

DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ CERÁMICA DE ÓXIDO DE
MAGNESIO PARA APLICACIONES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

KATY DENYS RAMÍREZ MORENO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA
DOCTORADO EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2023

**DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ CERÁMICA DE ÓXIDO
DE MAGNESIO PARA APLICACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN**

KATY DENYS RAMÍREZ MORENO

Tesis para optar el título de Doctor en Ingeniería

DIRECTOR

CATALINA ÁLVAREZ LÓPEZ. Ph.D

Ingeniera Agroindustrial

COMITÉ TUTORIAL

PhD. LUIS FELIPE LALINDE CASTRILLON

PhD SANTIAGO BETANCOURT PARRA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERIA

DOCTORADO EN INGENIERÍA

MEDELLÍN

2023

Declaración de originalidad

Declaro que esta tesis no ha sido presentada con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad". Art. 92, parágrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'D. Benito A. F.', written in a cursive style.

Firma

DEDICATORIA

A mi padre Roberto Emérito Ramírez Correa (q.e.p.d), quien desde el cielo siempre me protege y guía.

A mi madre, pues sin ella no lo habría logrado, su bendición diaria me acompaña siempre.

A mi esposo, hijos y hermanas, quienes me brindaron su apoyo, comprensión y me cedieron parte del tiempo que les correspondía, para que yo pudiera estudiar.

AGRADECIMIENTOS

Infinitas gracias a Dios por ayudarme a obtener este gran logro.

A la Universidad Tecnología del Chocó y al proyecto Formación de Alto Nivel para un Nuevo Chocó, por permitir la realización de este estudio.

Un agradecimiento muy especial a mi directora de tesis, Ph.D Catalina Álvarez López, por su orientación, guía, apoyo y confianza brindada durante el desarrollo de esta investigación. Así mismo al PhD Santiago Betancur Parra y al PhD Luis Felipe Lalinde Castrillón por su total apoyo.

A los integrantes del Grupo de Investigación en Nuevos Materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana - GINUMA, por su acogida, apoyo y sabios consejos.

A los laboratoristas de resistencia de materiales, máquinas y herramientas, análisis térmico, microscopía electrónica de barrido y operaciones unitarias de la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín, por su colaboración en la caracterización de los materiales.

A la Universidad de los Andes, especialmente a la PhD Alicia Porras Holguín y al PhD Fernando Ramírez Rodríguez, por permitirme realizar la pasantía y guiarme durante la ejecución.

Finalmente, gracias a Dios por ponerlos en mi camino.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	1
Planteamiento del problema y justificación	4
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 Situación actual del conocimiento en el área de la investigación – Acuerdo de Paris	9
2.2 Estudios relacionados con el desarrollo de materiales a base de óxido de magnesio	9
2.3 Estudios del desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras vegetales	15
2.3.1. Estudios del desarrollo de materiales a base de óxido de magnesio reforzados con fibras vegetales.....	17
2.3.2. Estudios relacionados con el desarrollo de materiales a base de cemento Portland reforzados con fibras vegetales	19
2.3.3. Estudios de compatibilidad entre la matriz cementicia – fibras vegