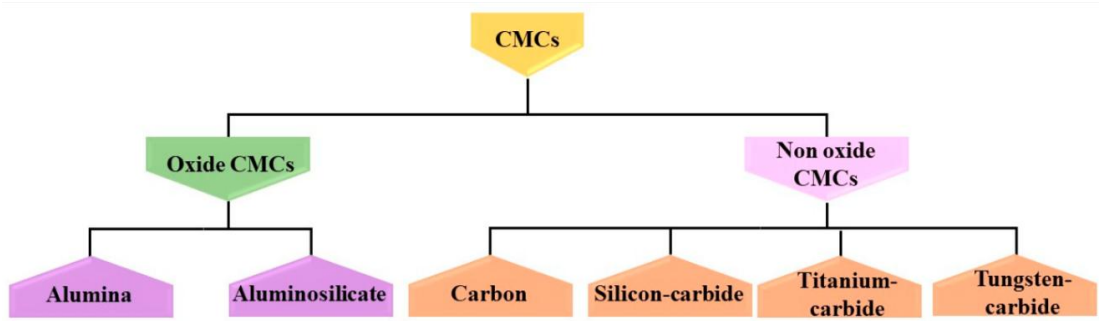


Figura 9. *Clasificación de las CMC en función de la naturaleza de la matriz.*
Fuente: *Tomado de (Rajak et al., 2024).*

La Figura 10 detalla subgrupos de CMC basados en matrices de óxidos.

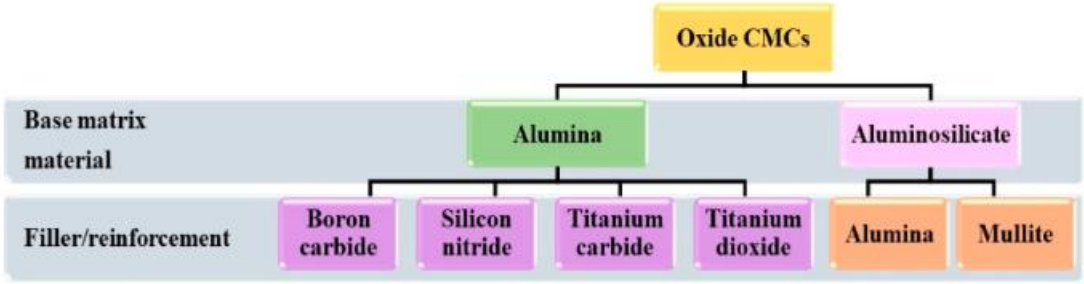


Figura 10. *Categorías de materiales O-CMC.*
Fuente: *Tomado de (Rajak et al., 2024).*

En la Figura 11 se clasifican CMC con matrices de no óxidos, utilizados en entornos de alta resistencia térmica o mecánica.

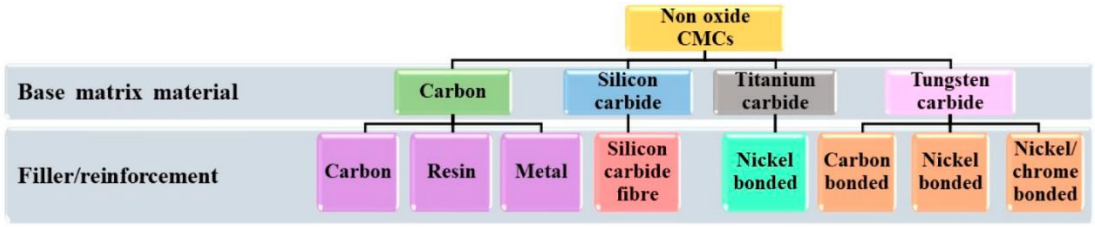


Figura 11. *Ctegorías de materiales no óxidos.*
Fuente: *Tomado de (Rajak et al., 2024).*

Los materiales compuestos con matriz cerámica superan a los cerámicos tradicionales en propiedades mecánicas, como resistencia y tenacidad, especialmente a bajas temperaturas. En estos compuestos, la matriz actúa como fase continua, funcionando como un aglutinante que, aunque suele ser flexible y de baja resistencia, distribuye los esfuerzos entre las fibras. Por otro lado, las características clave de los materiales cerámicos, como su capacidad para soportar altas temperaturas y su elevada rigidez mecánica, los convierten en una opción altamente valorada para diversos usos industriales. Estas ventajas los hacen ideales para entornos exigentes donde se requieren materiales duraderos y estables térmicamente (Marcel Fajardo Sereno Juan David Castro Lopez, 2019).

Los materiales compuestos de matriz cerámica reforzados con fibra (FRMCC) surgen como solución a las limitaciones de las cerámicas tradicionales, especialmente su fragilidad y baja resistencia a la fractura. Estos compuestos combinan una matriz cerámica con fibras de refuerzo, logrando no solo mejorar la

tenacidad sino también mantener un rendimiento estructural estable en entornos de alta temperatura. Su desarrollo se ha impulsado por la demanda de materiales con propiedades termomecánicas superiores, como resistencia al choque térmico, estabilidad química y baja densidad, características clave para aplicaciones en sectores aeroespacial, energético y de fabricación avanzada. A diferencia de las cerámicas monolíticas, los FRMCC distribuyen mejor las cargas mecánicas gracias a las fibras, reduciendo la propagación de grietas. Esta versatilidad los hace ideales para componentes expuestos a condiciones extremas, como turbinas, sistemas de frenado o escudos térmicos. Investigaciones recientes continúan optimizando su fabricación para reducir costos y ampliar su uso industrial, consolidándolos como una alternativa innovadora frente a los metales y cerámicas convencionales (Auquilla Illapa et al., 2023).

Los compuestos de yeso reforzado con fibra (FRGC) destacan por su óptimo desempeño multifuncional y gran potencial comercial en el sector de la construcción. Estos materiales no solo mejoran las propiedades mecánicas del yeso tradicional, sino que además promueven el aprovechamiento sostenible de subproductos del yeso, contribuyendo significativamente a la economía circular. Su implementación genera importantes ventajas económicas al reducir costos de producción y residuos, mientras que ambientalmente favorecen la disminución de la huella ecológica asociada a los desechos industriales. Los FRGC combinan la versatilidad del yeso con la resistencia adicional proporcionada por las fibras, resultando en un material más durable y con mejores características estructurales. Esta innovación abre nuevas posibilidades para aplicaciones en construcción sostenible, donde se requieren soluciones que equilibren rendimiento, accesibilidad y bajo impacto ambiental. Estudios recientes confirman que su adopción masiva podría transformar los estándares de la industria, posicionándolos como una alternativa ecológica y rentable frente a materiales convencionales (Jia et al., 2021).

1.8.2.6 Diseño Industrial y desarrollo de Materiales

El diseño industrial emerge como catalizador de la economía verde al integrar principios de circularidad en el desarrollo de productos, transformando radicalmente los modelos de producción tradicionales. Mediante la selección estratégica de materiales reciclados, la implementación de ecodiseño (con características como modularidad y fácil desmontaje) y la optimización de procesos para minimizar residuos, los diseñadores no solo reducen el consumo de recursos vírgenes sino que generan valor económico al convertir desechos en materias primas valiosas. Este enfoque sostenible demuestra su potencial en casos reales, donde empresas líderes alcanzan hasta un 40% de ahorro en costos materiales mientras cumplen con normativas ambientales. Más allá de los beneficios ecológicos -como la reducción de huella de carbono y la preservación de ecosistemas- este paradigma abre nuevos mercados sostenibles y fomenta un consumo responsable, posicionando al diseño industrial como herramienta clave para equilibrar progreso económico con regeneración ambiental, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Yousif & Moalosi, 2024).

Aunque los diseñadores industriales desarrollan diversas competencias profesionales, muchos comparten una limitación formativa: el conocimiento insuficiente sobre materiales y sus procesos de transformación. Esta brecha se vuelve crítica en pequeñas y medianas empresas, donde, por costumbre o restricciones económicas, los diseñadores asumen funciones de producción sin contar con el apoyo de ingenieros especializados. Esta dinámica laboral genera dos problemas clave: primero, conduce a decisiones técnicas improvisadas durante el desarrollo de productos, aumentando riesgos de fracaso; segundo, limita las oportunidades de innovación al carecer de sinergias entre diseño e ingeniería. La falta de colaboración interdisciplinaria no solo afecta la calidad técnica de los resultados, sino que perpetúa modelos productivos tradicionales, reduciendo la competitividad empresarial en mercados donde la innovación material y tecnológica marca la diferencia (González Madariaga & Francisco Gómez Gómez, 2020).

1.8.2.7 Metodologías Sustentables

El Eco-diseño

La economía circular bebe de diversas corrientes intelectuales que emergieron con fuerza tras los años 70, cuando la comunidad global despertó ante la crisis ambiental. Figuras como Benyus (1997) con su biomímesis -copiar los ciclos perfectos de la naturaleza- o McDonough y Braungart (2003) con su visión "de la cuna a la cuna" donde los materiales fluyen como nutrientes, sentaron las bases. Analizando casos como el distrito eco-industrial de Kalundborg (Dinamarca), se ha visto cómo estas teorías se materializan: fábricas que intercambian desechos como si fueran un ecosistema, tal como propuso la ecología industrial (Lifset y Graedel, 2001). Hoy, la economía circular sintetiza estas ideas en un marco práctico que prioriza: 1) Diseñar sin residuos desde el primer boceto, 2) Mantener materiales en uso mediante reparación y remanufactura (como hace Patagonia con sus prendas), y 3) Regenerar sistemas naturales. El reto actual -como demostró el proyecto "Loop" de TerraCycle- es escalar estos principios sin perder su esencia sistémica (Nicolás Capricho Marocci (CTplas) et al., 2021).

El diseño sustentable comienza desde la concepción misma del producto, priorizando la conservación de los recursos naturales mediante estrategias que extienden su ciclo de vida. Esto implica una cuidadosa selección de materias primas ecológicas -como los biopolímeros o metales reciclados- y la reestructuración de cada etapa del proceso: desde métodos de fabricación con menor consumo energético (ej: impresión 3D con residuos industriales) hasta sistemas de distribución optimizados que reducen la huella de carbono. En la fase de uso, productos como los muebles modulares de la empresa Y demuestran cómo el diseño inteligente puede adaptarse a múltiples necesidades sin obsolescencia programada. El verdadero reto está en el fin de vida útil: técnicas como el upcycling transforman desechos en nuevos productos, cerrando el círculo ecológico (Arroyo González, 2024).

La Figura 12 representa un marco gráfico que integra interacciones de un enfoque holístico para resolver problemas complejos.

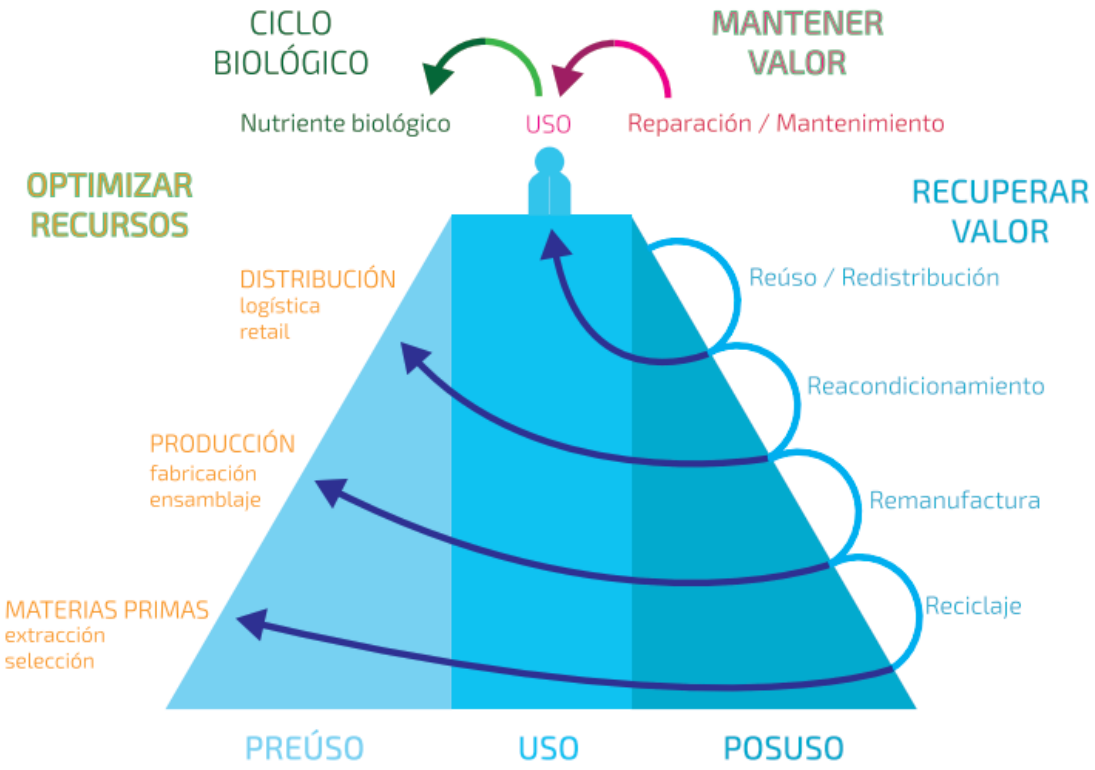


Figura 12. *Pensamiento sistémico.*
Fuente: *Tomado de (Nicolás Capricho Marocci (CTplas) et al., 2021).*

1.8.2.8 Características principales de la economía circular

Generación de crecimiento sostenible

Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos (Naciones Unidas, 2030).

Diseño de productos

Meta 8.4: Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco

Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados (Naciones Unidas, 2030).

1.8.2.9 Inexistencia de residuos

Aumento de la resiliencia

El concepto de resiliencia ambiental plantea una paradoja fascinante que se ha observado en ecosistemas como los manglares del Caribe: por un lado, nos exige minimizar amenazas como la deforestación costera que podrían quebrar el frágil equilibrio ecológico; pero simultáneamente, nos revela la asombrosa capacidad de estos sistemas para absorber impactos y reorganizarse. Holling (1973) lo demostró con los bosques boreales: no es que simplemente "resistan" los incendios, sino que los incorporan como parte de su ciclo natural. En comunidades afectadas por huracanes, se ha comprobado cómo esta dualidad aplica también a sistemas humanos los pescadores que adaptan sus calendarios a temporadas de tormentas más intensas son prueba viviente. La verdadera lección está en entender que la resiliencia no es pasiva: requiere nuestra intervención para reducir riesgos, pero también humildad para aprender de cómo la naturaleza ha gestionado perturbaciones por milenios (Antonio Fortes Martín, 2019).

Enfoque de sistemas

La noción de sistemas socioecológicos ha ganado relevancia en el ámbito científico, empleándose para enfatizar la estrecha relación entre los sistemas naturales y humanos (Berrouet et al., 2018; Rincón-Ruiz et al., 2014). Esta interacción se caracteriza por retroalimentaciones mutuas, interdependencias y dinámicas espacio-temporales, como la oferta de servicios ecosistémicos, la vulnerabilidad (Berrouet, Machado & Villegas-Palacio, 2018), y el manejo del suelo (Díaz et al., 2011), entre otros aspectos. Así, los sistemas socioecológicos son concebidos como entidades complejas y adaptativas donde convergen factores culturales, políticos, sociales, económicos, ecológicos y tecnológicos (Bardsley & Wiseman, 2016; Kopperoinen et al., 2017), los cuales interactúan constantemente (MinAmbiente, 2010). Este enfoque brinda una perspectiva holística para abordar problemáticas ambientales, como la gestión de ecosistemas, el agua o la

gobernanza, y sirve como puente entre las ciencias naturales y sociales (Ortiz, Masera & Fuentes, 2014; Rembao, 1948). En este sentido, el concepto de sistemas socioecológicos podría facilitar la integración de diversas disciplinas, trascender enfoques reduccionistas y fortalecer el desarrollo de las ciencias ambientales (Cerón Hernández et al., 2019).

La Figura 13 modela la interacción dinámica entre sistemas sociales y ecológicos en el contexto de sostenibilidad.

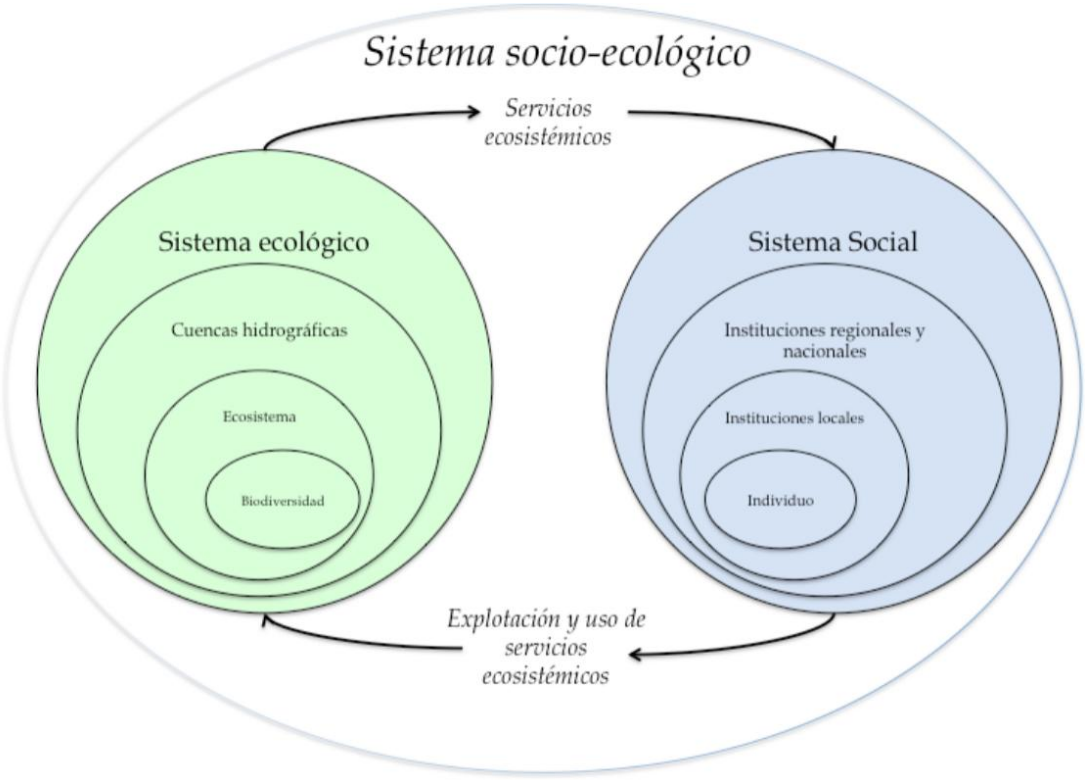


Figura 13. *Sistema socioecológico.*
Fuente: *Tomado de (Cerón Hernández et al., 2019).*

Creación de valor

El incremento en la preferencia por productos sostenibles está generando oportunidades comerciales innovadoras, al mismo tiempo que exige a las organizaciones adoptar prácticas de gestión integralmente responsables, con especial énfasis en los ámbitos social y ecológico.

En el contexto empresarial contemporáneo, las organizaciones enfrentan la necesidad imperante de transformar sus modelos de generación de valor, integrando principios de sostenibilidad como eje fundamental de sus operaciones. Esta evolución conceptual ha dado lugar al paradigma de "valor sostenible", que sintetiza la búsqueda de rentabilidad económica con el impacto social positivo y la preservación ambiental (González et al., 2020).

Guzmán-Vásquez y Trujillo-Dávila (2008) definen la creación de valor social como un proceso orientado a mejorar la calidad de vida de las personas, el cual puede materializarse mediante la mitigación de impactos negativos derivados de la producción de bienes y servicios, como la generación de residuos sólidos. Este enfoque se alinea con las prácticas de responsabilidad social corporativa, donde las empresas asumen un rol activo en la solución de problemáticas socioambientales. Al abordar estos efectos secundarios no deseados, las organizaciones no solo reducen su huella ecológica, sino que también contribuyen al bienestar colectivo, integrando así criterios de sostenibilidad en sus operaciones. De esta manera, la creación de valor social trasciende el ámbito económico, vinculándose estrechamente con el desarrollo comunitario y la gestión responsable de recursos, aspectos fundamentales en el contexto actual de responsabilidad empresarial (María Arroyave-Puerta et al., 2019).

En la Figura 14 se desglosan las actividades primarias y de apoyo de la cadena de valor según Porter, analizando fuentes de ventaja competitiva.

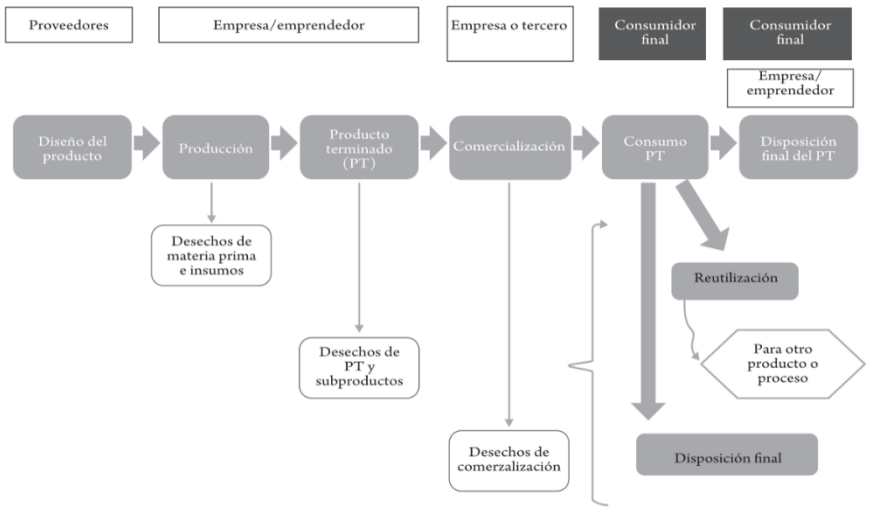


Figura 14. *Cadena de valor con base en la cadena de Porter.*
Fuente: *Tomado de (María Arroyave-Puerta et al., 2019).*

Cradle to Cradle

McDonough y Braungart encuentran en la bioesfera el modelo perfecto para un diseño verdaderamente sostenible. Su propuesta, aparentemente simple pero radical, insta a seguir los principios de la naturaleza como guía para transformar los sistemas productivos actuales. Este documento recoge sus pioneros avances, demostrando que su visión ambiciosa -lejos de ser utópica- ya se materializa mediante alianzas con corporaciones innovadoras como Ford, Nike y SC Johnson. Los resultados tangibles confirman que esta revolución industrial ecológica es posible y está en marcha. El objetivo final, como señalan los autores con elocuencia, consiste en crear un sistema regenerativo impulsado por energías limpias, donde los productos no solo sean seguros y saludables, sino que también circulen en ciclos económicos justos, ecológicamente armónicos y estéticamente valiosos. Más que una teoría, este enfoque representa un cambio de paradigma operativo que ya está transformando prácticas empresariales líderes (William McDonough & Michael Braungart, 2005).

Un análisis de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) revela que 66 de las 169 metas establecidas (equivalente al 39%) presentan vinculación con los principios de ecoefectividad propios del paradigma Cradle to Cradle (C2C), particularmente en lo concerniente a diseño, producción y consumo sustentables.

Lo más significativo es que, en más del 60% de estos casos, las metas muestran alineación simultánea con múltiples criterios C2C, demostrando una convergencia notable entre ambos marcos conceptuales. Esta interrelación sugiere que la implementación de los ODS podría beneficiarse sustancialmente de la aplicación de estrategias circulares basadas en la filosofía C2C, especialmente en aquellas metas que abordan sistemas de producción, gestión de recursos y patrones de consumo. Los datos evidencian que los principios de regeneración continua y diseño limpio inherentes al C2C tienen un amplio potencial para acelerar el cumplimiento de una proporción considerable de los objetivos globales de desarrollo sostenible (Cadenas, 2019).

La Figura 15 ejemplifica el principio de diseño regenerativo "de la cuna a la cuna" (C2C), donde los productos siguen ciclos biológicos o técnicos sin generar residuos.

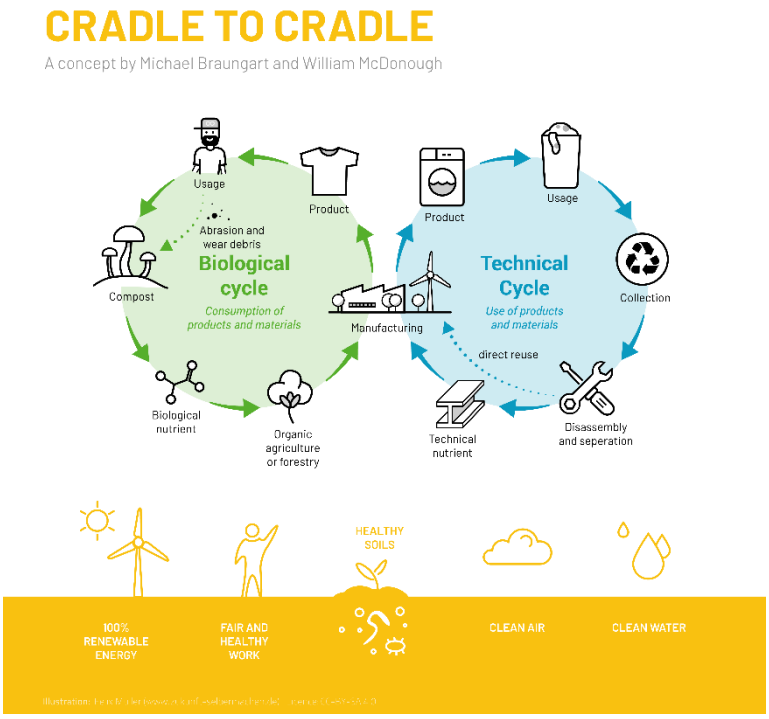


Figura 15. *Cradle to Cradle.*
Fuente: *Tomado de (Felix Joerg Mueller, 2022).*

Normativas

- "ASTM D430 Métodos de ensayo para el deterioro del cauchoFatiga dinámica" (Advancing Standards Transforming Markets, 2018).

- "ASTM D638 Método de ensayo de las propiedades de tracción de los plásticos" (Advancing Standards Transforming Markets, 2014).

- "ASTM D5420 Método de ensayo estándar para la resistencia al impacto de una probeta de plástico rígida plana por medio de un percutor impactado por la caída de un peso (Advancing Standards Transforming Markets, 2021).

1.9 Formulación de Hipótesis

El desarrollo de un material a partir de yeso reutilizado de moldes de impresión odontológica permitirá obtener propiedades físico–mecánicas aceptables mediante procesos de recuperación eficientes, haciendo viable su aplicación en sectores productivos.

1.10 Señalamiento de Variables

1.10.1 Variable Dependiente

Propiedades y aplicaciones del material en sectores productivos

1.10.2 Variable Independiente

Composición y procesamiento del material a base de yeso reutilizado

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Método

2.1.1 Enfoque de la investigación

La investigación cuantitativa recibe este nombre porque se centra en fenómenos medibles, empleando técnicas estadísticas para analizar los datos obtenidos. Su principal objetivo es describir, explicar, predecir y controlar de manera objetiva las causas de dichos fenómenos, así como anticipar su ocurrencia mediante el análisis de sus factores subyacentes. Esta metodología basa sus conclusiones en una rigurosa cuantificación, abarcando desde la recolección de datos hasta su procesamiento, análisis e interpretación. Para ello, sigue el método hipotético-deductivo, que garantiza un enfoque sistemático y verificable. Al priorizar la métrica y la objetividad, este enfoque permite resultados precisos y generalizables, sustentados en evidencias numéricas. Así, la investigación cuantitativa se distingue por su capacidad de transformar observaciones en datos estructurados, facilitando la identificación de patrones y relaciones causales mediante herramientas estadísticas (Anselmo et al., 2019).

El enfoque cuantitativo se fundamenta en este estudio al permitir la medición y análisis objetivo de las propiedades físicas y mecánicas del yeso reciclado, así como su viabilidad en aplicaciones industriales. Mediante técnicas estadísticas, se evaluarán variables como resistencia, durabilidad, porosidad y tiempo de fraguado, comparando los resultados con estándares de calidad. El método hipotético-deductivo permitirá formular y contrastar hipótesis, asegurando conclusiones basadas en datos empíricos. De esta manera, este enfoque garantizará precisión en la caracterización del material y su potencial integración en sectores productivos, sustentando decisiones técnicas con evidencia cuantificable.

2.1.2 Modalidad Básica de la Investigación

2.1.2.1 Investigación Experimental

La investigación experimental se distingue por manipular de forma controlada una variable clave (independiente) para analizar cómo influye en otra variable de interés (dependiente), permitiendo establecer relaciones causales entre ambos elementos mediante la observación sistemática de los efectos producidos. (Ramos-Galarza, 2021).

A partir de la investigación experimental se puede conocer el potencial del yeso reciclado mediante pruebas técnicas que evalúan su comportamiento y así llevarlo a otra industria. Se realizan ensayos de resistencia, durabilidad y adaptabilidad. El proceso incluye: caracterización físico-mecánica del yeso recuperado de moldes odontológicos, diseño de mezclas optimizadas, y validación en aplicaciones. Los datos cuantitativos obtenidos analizados estadísticamente permitirán determinar su viabilidad técnica, económica y ambiental, destacando cómo este residuo puede transformarse en un recurso valioso para la economía circular en entornos urbanos.

2.1.3 Nivel o Tipo de Investigación

El nivel de investigación a realizarse será correlacional.

El alcance correlacional busca analizar la relación o grado de asociación entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra específica. Su objetivo es identificar patrones, correlaciones o dependencias que permitan comprender mejor su interacción dentro de un contexto determinado, aportando insights valiosos para la investigación (Gómez Chipana, 2020).

Este estudio incluirá pruebas experimentales para desarrollar y validar el nuevo material a base de yeso reciclado.

2.2 Población y Muestra

2.2.1 Población

Los elementos accesibles o unidades de análisis son aquellos componentes específicos del campo de estudio que pueden ser investigados dentro del contexto particular donde se realiza la investigación (Ojeda, 2020).

La población objetivo se compone de un grupo estratégico para la recolección de datos:

Centros odontológicos

Incluye clínicas dentales privadas y consultorios independientes que generan desechos peligrosos (amalgamas, residuos biológicos, etc.). Según registros en Ambato existen aproximadamente 450 centros registrados, los cuales operan bajo normativas de gestión de residuos.

2.2.2 Muestra

Nos apoyamos en un grupo necesariamente reducido de sujetos que hemos analizado y vivido directamente, para generalizarlos a un conjunto más amplio. Sin embargo, esta restricción que nos obliga a depender tanto de nuestra experiencia limitada como del conocimiento acumulado por otros puede generar errores y ser susceptible de manipulación (Albert Padró-Solanet i Grau, 2020).

Dada la naturaleza del estudio, se optó por un muestreo no probabilístico por conveniencia, accediendo a sujetos disponibles y que cumplan los criterios.

2.2.2.1 Muestreo no probabilístico

Este método genera muestras donde no todos los individuos tienen igual oportunidad de participación, debido a que las exigencias técnicas y financieras del estudio hacen inviable aplicar estrategias de muestreo probabilístico (Toledo et al., 2023).

Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia dada la limitada disponibilidad de profesionales en el área dispuestos a colaborar. Esta técnica facilitó el acceso a información real bajo condiciones específicas, aunque con limitaciones en la representatividad de la muestra.

Si bien el muestreo no permite inferencias estadísticas amplias, se seleccionaron profesionales con amplio conocimiento en yeso e impresión de moldes para asegurar cierta validez en los datos. Esto ayudó a mantener una relación relevante entre la muestra y el objetivo de estudio.

2.2.2.2 Estratificación

La muestra se diversificó según:

- Centros Odontológicos: Visitas in situ para validar su participación.

- Se optó por una estratificación del material recolectado en función del número de ciclos de uso del yeso (una vez usado, dos veces usado, tres veces usado), ya que se presume que las propiedades físico-mecánicas varían significativamente con el número de reutilizaciones.

- A cada estrato se le aplicó el mismo procedimiento de calcinación, mezcla y ensayo de tracción, con el fin de identificar cómo la reutilización afecta el desempeño del material.

2.3 Operacionalización de Variables

La **Tabla 7** muestra la operacionalización de la variable independiente, definiendo sus dimensiones e indicadores para garantizar su medición precisa y su manipulación controlada en el estudio.

Tabla 7. *Variable Independiente*

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Instrumentos
La composición y procesamiento del material a base de yeso reutilizado hace referencia al conjunto de técnicas, proporciones, métodos y tratamientos aplicados al yeso previamente utilizado principalmente proveniente de moldes odontológicos con el fin de transformarlo en un material útil para nuevas aplicaciones productivas.	• Composición del material. • Procesamiento del material. • Condiciones de procesamiento	• Porcentaje de yeso reutilizado. • Técnicas empleadas para la limpieza y triturado del yeso. • Método de mezcla y moldeado. • Temperatura y tiempo de procesamiento.	¿Qué porcentaje del material base proviene de yeso reutilizado? ¿Qué procesos se emplearon para preparar el yeso recuperado antes de su reutilización? ¿Qué tipo de mezcla y herramientas fueron utilizadas durante la producción del nuevo material? ¿Cuáles fueron las condiciones ambientales controladas durante el proceso de curado? ¿Cuánto tiempo toma procesar el material desde su recolección hasta su producto final?	Ensayos de laboratorio Observación directa, registro fotográfico del proceso, guía de procedimientos. Bitácora de procesos.

La **Tabla 8** ejemplifica la operacionalización de la variable dependiente, estableciendo los criterios de medición y los instrumentos utilizados para evaluar su comportamiento en función de la variable independiente.

Tabla 8. *Dependiente*

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Instrumentos
Las propiedades y aplicaciones del material en sectores productivos se refieren al conjunto de características técnicas, funcionales, estéticas y económicas que hacen viable la incorporación del nuevo material desarrollado a base de yeso reutilizado dentro de procesos productivos reales.	• Propiedades físicas y mecánicas del material.	• Resistencia a la compresión.	¿Cuál es el nivel de resistencia que presenta el material frente a cargas de compresión?	Ensayos de laboratorio.
	• Aplicabilidad en sectores productivos.	• Compatibilidad con técnicas de manufactura existentes. • Sectores potenciales de la aplicación.	¿Puede el material ser trabajado con herramientas y técnicas convencionales? ¿En qué áreas o productos específicos puede utilizarse este material con eficiencia?	Matriz de análisis de aplicaciones.
	• Viabilidad funcional y económica.	• Costo de producción por unidad de material. • Impacto ambiental comparado con materiales convencionales.	Cuál es el costo estimado para producir 1 kg/m² de material reutilizado? ¿Qué ventajas ambientales tiene este material frente a otros disponibles en el mercado?	Análisis comparativo de costos, evaluación ciclo de vida.

2.4 Técnicas de recolección de Datos

2.4.1 Recolección de muestras de yeso descartado

La recolección de muestras de yeso odontológico descartado se realiza bajo condiciones controladas para garantizar la reutilización. Se seleccionan fragmentos de modelos dentales tipo III, libres de impurezas, y se trituran hasta obtener un polvo homogéneo. Las muestras se desinfectan superficialmente si es necesario, se secan en un horno y se tamizan para uniformizar el tamaño de partícula. Se almacenan en recipientes estériles, identificando lote y fecha. Este método permite evaluar propiedades físicas y posibles reutilizaciones en condiciones experimentales estandarizadas.

2.4.2 Procesamiento de material

El procesamiento de un material se refiere a los procesos que convierten un material inicial en un producto útil, modificando su forma o mejorando sus propiedades físicas o mecánicas para un fin específico. Estas transformaciones pueden incluir cambios en la estructura, resistencia, durabilidad u otras características, adaptando el material a aplicaciones concretas (Salán Ballesteros, 2005).

La calcinación se realizó en un horno tipo mufla a 150 °C durante 4 horas, basándose en estudios previos que identifican esta temperatura como adecuada para eliminar la humedad sin descomponer el sulfato de calcio. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 12 horas en un recipiente sellado para evitar la absorción de humedad del ambiente.

"Para evitar variaciones en la calcinación, todas las muestras se colocaron en el mismo punto del horno y en lotes de igual tamaño, minimizando así las fluctuaciones térmicas internas.

La Tabla 9 muestra el proceso a seguir para la recuperación artesanal del yeso tipo III mediante calcinación controlada.

Tabla 9. *Recuperación artesanal del yeso odontológico tipo III mediante calcinación controlada.*

Recuperación artesanal del yeso odontológico tipo III mediante calcinación controlada.

Etapa	Descripción	Parámetros	Imágenes
Recolección	Selección y limpieza de piezas de modelos dentales.	Eliminar contaminantes.	
Triturado	Reducción de tamaño <1cm.	Mecánico / Manual.	
Secado	Eliminación de humedad libre.	110°C x 2h.	
Calcinación	Conversión a hemihidrato.	140 – 160°C x 4h.	

Enfriado	Prevención de rehidratación.	En horno cerrado.	
Molido	Reducción a polvo fino.	Mortero / Molino.	
Tamizado	Homogeneización granulométrica.	Tamiz fino.	

2.4.3 Ensayos de laboratorio

Un laboratorio de ensayos es un espacio equipado para analizar las propiedades de productos y materiales, requiriendo condiciones ambientales controladas, equipos especializados y personal calificado, cuyo objetivo principal es verificar el cumplimiento de normas y especificaciones mediante pruebas físicas, químicas o mecánicas; estos laboratorios se clasifican en tres tipos principales: de calibración (que aseguran la precisión de instrumentos mediante patrones trazables al SI y requieren acreditación), de investigación (enfocados en el desarrollo de nuevos materiales) y de verificación y control (que supervisan la calidad en todas las etapas productivas, desde materias primas hasta el producto terminado

2.4.4 Entrevista semiestructurada

La entrevista semiestructurada se presenta como una herramienta pertinente para analizar la percepción de valores sociales fundamentales en la vida. Además, resulta especialmente útil cuando el objetivo es explorar y comprender las actitudes, juicios, percepciones y expectativas de los actores sociales bajo estudio. Su flexibilidad permite profundizar en las respuestas de los participantes, facilitando un acercamiento cualitativo que enriquece la comprensión de sus perspectivas. Al combinar preguntas guiadas con la libertad de expresión, este método se adapta a contextos diversos, proporcionando datos valiosos para investigaciones centradas en el comportamiento y las representaciones sociales (Babativa et al., 2024).

La Tabla 10 ilustra el proceso de una entrevista semiestructurada, donde se combinan preguntas predefinidas con flexibilidad para profundizar en respuestas clave, permitiendo una recolección de datos cualitativos.

Tabla 10. *Entrevista Semiestructurada.*

Universidad Técnica de Ambato Facultad de Diseño y Arquitectura Diseño Industrial	
Nombre del Proyecto:	Desarrollo de un material a base de yeso reutilizado de moldes de impresión odontológica para aplicaciones en sectores productivos.
Tipo de instrumento:	Guía de entrevista semiestructurada
Objetivo:	Recabar información cualitativa sobre el manejo, percepción y disposición del residuo de yeso utilizado en moldes de impresión odontológica, con miras a su posible reutilización en la elaboración de materiales productivos.
Dirigido a:	Odontólogos/as, técnicos dentales, auxiliares o personal administrativo responsable del manejo de residuos
Datos del informante	

Nombre del informante:

Cargo o función:

Institución o clínica:

Fecha:

Entrevistador:

Guía de preguntas

---

1. ¿Qué tipos de yeso odontológico utiliza en su práctica profesional y con qué frecuencia?

2. ¿Cuál es el protocolo habitual para el descarte de moldes de impresión una vez utilizados?

3. ¿Existe en su institución un sistema de gestión de residuos específicos para este material?

4. ¿Conoce alguna normativa nacional o local relacionada con el manejo de residuos de yeso?

5. Desde su perspectiva, ¿considera viable la reutilización de este material con fines productivos?

6. ¿Qué tipo de aplicaciones cree que podría desarrollarse a partir de este material reutilizado?

7. ¿Qué ventajas o beneficios considera que tendría un proyecto de este tipo para el sector odontológico y para el ambiente?

8. ¿Qué limitaciones técnicas, éticas o sanitarias visualizaría en el proceso de reutilización del yeso descartado?

9. Estaría dispuesto/a a colaborar con investigaciones relacionadas con la valorización de este tipo de residuos?

La Tabla 11 representa la metodología de triangulación de datos, integrando para validar la consistencia y confiabilidad de los resultados.

Tabla 11. *Triangulación de datos.*

Categoría de análisis	Hallazgos comunes y divergentes	Triangulación
Tipo y uso del yeso	Todos los entrevistados confirmaron el uso frecuente de yeso tipo III, y algunos también emplean yeso tipo IV en procedimientos específicos.	Coincidencia
Manejo de residuos	• Se evidenció una coincidencia total en cuanto al descarte del yeso. • Todos los profesionales lo depositan en contenedores comunes, sin ningún tipo de clasificación.	Coincidencia
Conocimientos de normativas	Los entrevistados desconocen la existencia de normativas específicas para el manejo y disposición de residuos de yeso odontológico, lo cual revela una brecha normativa.	Coincidencia
Opinión sobre la reutilización	Las posturas son diversas: un entrevistado considera viable la reutilización siempre que no comprometa la salud; otro la percibe como difícil implementar, y el tercero se muestra accesible si se logra validar su seguridad y utilidad.	Divergencia
Aplicaciones posibles	Se sugieren diferentes usos potenciales para el material reciclado, entre ellos: elementos decorativos, baldosas, macetas y soportes livianos, lo que demuestra un nivel moderado de apertura hacia nuevas aplicaciones.	Coincidencia parcial
Disposición a colaborar	Se constató una predisposición unánime de los entrevistados a colaborar en futuras fases del proyecto, especialmente en lo relacionado con el suministro del material residual.	Coincidencia

2.4.5 Registro de datos experimentales

El registro de datos experimentales constituye un proceso esencial en la investigación científica, donde se documentan metódicamente todas las observaciones y mediciones obtenidas durante un estudio. Esta práctica garantiza la trazabilidad, validez y posibilidad de replicación de los resultados. El procedimiento sigue un protocolo estructurado que comprende: verificación inicial de los instrumentos de medición para identificar posibles errores sistemáticos, recopilación organizada de datos en formatos adecuados, procesamiento numérico de las mediciones, interpretación crítica de los hallazgos, y en caso necesario, repetición de experimentos cuando los datos no alcancen los criterios de calidad establecidos (Fernando & Mejía, 2009).

La **Tabla 12** presenta los datos experimentales obtenidos durante el fraguado de yeso reprocesado, mostrando variaciones en tiempos de endurecimiento y resistencia inicial en función de distintos tratamientos.

Tabla 12. *Datos experimentales del fraguado de yeso reprocesado*

Código de muestra	Fecha del ensayo	Composición del material	Tipo de ensayo realizado	Observaciones cualitativas
YR-01	24/04/2025	100% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (10 min)	No fraguo
YR-02	24/04/2025	40% yeso nuevo/ 60% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (10 min)	No fraguo
YR-03	24/04/2025	50% yeso nuevo/ 50% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (10 min)	No fraguo
YR-04	24/04/2025	60% yeso nuevo/ 40% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (10 min)	Bajo fraguado
YR-05	01/05/2025	70% yeso nuevo/ 30% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (10 min)	Fraguado medio
YR-06	01/05/2025	80% yeso nuevo/ 20% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (10 min)	Fraguado
YR-07	01/05/2025	75% yeso nuevo/ 25% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (10 min)	Fraguado considerable
YR-08	01/05/2025	100% yeso reciclado	Tiempo de fraguado (5 días)	Fraguado

El reproceso del yeso odontológico tipo III alteró su estructura cristalina, afectando su tiempo de fraguado. La exposición a humedad o calor durante el reciclaje pudo deshidratar parcialmente el yeso, retrasando la rehidratación y formación de cristales de dihidrato. Esto explica que no fraguara en el tiempo estándar, pero sí posteriormente, debido a una reacción lenta e incompleta. El material perdió propiedades por la degradación de sus componentes durante la reprocesamiento.

El material compuesto (resina + fibra de vidrio + yeso tipo III reprocesado) se diseñó para compensar las fallas del yeso reciclado, que fraguaba lentamente y perdía resistencia. La resina polimérica aporta cohesión y estabilidad (Juan Esteban Vásquez Marín, 2024), la fibra de vidrio mejora la tenacidad y evita fracturas(M. Herráez et al., 2016), mientras que el yeso reprocesado reduce costos y residuos, aprovechando sus propiedades remanentes.

2.5 Material Compuesto

2.5.1 Resina

Se empleó resina polimérica en una concentración del 40%.

2.5.2 Fibra de Vidrio

Se utilizó fibra de vidrio en una proporción del 30% dentro de la mezcla para reforzar el material compuesto

2.5.3 Yeso odontológico reutilizado

Se incorporó yeso odontológico en una proporción del 30% mejorando la resistencia del compuesto final.

2.5.4 Probetas

La Tabla 13 enumera las normas técnicas (ASTM) y los ensayos estandarizados aplicados en el estudio, garantizando la validez de los resultados obtenidos.

Tabla 13. *Normas y ensayos a realizar*

Probeta	Ensayo	Norma de Referencia	Forma o Dimensiones	Responsable del ensayo
1	Impacto	ASTM D5420	Figura 16	Jonathan
2	Tracción	ASTM D638	Figura 17	Jonathan
3	Fatiga flexionante	ASTM D430	Figura 18	Christian Pérez

La Figura 16 exhibe una probeta estándar utilizada en pruebas de impacto, diseñada para evaluar la resistencia a fractura bajo carga dinámica y energía absorbida durante el choque.

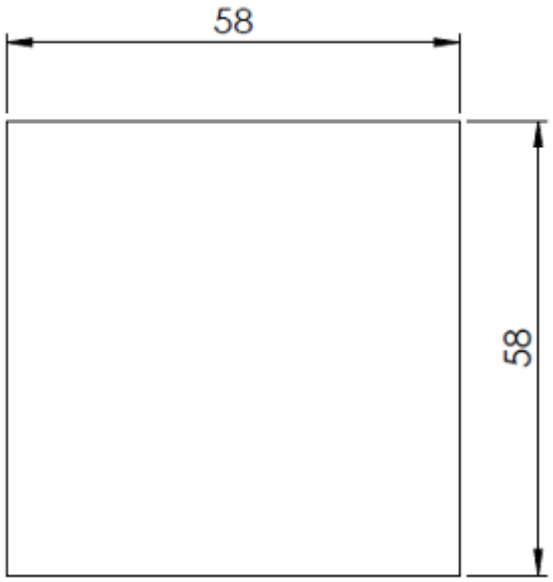


Figura 16. *Probeta prueba de impacto***.**
Fuente. Elaboración propia

La Figura 17 muestra una probeta mecanizada para ensayos de tracción, con dimensiones normalizadas que permiten medir la resistencia máxima, elongación y módulo de elasticidad del material.

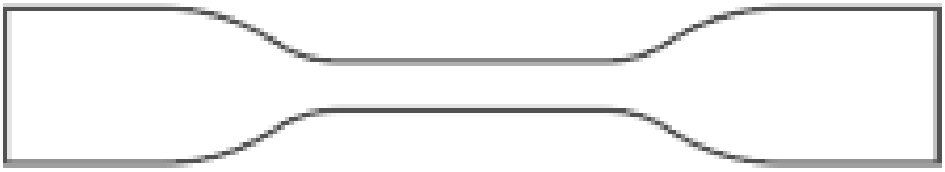


Figura 17. *Probeta Tracción.*
Fuente. Elaboración propia.

La Figura 18 presenta una probeta de fatiga flexionante método B, diseñada para analizar el deterioro progresivo del material bajo cargas cíclicas y determinar su vida útil.

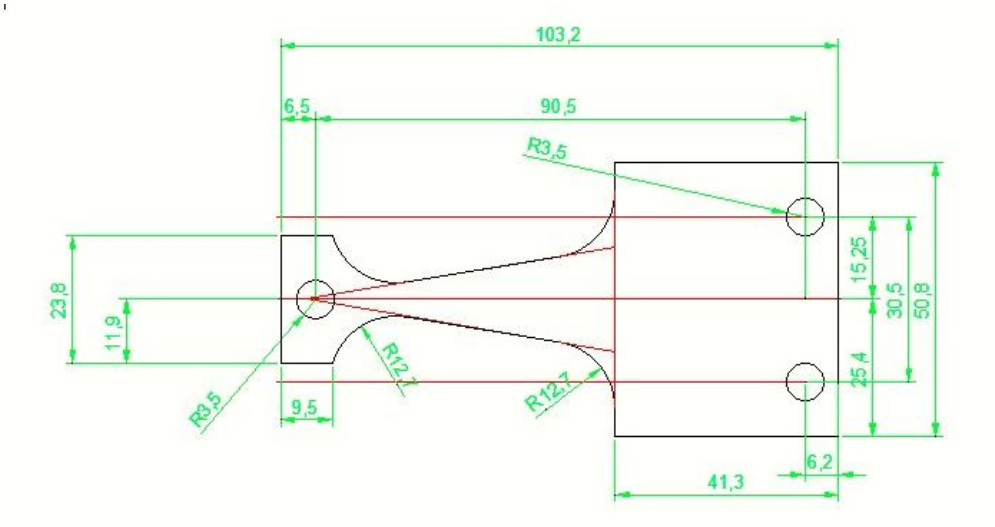


Figura 18. *Probeta Fatiga flexionante método B.*
Fuente. Elaboración propia.

2.5.4.1 Ensayos Mecánicos

Ensayo de Impacto

Las pruebas de impacto para polímeros a realizarse son fundamentales en la caracterización del material, ya que de esta manera se pude ver si tiende a deformarse o romperse, así evaluar su resistencia a la fractura bajo el impacto de una carga y determinar si es adecuado para aplicaciones en donde puede sufrir golpes o cargas.

"Este método de ensayo cubre la determinación de la clasificación relativa de los materiales de acuerdo con la energía requerida para agrietar o romper muestras de plástico planas y rígidas bajo varias condiciones especificadas de impacto de un percutor impactado por la caída de un peso" (Advancing Standards Transforming Markets, 2021).

Fórmula Genera de impacto

$$E = m * g * h$$

Ecuación 1

Donde:

E: Energía de Impacto (Joules)

m: masa de impacto (Kg)

g: aceleración debida a la gravedad (9.81m/s2)

h: altura desde la que se deja caer el peso (m)

m_u: masa de una sola pesa

La Figura 19 ejemplifica el ensayo de impacto mediante impacto por dardos, donde se mide la energía absorbida por la probeta al fracturarse, indicando su tenacidad o fragilidad.

Figura 19. *Máquina de ensayo de impacto.*
Fuente. *Elaboración propia.*

Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción a realizarse van a determinar cómo se comporta el material bajo una fuerza de estiramiento gradual. Con esto se obtendrán datos sobre su resistencia, elasticidad y ductilidad, esenciales para aplicaciones de ingeniría y diseño.

"Este método de ensayo está diseñado para producir datos de propiedades de tracción para el control y la especificación de materiales plásticos. Estos datos también son útiles para la caracterización cualitativa y para la investigación y el desarrollo" (Advancing Standards Transforming Markets, 2014).

El ensayo de tracción se realizó en una máquina universal, aplicando carga axial progresiva hasta la fractura para determinar resistencia, elongación y módulo elástico del material.

Esfuerzo máximo de tracción

La resistencia máxima a la tracción se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{max} = F/A$$

Ecuación 2

Donde:

σ_{max}= Esfuerzo máximo de tracción (MPa)

F = Carga máxima o fuerza necesaria para producir la ruptura (N)

A = Área de la selección transversal de la probeta (mm^2).

Porcentaje de deformación

$$\varepsilon = \left(\frac{lf - li}{li}\right) 100$$

Ecuación 3

Donde

ε = Porcentaje de deformación

lf = Longitud final de la probeta (mm)

li = Longitud inicial de la probeta (mm)

Módulo de elasticidad

Para determinar el módulo de elasticidad o módulo de Young se aplica la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon}$$

Ecuación 4

Donde:

E = Módulo de elasticidad (MPa)

σ = Esfuerzo máximo

ε = Elongación

La Figura 20 ilustra el ensayo de tracción en una máquina universal, registrando la curva esfuerzo-deformación para determinar propiedades mecánicas como límite elástico y resistencia a la rotura.

Figura 20. *Ensayo tracción.*
Fuente. *Elaboración propia.*

Ensayo de Fatiga Flexionante

Con el ensayo de fatiga flexionante se quiere evaluar la resistencia del material a fallos por cargas cíclicas en modo flexión.

"Las pruebas de fatiga dinámica están diseñadas para simular las distorsiones continuamente repetidas recibidas en servicio por muchos artículos de caucho, como neumáticos, correas, calzado y productos moldeados" (Advancing Standards Transforming Markets, 2018).

El ensayo de fatiga a flexión registró 549,115 ciclos antes del rompimiento, determinando la vida útil del material bajo carga cíclica repetitiva.

La Figura 21 muestra el ensayo de fatiga flexionante, aplicando cargas repetidas para evaluar la resistencia del material a fallos por acumulación de microgrietas.

Figura 21. *Ensayo fatiga flexionante*
Fuente. *Elaboración propia.*

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Tracción

Área de sección transversal A = espesor x anchura

Esfuerzo máxmio σ_{max} = F/A

Deformación ε

Módulo de elasticidad (Young) E

Muestra 1_1

Espesor: 4.3 mm

Ancho: 6.0 mm

Longitud inicial li: 67 mm

Área A = 4.3 x 6.0 = 25.8 mm^2

Fuerza máxima: 747.864 N

Esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{747.864}{25.8} = 28.99\ MPa$$

Ecuación 5

Deformación Máxima: 0.88918 %

Módulo elástico: 4.80 GPa

Muestra 1_2

Espesor: 4.6 mm

Ancho: 5.8 mm

Longitud inicial li: 66.0 mm

Área A = 4.6 x 5.8 = 26.68 mm^2

Fuerza máxima: 1141.10 N

Esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{1141.10}{25.826.68} = 42.77\ MPa$$

Ecuación 6

Deformación Máxima: 1.30924 %

Módulo elástico: 5.63 GPa

Muestra 1_3

Espesor: 4.8 mm

Ancho: 5.7 mm

Longitud inicial li: 68.0 mm

Área A = 4.8 x 5.7 = 27.36 mm^2

Fuerza máxima: 511.058 N

Esfuerzo máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{511.058}{27.36} = 18.68\ MPa$$

Ecuación 7

Deformación Máxima: 0.61385 %

Módulo elástico: 4.36 GPa

La Tabla 14 resume los parámetros y resultados (esfuerzo máximo, deformación) obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 14. *Parámetros y resultados de los ensayos de tracción.*

DATOS INFORMATIVOS			
Nombre del archivo de ensayo	Ensayo tracción	**Nombre de Método de ensayo**	Tracción ASTM D638.xmas
Fecha del informe	5/19/5025	**Fecha de ensayo**	5/19/2025
Modo de Ensayo	Sencillo	**Tipo de ensayo**	Tracción
Velocidad	5mm/min	**Forma**	Plana
N° de partidas	1	**N° de muestras**	4

Nombre	Elástico_Devided	Rotura_Fuerza	Rotura_Tensión	Rotura_ Desplazamiento

Parámetros	10 Intervalos	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10
Unidad	GPa	N	N/mm2	mm
1 _ 1	4.80136	741.212	28.7291	0.61073
1 _ 2	5.62897	1103.54	41.3622	0.88243
1 _ 3	4.35612	-.-	-.-	-.-

Nombre	Rotura_Deformación	Max._Fuerza	Max._Tensión	Max._Desplazamiento
Parámetros	Sensibilidad 10	Calc. At Entire Areas	Calc. At Entire Areas	Calc. At Entire Areas
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1 _ 1	0.91154	747.864	28.9870	0.59575
1 _ 2	1.33702	1141.10	42.7700	0.86410
1 _ 3	-.-	511.058	18.6790	0.41742

Nombre	Max. Deformación
Parámetros	Calc.at Entire Areas
Unidad	%
1 _ 1	0.88918
1 _ 2	1.30924
1 _ 3	0.61385

Nombre de muestra	**Espesor**	**Anchura**	**Longitud Calibrada**
Unidad	mm	mm	mm
1 _ 1	4.3000	6.0000	67.0000
1 _ 2	4.6000	5.8000	66.0000
1 _ 3	4.8000	5.7000	68.0000

Muestra	**Área (mm^2)**	**Fuerza máx (N)**	**Esfuerzo máx (MPa)**	**Deformación máx (%)**	**Módulo (GPa)**
1_1	25.80	747.864	28.99	0.88918	4.80
1_2	26.68	1141.10	42.77	1.30924	5.63
1_3	27.36	511.058	18.68	0.61385	4.36

FOTOGRAFÍAS DE PROBETAS DESPUÉS DEL ENSAYO

El Figura 22 detalla los resultados individuales de cada probeta en los ensayos de tracción, destacando variaciones en resistencia y ductilidad entre materiales o tratamientos.

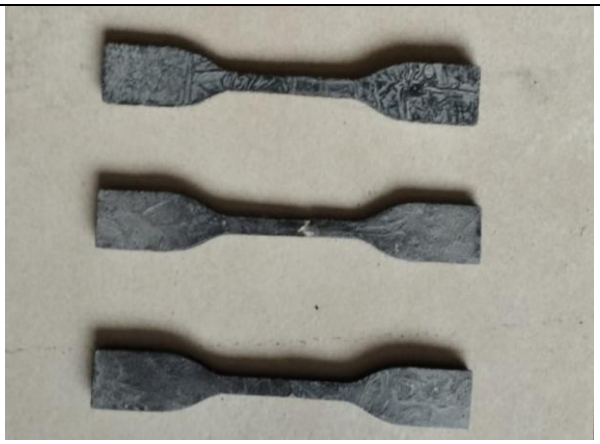


Figura 22. *Resultado probetas ensayo de tracción.*
Fuente. *Elaboración Propia.*

Tensión Máxima	**35 MPa**

El Figura 23 compara gráficamente las curvas de deformación de las probetas analizadas, revelando diferencias en comportamiento elástico bajo carga axial.

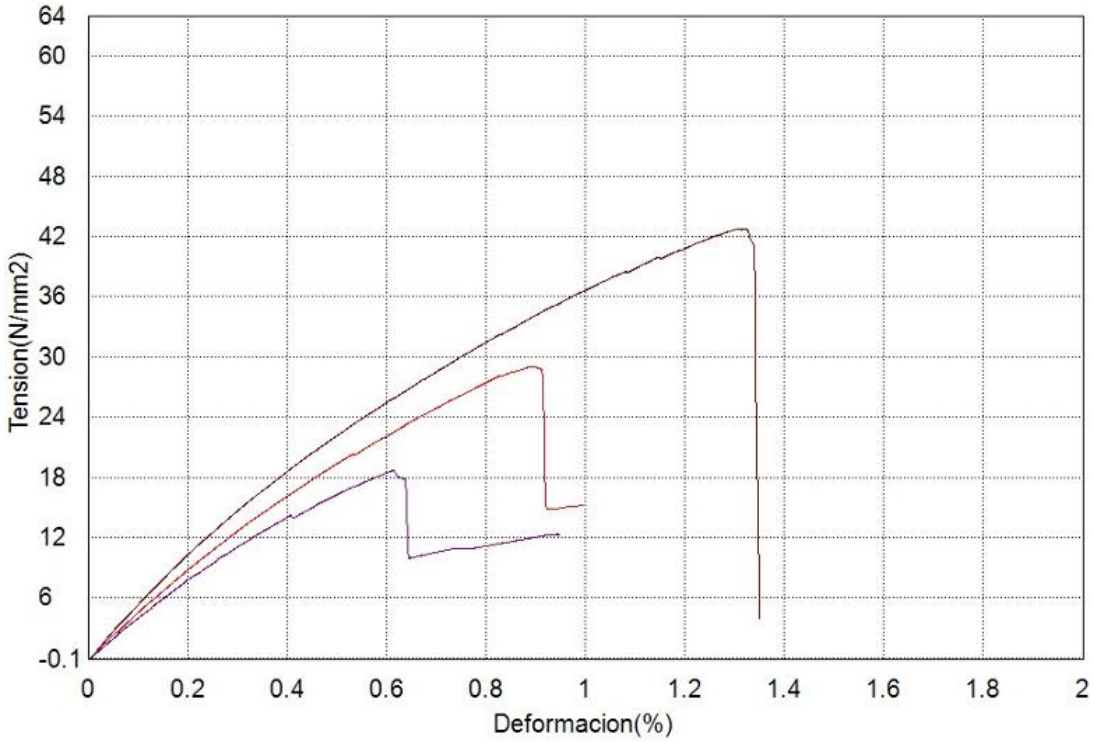


Figura 23. *Deformación de las diferentes probetas.*
Fuente. *Elaboración propia.*

3.1.2 Impacto

La Tabla 15 expone los parámetros y resultados (energía absorbida) de los ensayos de impacto.

Tabla 15. *Parámetros y resultados de los ensayos de impacto*

DATOS INFORMATIVOS						
Fecha	19/05/2025					
Lugar	Laboratorios de materiales de la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniría Civíl y Mecánica.					
Máquina	Máquina de ensayo de impacto por caída de dardo					
PARÁMETROS DE ENSAYO						
Norma	ASTM D5420		**Número de probetas**	4		
Matriz	Resina poliéster / Fibra de vidrio		**Fracción Volumétrica (M)**	30 / 30 (%)		
Refuerzo	Yeso odontológico reciclado tipo III		**Fracción Volumétrica (R)**	40%		
Dimensiones	58 * 58 * e (mm)		**Estratificación**	Manual		
Espesor promedio	6 mm		**Geometría del dardo**	FE		
Diámetro del dardo (mm)	20		**Masa del dardo (Kg)**	0.231		
RESULTADOS DEL ENSAYO						
Probeta	**Altura (mm)**	**Altura (m)**	**N° de pesas m_u**	**Masa de cada pesa m_u (g)**	**Masa total (Kg)**	**Energía (J)**
1	150	0.15	10	18	0.18	0.60478
2	150	0.15	20	18	0.36	0.86965
3	250	0.25	20	18	0.36	1.44942
4	350	0.35	30	18	0.54	2.64722
FOTOGRAFÍAS DE LAS PROBETAS DESPUÉS DE LOS ENSAYOS						

La Figura 24 muestra el estado post-fractura de las probetas sometidas a impacto, correlacionando su morfología de daño con la energía absorbida.

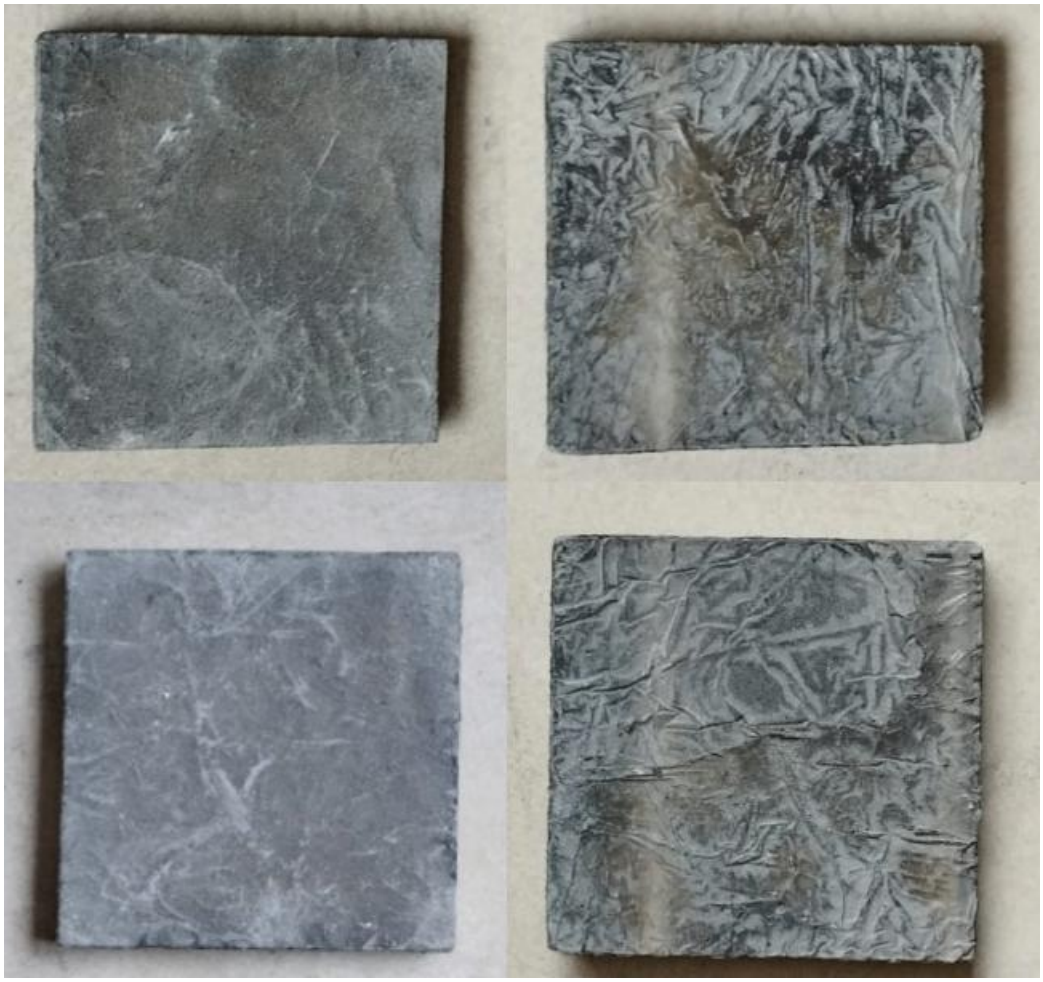


Figura 24. *Resultados probetas ensayo de impacto.*
Fuente. *Elaboración Propia.*

Energía de fallo (J)	No hubo rompimiento de las probetas, solo daño mínimo.

3.1.3 Fatiga Flexionante

La Tabla 16 se puede ver el resultado de los ensayos de fatiga flexionante, evaluando la durabilidad del material.

Tabla 16. *Parámetros y resultados de los ensayos de Fatiga flexionante***.**

Datos informativos			
Fecha	19/05/2025		
Lugar	Laboratorios de materiales de la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniría Civíl y Mecánica.		
Máquina	Máquina de ensayo de Fatiga flexionante		
PARÁMETROS DE ENSAYO			
Norma	ASTM D430 – Método B	**Número de probetas**	3
Matriz	Resina poliéster / Fibra de vidrio	**Fracción Volumétrica (M)**	30 / 30 (%)
Refuerzo	Yeso odontológico reciclado tipo III	**Fracción Volumétrica (R)**	40%
Dimensiones	103.2 * 50.8 * e (mm)	**Estratificación**	Manual
Espesor promedio	6 mm		
FOTOGRAFÍAS DE PROBETAS DESPUÉS DEL ENSAYO			

La Figura 25 presenta el análisis microscópico de una probeta tras el ensayo de fatiga flexionante, identificando grietas de fatiga y patrones de fractura característicos.

Figura 25. *Resultado probeta ensayo fatiga flexionante.*
Fuente. *Elaboración propia.*

Ciclo de fallo	549,115

3.2 Discusión

3.2.1 Tracción

Los valores experimentales del compuesto 30% yeso se ubican por debajo de los referidos en la bibliografía para compuestos similares sin relleno. El módulo elástico (4.93 GPa) es menor que los 6 GPa típicos (Assunção et al., 2024). La tensión de rotura promedio (35 MPa) está en el rango bajo de los 31–50 MPa señalados en literatura (Assunção et al., 2024) (El-Wazery et al., 2017), confirmando el efecto debilitante del yeso. Tanto desplazamientos como deformaciones finales son muy pequeñas, lo cual es congruente con la menor tenacidad esperada por el filler cerámico. Los ensayos apoyan que a mayor contenido de yeso (carga inerte), se reduce la resistencia y ductilidad del polímero reforzado, efecto ya documentado (Ajji, 2009).

Los resultados confirman que la incorporación del 30% en peso de carga cerámica de yeso dental en una matriz poliéster/fibra de vidrio reduce las propiedades mecánicas de tracción en comparación con los compuestos sin relleno documentados. El módulo elástico y la resistencia a la rotura obtenidos experimentalmente son inferiores a los reportados en la bibliografía para GFRP estándar (Assunção et al., 2024), lo que corrobora que el relleno de yeso, aunque rígido, actúa como sitio de debilidad dentro de la matriz (tal como se infiere de estudios previos (Ajji, 2009). Estas conclusiones son relevantes para la correlación entre composición y comportamiento mecánico en este tipo de composites: a mayor proporción de relleno cerámico (y menores fibras eficientes), se logra un material más frágil y de menor tenacidad. En investigaciones futuras se recomendaría analizar detalladamente la interacción entre la fibra, la matriz de poliéster y el grano de yeso, así como optimizar la adhesión interfacial para mejorar la performance global del material.

3.2.2 Impacto

Los resultados se comparan con datos sobre GFRP, donde composites de matriz poliéster sin refuerzo o con fibra natural presentan energías de impacto muy bajas (ejemplo 0,07 J en resina pura y 0,32 J en un GFRP híbrido con fibra de coco y

vidrio, un 361% más que la matriz sola) (Delgado F et al., 2014). Estos valores son inferiores a los del material estudiado, aunque las condiciones de prueba difieren, pero la tendencia coincide: el refuerzo con fibras o cargas rígidas mejora la resistencia al impacto. Mientras cargas cerámicas como Al_2O_3 pueden aumentar la rigidez pero reducir la tenacidad (Patnaik et al., 2009a), el compuesto con 30% de yeso dental reciclado mostró alta capacidad de disipación de energía, atribuida a la buena adhesión matriz-carga y a que el yeso es rígido, pero menos quebradizo que cerámicas avanzadas. Este material superó en resistencia al impacto al GFRP sin carga, comportamiento similar al de híbridos reforzados, donde el refuerzo incrementa significativamente la energía absorbida antes de la falla (Delgado F et al., 2014).

Los ensayos muestran una clara correlación positiva entre masa/altura del dardo y energía absorbida, acorde a la física del impacto (Mexpolímeros, n.d.), y demuestran que el composite de fibra de vidrio con carga cerámica ofrece una resistencia al impacto alta. Estos resultados son relevantes, pues establecen las tendencias cuantitativas (linealidad masa-altura vs energía) y cualitativas (mínimo daño) que validan la hipótesis de que la incorporación de carga cerámica mejora o mantiene la tenacidad del GFRP en este contexto. Este material podría emplearse en aplicaciones donde se requiera alta resistencia a impactos aprovechando además el valor agregado de reutilizar desechos dentales.

3.2.3 Fatiga flexionante

Los GFRP sin carga (fibra de vidrio/poliéster puro) presentan una vida a fatiga que varía entre 10^3 y $>10^6$ ciclos según el nivel de carga, con fallas a 50% de resistencia estática en 2.4×10^3 ciclos y a 25% sin falla hasta $>5\times10^6$ ciclos (Zaghloul et al., 2022), aunque algunos estudios reportan fallas antes de 2×10^6 ciclos incluso a bajas cargas (Paradiso et al., 2020a). Los GFRP con carga inorgánica (30% cerámica) carecen de datos específicos, pero se infiere que su vida a fatiga sería comparable o inferior (10^2–10^5 ciclos) debido a la fragilización de la matriz (Patnaik et al., 2009b), siendo el resultado experimental de 5.49×10^5 ciclos consistente con este rango.

Con esto podemos determinar que el valor experimental de ~5.5×10^5 ciclos está dentro de lo esperado para composites de fibra de vidrio bajo cargas moderadas de flexión repetida. No se aprecia una mejora en la vida a fatiga debido al relleno cerámico, lo cual concuerda con el entendimiento de que estos rellenos endurecen la matriz, pero pueden inducir concentraciones de tensiones que acortan la vida a fatiga (Patnaik et al., 2009b)(Paradiso et al., 2020a) .

3.2.4 Aplicaciones Industriales

Los composites de GFRP con yeso son ampliamente utilizados en la construcción y arquitectura, especialmente en paneles prefabricados, muros y plafones, debido a su alta rigidez y resistencia superficial. Estos materiales son ideales para aplicaciones que demandan propiedades como durabilidad frente a impactos menores, como golpes o el uso de herramientas, además de ofrecer una excelente estabilidad dimensional. Su versatilidad y rendimiento los convierten en una opción preferida en proyectos donde se busca combinar ligereza, resistencia y facilidad de instalación en estructuras arquitectónicas modernas. (Unlimited Designs, 2020). El material, compuesto en un 30% por yeso reciclado, es ideal para su uso en elementos prefabricados de interiores, como columnas, bandejas de techo y fachadas modulares. Esta combinación de fibra y yeso proporciona una notable rigidez y una excelente capacidad para absorber impactos leves, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requieren durabilidad y resistencia. Su composición sostenible, con contenido reciclado, también lo convierte en una opción atractiva para proyectos de construcción que buscan reducir su impacto ambiental sin sacrificar rendimiento.

En la industria automotriz y de transporte, especialmente en componentes como paneles interiores y carcasas ligeras, la incorporación de rellenos cerámicos mejora significativamente la capacidad de disipación de energía, una propiedad clave para los interiores de vehículos. Investigaciones han demostrado que añadir partículas de carburo de silicio puede incrementar hasta un 45% la energía absorbida en composites similares, optimizando su resistencia a impactos. Esto los convierte en una solución eficaz para aplicaciones donde se busca mayor seguridad y durabilidad sin aumentar considerablemente el peso (Reddy Palle et al., 2022). Este GFRP reforzado podría emplearse en componentes internos como paneles o cubiertas que

requieren resistencia a impactos moderados (ejemplo paragolpes de cabina, revestimientos de puertas), donde su mayor rigidez y capacidad de absorción mejoran la seguridad manteniendo un peso reducido. Adicionalmente, la incorporación de yeso reciclado no solo brinda ventajas ecológicas al material, sino que también representa un ahorro en costos de producción, haciendo de este compuesto una solución técnica y económicamente viable para aplicaciones automotrices que priorizan sostenibilidad y rendimiento.

Tabla 17. *Relación de materiales en el mercado con los obtenidos.*

Material/ Producto	**Uso / Industria**	**Resistencia a tracción (MPa)**	**Impacto (J o J/cm)**	**Fatiga flexionante (ciclos)**	**Referencia**
Tesis: GFRP + 30 % yeso dental reciclado	-	35MPa	10 J (ASTM D5420)	549,115 ciclos (ASTM D430 - B)	-
Panel FRP Formglas (resina poliéster)	Construcción (fachadas, muros)	110 MPa	643 J/m (12 ft·lb/in)	Falla antes de 2×10^6 ciclos (sin límite claro)	(Formglas, 2018). (Paradiso et al., 2020b)
Perfil pultruido FRP (Strongwell)	Construcción estructural	165 – 207 MPa	-	Falla antes de 2×10^6 ciclos	(STRONG WELL, 2020). (Paradiso et al., 2020b)
Barras GFRP (vinilésteres, p. ej. V-Rod)	Refuerzo de concreto	800 – 1000 MPa	-	En servicio $>10^6$ ciclos con cargas controladas	(V-ROD 46, 2019)
Compuesto SMC (poliéster + fibras largas)	Automotriz (paneles, cofres)	55 – 125 MPa	4 – 11 J/cm	Similar: falla antes de 10^6 ciclos	(Trauth et al., 2017)
Laminado epoxi/fibra G-10 / FR-4	Electrónica, estructural	240 – 345 MPa	-	Falla antes de 2×10^6 ciclos	(Paradiso et al., 2020b)

Los materiales comerciales de fibra de vidrio/poliéster (paneles FRP, SMC, barras GFRP, Compuesto SMC, Laminado epoxi) presentan resistencias a la tracción en el rango de unas decenas a varios cientos de MPa y capacidades de impacto comparables a los datos experimentales recientes. Estas propiedades están respaldadas por fichas técnicas y referencias de la industria. La **Tabla 17** anterior resume dichos valores y facilita la correlación con los resultados propios.

La Tabla 18 resume la evaluación comparativa de los materiales analizados, asignando una ponderación a cada característica (GFRP + 30% yeso, Panel FRP Formglas, Perfil Pultruido FRP, Barras GFRP (viniléster), Compuesto SMC, Laminado epoxi G-10). Los valores numéricos reflejan su importancia relativa dentro del criterio de selección, permitiendo identificar de manera cuantitativa las ventajas y limitaciones de cada opción. Las filas representan los materiales, mientras que las columnas detallan las propiedades evaluadas.

Tabla 18. *Ponderación de cada material según sus características.*

	Tracción (MPa)	Impacto (J o J/cm)	Fatiga (ciclos)
Tesis: GFRP + 30% yeso	3.5	7	6
Panel FRP Formglas	7	6	8
Perfil Pultruido FRP	9	1	8
Barras GFRP (viniléster)	10	1	10
Compuesto SMC	5.5	8	7
Laminado epoxi G-10	8	1	8
	1		10
	Malo		Bueno

La Figura 26 muestra un diagrama de radar (o diagrama de araña) que representa la ponderación gráfica de cada uno de los resultados evaluados. En el se puede comparar los diferentes materiales de forma radial, destacando las diferencias en sus valores mediante los vértices y áreas formados. Los ejes corresponden a los

criterios analizados, mientras que la forma poligonal resultante ilustra el perfil integral de las ponderaciones.

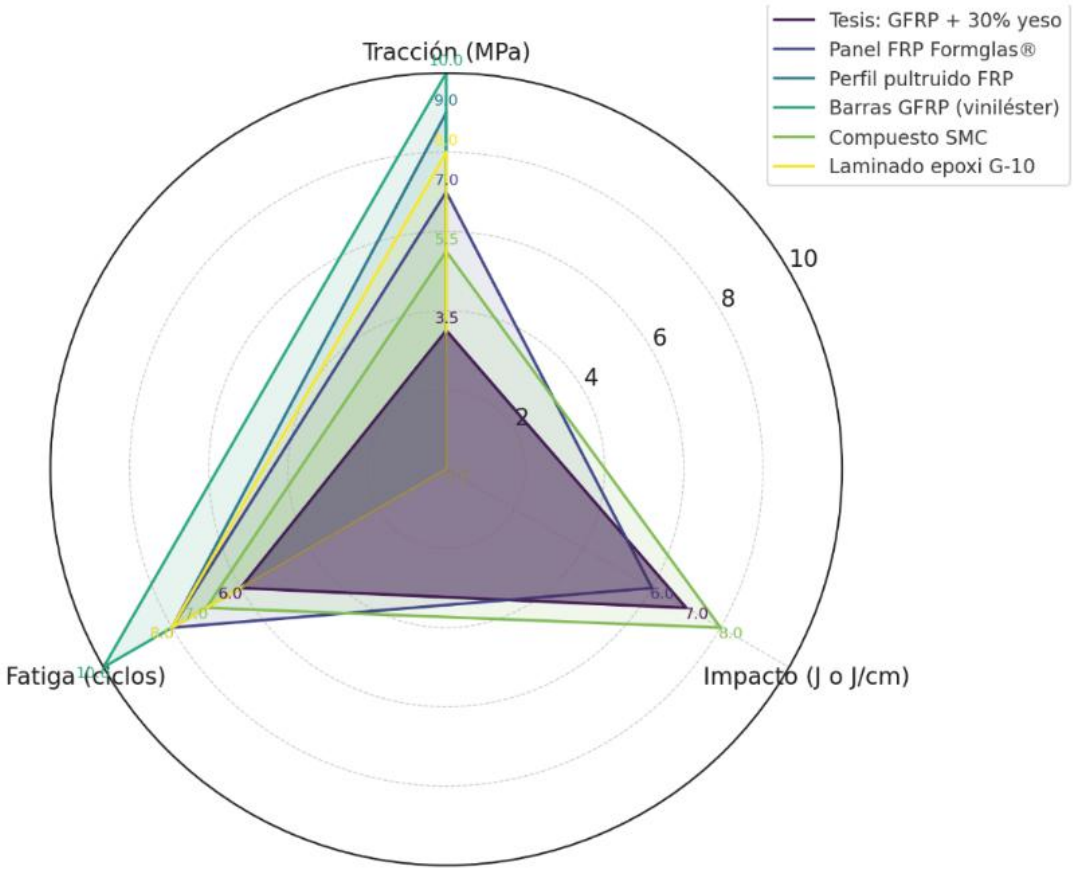


Figura 26. *Diagrama de araña*.
Fuente. *Elaboración propia.*

Las propiedades ponderadas del material GFRP + 30% de yeso (color violeta) frente a los materiales de referencia revela su perfil de desempeño integral. Un área más amplia y equilibrada sugiere un mejor balance entre las propiedades evaluadas, mientras que las distorsiones o concavidades destacan posibles limitaciones. En este caso, el material seleccionado demuestra un mejor rendimiento en impacto, confirmando su relación con el Compuesto MSC (Automotriz) y Panel FRP Formglas (Construcción).

El compuesto con 30 % de yeso mostró una resistencia a tracción de 35 MPa, una resistencia a impacto de 10 J y un número de ciclos a fatiga flexionante de 549,115. Estos resultados se encuentran dentro del rango esperado para materiales compuestos con cargas cerámicas de baja a media resistencia mecánica. En

comparación con otros rellenos, el yeso reciclado muestra un comportamiento equilibrado, sin mejoras sustanciales, pero con un rendimiento mecánico.

Si bien no supera a los rellenos cerámicos tradicionales en rendimiento mecánico, se posiciona como una alternativa viable y sustentable para materiales compuestos de media prestación.

Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- La incorporación de un 30% en peso de yeso dental reciclado como carga cerámica en una matriz de poliéster/fibra de vidrio (GFRP) reduce tanto el módulo elástico (4.93 GPa vs 6 GPa típicos) como la resistencia a la tracción (35 MPa, en el rango bajo de la bibliografía). Esto confirma el efecto debilitante del filler cerámico, que actúa como sitio de iniciación de falla dentro de la matriz.

- Aunque el compuesto muestra menor tenacidad en tracción, presenta una elevada capacidad de disipación de energía bajo impacto, superando incluso a GFRP sin carga. Esto sugiere una buena adhesión matriz-carga y un comportamiento más dúctil del yeso dental comparado con cerámicas más frágiles como Al_2O_3.

- La vida a fatiga del compuesto (5.5×10^5 ciclos) es consistente con los valores esperados para materiales compuestos con carga cerámica, confirmando que si bien el yeso mejora ciertos aspectos estructurales, también induce concentraciones de tensión que limitan la durabilidad bajo cargas repetidas.

- Los resultados experimentales respaldan el uso de yeso dental reciclado como un recurso viable en materiales compuestos, especialmente en aplicaciones donde se priorice la resistencia al impacto y la sostenibilidad del recurso, aunque con limitaciones mecánicas que deben considerarse en función del uso final.

- Si bien el material base yeso odontológico desechado no representa un costo inicial elevado, el proceso de recolección, clasificación y calcinación introduce costos operativos considerables. En comparación con el yeso virgen comercial, el material reciclado requiere mayor tratamiento previo, lo cual puede aumentar su costo unitario si no se optimiza la cadena de valor.

- La calcinación y reactivación del yeso ha demostrado ser reproducible a escala de laboratorio, pero su escalamiento industrial necesitaría verificaciones continuas para garantizar la calidad del producto, especialmente debido a la variabilidad en el origen del residuo. Esto demanda protocolos estandarizados y controles de calidad más estrictos.

- La escalabilidad del material desarrollado presenta oportunidades claras en el marco de la sostenibilidad y el aprovechamiento de residuos, pero enfrenta desafíos técnicos y económicos que deben resolverse mediante una planificación adecuada de la infraestructura, mejoras en la eficiencia del proceso y una estrategia logística que garantice el flujo constante de materia prima.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda investigar y estandarizar procesos de recuperación y acondicionamiento del yeso proveniente de moldes dentales, para asegurar la pureza, granulometría y compatibilidad con matrices poliméricas.

- Para aumentar la performance del composite, se sugiere optimizar la adhesión interfacial entre el yeso, la matriz poliéster y la fibra de vidrio, mediante tratamientos superficiales o el uso de agentes de acoplamiento.

- Es esencial caracterizar las propiedades físico-mecánicas del yeso recuperado bajo diversas condiciones ambientales y de carga, a fin de evaluar su estabilidad, durabilidad y comportamiento real frente a envejecimiento o humedad.

- Se recomienda explorar nuevas aplicaciones del yeso reutilizado en sectores productivos con menores exigencias mecánicas pero alta demanda de impacto o amortiguación.

- Se sugiere el desarrollo de composites híbridos o gradientes funcionales, en los que se combine el yeso con otros tipos de cargas o refuerzos, para balancear mejor la resistencia, tenacidad y vida útil del material.

- Durante el proceso de corte del material mediante CNC, se observa que los bordes presentan un debilitamiento estructural debido a las fuerzas mecánicas y térmicas involucradas. Este fenómeno afecta negativamente la integridad del material, lo que se refleja en resultados inconsistentes durante los ensayos físico-mecánicos. Por tanto, se recomienda evaluar parámetros de corte óptimos para mitigar este efecto y garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos.

Bibliografía

A.Barra. (2009, May 14). *Cantera_de_yeso.jpg (3000×2000)*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Cantera_de_yeso.jpg

Advancing Standards Transforming Markets. (2014). *Test Method for Tensile Properties of Plastics*. https://doi.org/10.1520/D0638-14

Advancing Standards Transforming Markets. (2018). *Test Methods for Rubber Deterioration--Dynamic Fatigue*. https://doi.org/10.1520/D0430-06R18

Advancing Standards Transforming Markets. (2021). *Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact)*. https://doi.org/10.1520/D5420-21

Ajji, Z. (2009). RADIATION-INDUCED PREPARATION OF POLYESTER/ GYPSUM/ COMPOSITE. *Revue Roumaine de Chimie*, *54*(3), 213–218.

Albert Padró-Solanet i Grau. (2020). *El muestreo Albert Padró-Solanet i Grau Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 4 horas*.

Anselmo, F., Flores, S., & De Revisión, A. (2019). *Fundamentos Epistémicos de la Investigación Cualitativa y Cuantitativa: Consensos y Disensos Epistemic Fundamentals of Qualitative and Quantitative Research: Consensus and Dissensus Fundamentos epistémicos da pesquisa qualitativa e quantitativa: consensos e dissensos*. *13*(1), 102–122. https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644

Antonio Fortes Martín. (2019). *"LA RESILIENCIA AMBIENTAL Y EL (RE)POSICIONAMIENTO DEL DERECHO ANTE UNA NUEVA ERA SOSTENIBLE DE OBLIGADA ADAPTACIÓN AL CAMBIO" • "ENVIRONMENTAL RESILIENCE AND THE (RE)POSITIONING OF LAW FACING A NEW SUSTAINABLE PHASE OF FORCED ADAPTATION TO CHANGE."*

Arroyo González, L. A. (2024). El eco-diseño una estrategia de innovación. Sustento de un modelo de fabricación, basado en la economía circular. *Expresión Económica*, *53*, 9–26. https://doi.org/10.32870/EERA.VI53.1176

Assunção, G. S. C., Velasques, J. A., Zakrzevski, A., & de Costa, I. (2024). Mechanical properties of glass-fiber reinforced polyester composites manufactured by two different spray-up techniques. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *29*(3), e20240450. https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0450

Auquilla Illapa, L. A., Erazo Samaniego, G. F., León Borja, F. A., & Aldaz Berrones, G. P. (2023). Compuestos de matriz cerámica: Una revisión del estado del arte. *AlfaPublicaciones*, *5*(3), 140–149. https://doi.org/10.33262/ap.v5i3.391

Babativa, H., Rubiano, P. A., Velásquez, T., González, J., Vega, M., & Gaona, N. (2024). The Semi-Structured Interview: A Relevant Tool in the Perception of Social Values for

Life. *Revista Lasallista de Investigacion*, *21*(1), 92–107. https://doi.org/10.22507/RLI.V21N1A5

Barnabas, U. U., Remigius, D. C., John, E., Chinonso, O. P., Olufemi, O. A., & Emeka, U. B. (2023). Modeling the Mechanical Properties of Primary Recycled Type II Dental Plaster Blend Using Desirability Optimization Methodology. *2023 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS)*, *1*, 1–6. https://doi.org/10.1109/ICMEAS58693.2023.10379249

Britannica. (2025, April 11). *Yeso | Definición, usos y datos | Britannica*. https://www-britannica-com.translate.goog/science/gypsum

Byron Bravo. (2025, March 13). *Del diseño al desarrollo: el reciclaje como motor económico en Ecuador*. https://www.expreso.ec/actualidad/economia/diseno-desarrollo-reciclaje-motor-economico-ecuador-234828.html?utm_source=chatgpt.com

Cabezas Salazar, R. (2024). *Manejo adecuado de desechos en laboratorios dentales Proper waste management in dental laboratories*. https://orcid.org/0009-0004-5348-6128

Cadenas, N. (2019). *LA ECOEFECTIVIDAD COMO ESTRATEGIA PARA ALCANZAR EL DESARROLLO SOSTENIBLE: RESUMEN*.

Carrillo Manjarrez Sofía Gabriela. (2018). *"Estudio in vitro sobre la manipulación y propiedades físico mecánicas del yeso tipo III y IV utilizado en odontología.*

Cerón Hernández, A., Fernández Vargas, G., Figueroa, A., Alfonso Cerón Hernández, V., & Restrepo, I. (2019). *The approach of socio-ecological systems in environmental sciences*.

Cruz Ramos, M. E., Salvatierra Chuquimarca, J. J., & Orrego-Ferreyros, L. A. (2024). Integrated Management of Hazardous Solid Waste in Dental Offices of Talara (Peru) and Machala (Ecuador): A Policy Brief Comparing Two Latin American Countries. *F1000Research*, *13*, 762. https://doi.org/10.12688/f1000research.152652.1

Delgado F, Galeas, ;, & Guerrero, ; (2014). OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS DE MATRIZ POLIÉSTER REFORZADA CON FIBRAS DE COCO Y VIDRIO PARA LA ELABORACIÓN DE TABLEROS Obtención de Materiales Compuestos Híbridos de Matriz Poliéster Reforzada con Fibras de Coco y Vidrio para la Elaboración de Tableros. *REVISTA EPN*, *33*(2).

Dentaltix. (2022, March 1). *Guía de sostenibilidad: Prácticas sostenibles para la gestión de residuos de materiales de impresión dental y vaciado - Dentaltix*. https://www.dentaltix.com/es/blog/guia-sostenibilidad-practicas-sostenibles-la-gestion-residuos-materiales-impresion-dental-y

Díaz, N., Menoscal, R., & González, M. (2020). *ECONOMÍA CIRCULAR: DESAFÍOS PARA UNA VISIÓN ESTRATÉGICA DE LAS EMPRESAS EXPORTADORAS ARTICLE CIRCULAR ECONOMY: CHALLENGES FOR A STRATEGIC VISION OF EXPORTING COMPANIES* (Vol. 7, Issue 3).

Eduardo José María Carrillo Martínez. (2022). *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO "ESTUDIO COMPARATIVO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN ENTRE LOS YESOS TIPO IV GC FUJIROCK EP-PREMIUM*.

El-Wazery, M. S., El-Elamy, M. I., & Zoalfakar, S. H. (2017). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Applied Science and Engineering*, *14*, 121. https://doi.org/10.6703/IJASE.2017.14(3).121

EU-LAC Kowszyk, F., & Maher, Y. (2018). *Proyecto desarrollado por InnovacionAL*. http://www.innovacional.com/

Felix Joerg Mueller. (2022, August 10). *Cradle_to_Cradle_concept.png (4961×4961)*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/Cradle_to_Cradle_concept.png

Fernando, J., & Mejía, J. (2009). *Tratamiento de datos experimentales*.

Formglas. (2018). *Architectural Specialty Solutions Interiors + Exteriors Product Data Sheets*.

Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M. M., Silva, J. S., Andrade, H. M. C., Dweck, J., Gonçalves, J. P., & Camarini, G. (2017). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, *164*, 288–300. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.188

Gómez Chipana, E. (2020). *Análisis correlacional de la formación académico - profesional y cultura tributaria de los estudiantes de Marketing y Dirección de Empresas.*

González, A., Borrego, A., Villamil, D., & Arteaga, W. (2020). Creación de valor sostenible: estudio documental sobre su origen y evolución. *Revista Venezolana de Gerencia*, *25*(91), 780–795. https://doi.org/10.37960/RVG.V25I91.33264

González Madariaga, F. J., & Francisco Gómez Gómez, J. (2020). *Algunas nociones que los diseñadores industriales deben tener sobre ciencia de materiales Some notions that industrial designers should know about materials science*.

Gyptec. (2018). *Manual Técnico en instalación en sistemas de yeso*.

Javiera Osorio Aracena. (2020). *Informe Materiales Cerámicos y Compuestos PDF | PDF | Ingeniería Cerámica | Material compuesto*. https://es.scribd.com/document/466598785/Informe-materiales-ceramicos-y-compuestos-pdf

Jia, R., Wang, Q., & Feng, P. (2021). A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field. *Composites Part B: Engineering*, *205*, 108540. https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108540

Joel, C. D. C. M. F., & Velázquez, O. R. (2018). *Los yesos en Odontología*. www.percano.com.mx

Josemanuel, :, & Solares, T. (2018). *DIFERENCIA EN PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL YESO PIEDRA TIPO III Y YESO PIEDRA MEJORADO TIPO IV DE USO ODONTOLÓGICO, AL MEZCLAR CON AGUA DESTILADA O AGUA DE CAÑERÍA*.

Juan Esteban Vásquez Marín. (2024). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO*.

Khadse, K. R., Priya, S., Varghese, R. K., Sisodia, M., Gupta, N. K., & Chandrakar, A. (2024). Up-cycling the dental waste materials: Going green in dentistry. *Bioinformation*, *20*(9), 1124–1127. https://doi.org/10.6026/9732063002001124

Lara, K. A., Zambrano, C. C., Ramirez, J. G., & Zhinin-Vera, L. (2024). Gestión integral de desechos peligrosos en consultorios odontológicos en la zona urbana de La Maná. *Revista Científica de Salud BIOSANA*, *4*(3), 177–191. https://doi.org/10.62305/BIOSANA.V4I3.171

LEY ORGÁNICA PARA EL DESARROLLO ECONÓMICO Y SOSTENIBILIDAD FISCAL. (2021). www.lexis.com.ec

Lozano, C., Flores, S., Molina, S., & Huitzil, E. (2023). *REVISIÓN SISTEMÁTICA DE MODELOS DE YESO CON CONSERVACIÓN DE LA ESTRUCTURA GINGIVAL: MODELO ANALÓGICO VS MODELO DIGITAL.* https://www.rodyb.com/estructura-gingival/https://www.rodyb.com/estructura-gingival/

M. Herráez, A. Fernández, C. González, & C. Lopes. (2016, March). *(PDF) Resistencia y Tenacidad de Fibras Estructurales para Refuerzo de Materiales Compuestos*. https://www.researchgate.net/publication/299367678_Resistencia_y_Tenacidad_de_Fibras_Estructurales_para_Refuerzo_de_Materiales_Compuestos

Macarthur, E., & Ejecutivo, R. (2014). *Founding Partners of the ECONOMÍA CIRCULAR HACIA UNA*.

Marcel Fajardo Sereno Juan David Castro Lopez, J. (2019). *OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ CERÁMICA (Al2O3) Y REFUERZO CERAMICO (TiO2)*.

María Arroyave-Puerta, A., Colombiano, P., Cadavid, J. I., & Ángela Marulanda-Valencia, F. (2019). *Ecoemprendimiento, sostenibilidad y generación de valor*. https://doi.org/10.21158/01208160.n87.2019.2411

Mexpolímeros. (n.d.). *Ensayos tipo dardo - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos*. Retrieved May 27, 2025, from https://www.mexpolimeros.com/lab/caida-de-dardo.html

Ministerio de Producción, C. E. I. y P. y el M. del A. A. y T. E. (2024). *Estrategia Nacional de Economía Circular Inclusiva*.

Mosquera Palomino, J., & Vélez Gómez, C. I. (2023). Protocolo para el reciclaje de los residuos de yesos generados en los procesos de elaboración de prótesis dentales en una

Institución Universitaria de Medellín. *Ustasalud*, *22*(2). https://doi.org/10.15332/us.v22i2.2970

Myszograj, M. (2023). Dental Waste - Management and Statistics. *Civil and Environmental Engineering Reports*, *33*(2), 55–63. https://doi.org/10.59440/CEER/172514

Naciones Unidas. (2020). *#SDGsinAcademia: Centro ODS para el Objetivo 12 | Naciones Unidas*. https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/sdgsinacademia-centro-ods-para-el-objetivo-12

Naciones Unidas. (2030). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks

Nicolás Capricho Marocci (CTplas), Andrés Olivera (LATU), Stella Cristóbal (LATU), & Mónica Martínez Cuevas (LATU). (2021). *ECODISEÑO CIRCULAR Segunda edición Abril 2022*.

Ojeda, P. C. (2020). *Sesión 4 Universo, población y muestra*.

Paradiso, A., Mendoza, I., Bellafato, A., & Lamberson, L. (2020a). Failure behavior of woven fiberglass composites under combined compressive and environmental loading. *Journal of Composite Materials*, *54*(4), 519–533. https://doi.org/10.1177/0021998319878771

Paradiso, A., Mendoza, I., Bellafato, A., & Lamberson, L. (2020b). Failure behavior of woven fiberglass composites under combined compressive and environmental loading. *Journal of Composite Materials*, *54*(4), 519–533. https://doi.org/10.1177/0021998319878771

Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., & Dash, R. R. (2009a). A comparative study on different ceramic fillers affecting mechanical properties of glass "polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *28*(11), 1305–1318. https://doi.org/10.1177/0731684407086589

Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S. S., & Dash, R. R. (2009b). A comparative study on different ceramic fillers affecting mechanical properties of glass "polyester composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *28*(11), 1305–1318. https://doi.org/10.1177/0731684407086589

Ponnapalli, S. V., Robbi, K., Alla, R. K., Vasavi, M., DeviMedicharla, U., AV, R., & Sajjan MC, S. (2023). Evaluation of physico-mechanical properties of dental plaster modified with pulverized acrylic waste. *International Journal of Dental Materials*, *05*(01), 01–08. https://doi.org/10.37983/IJDM.2023.5101

Presidencia de la República del Ecuador. (2017). *Código Orgánico del Ambiente*. www.lexis.com.ec

Rajak, D. ; K. ;, Joshi, T. ;, Singh, D. K. ;, Mondal, D. P., Fantozzi, G., Halloran, J. W., Shrivastava, S., Kumar Rajak, D., Joshi, T., & Singh, D. K. (2024). Ceramic Matrix

Composites: Classifications, Manufacturing, Properties, and Applications. *Ceramics 2024, Vol. 7, Pages 652-679*, *7*(2), 652–679. https://doi.org/10.3390/CERAMICS7020043

Ramos-Galarza, C. (2021). Editorial: Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica*, *10*(1), 1–7. https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356

Reddy Palle, R., Schuster, J., Pasha Shaik, Y., & Kazmi, M. (2022). Fabrication and Characterization of Glass Fiber with SiC Reinforced Polymer Composites. *Open Journal of Composite Materials*, *12*(01), 16–29. https://doi.org/10.4236/OJCM.2022.121002

Said Rojas Pérez. (2022). *Uso de las resinas compuestas reforzadas con fibras de vidrio*.

Sakshi Sharma. (2020). *DT News - India - Proyectando un futuro verde: Reciclando los productos dentales de yeso - Sakshi Sharma*. https://in.dental-tribune.com/news/casting-a-green-future-recycling-the-gypsum-dental-products-sakshi-sharma/

Salán Ballesteros, M. N. (2005). Tecnología de proceso y transformación de materiales. *Tecnología de Proceso y Transformación de Materiales*. https://doi.org/10.5821/EBOOK-9788498802924

Sonia Elena Pineda-Higuita, Sarah Moreno Callejas, & Jessica Flórez Rivera. (2018). *ARTÍCULO ORIGINAL*. https://doi.org/10.22519/21455333.957

STRONGWELL. (2020). *FRP Specifications Section 06 71 00 Fiberglass Reinforced Polymer (FRP) Structural Shapes/Plate and Fabrications*. www.strongwell.com

Toledo, M. C., Álvarez, E. M., & Jiménez, D. S. (2023). TÉCNICAS DE MUESTREO PROBABILÍSTICO PARA INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS DE LA SALUD. *La Producción de Conocimiento En Ciencias de La Salud*, 13–23. https://doi.org/10.22533/AT.ED.8802311102

Trauth, A., Pinter, P., & Weidenmann, K. A. (2017). Investigation of Quasi-Static and Dynamic Material Properties of a Structural Sheet Molding Compound Combined with Acoustic Emission Damage Analysis. *Journal of Composites Science*, *1*(2), 18. https://doi.org/10.3390/jcs1020018

Unlimited Designs. (2020). *Glass Fiber Reinforced Gypsum (GFRG) | Unlimited Designs*. https://unlimiteddesigns.com/gfrg_product_data/

Villacreses Medina, M. E., & Tasipanta Suntasig, B. J. (2017). *PIUAODONT042-2017*.

Viviana Cifuentes, & María Mateos. (2022). *Cómo gestionar los residuos de tu clínica dental*. www.dentaltix.com

V-ROD 46. (2019). *V-ROD-Spec-Sheet-46-GPA-DEC-2019-EN*.

Walter Chaverri Carvajal. (2012). *UNIVERSIDAD LATINOAMERICANA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA TUTORA: DRA RITA MARIA MARIN NARANJO*.

William McDonough, & Michael Braungart. (2005). *CRADLE TO CRADLE (DE LA CUNA A LA CUNA)*.

Yousif, T., & Moalosi, R. (2024). The Role of Industrial Designers in Achieving the Green Economy Through Recycling. *Journal of Engineering*, *2024*(1), 7291504. https://doi.org/10.1155/2024/7291504

Zaghloul, M. Y., Zaghloul, M. M. Y., & Zaghloul, M. M. Y. (2022). Influence of Stress Level and Fibre Volume Fraction on Fatigue Performance of Glass Fibre-Reinforced Polyester Composites. *Polymers*, *14*(13), 2662. https://doi.org/10.3390/POLYM14132662

Zakiyuddin, A., Joesiana, D., Khoirurrijal, R. A., & Astutiningsih, S. (2020). Recyclability of Dental Gypsum via Calcination. *Materials Science Forum*, *1000*, 90–96. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.1000.90

Zhermack. (2024). *ELITE DENTAL STONES Yesos por la preparación de modelos*.

ANEXOS

Resultados tracción

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	ensayo traccion.xtas	Nombre de metodo de ensayo	traccion ASTM D638.xmas
Fecha de informe	5/19/2025	Fecha de ensayo	5/19/2025
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Traccion
Velocidad	5mm/min	Forma	Plana
N°de partidas:	1	N°de muestras:	4

Nombre	Elastico_Devided	Rotura_Fuerza	Rotura_Tension	Rotura_Desplazamiento
Parametros	10 Intervalos:	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10	Sensibilidad 10
Unidad	GPa	N	N/mm2	mm
1 _ 1	4.80136	741.212	28.7291	0.61073
1 _ 2	5.62897	1103.54	41.3622	0.88243
1 _ 3	4.35612	-.-	-.-	-.-

Nombre	Rotura_Deformacion	Max._Fuerza	Max._Tension	Max._Desplazamiento
Parametros	Sensibilidad 10	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1 _ 1	0.91154	747.864	28.9870	0.59575
1 _ 2	1.33702	1141.10	42.7700	0.86410
1 _ 3	-.-	511.058	18.6790	0.41742

Nombre	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas
Unidad	%
1 _ 1	0.88918
1 _ 2	1.30924
1 _ 3	0.61385

Yeso Odontológico reprocesado

Proceso de fabricación material compuesto

Matriz material compuesto

Corte CNC de probetas para ensayos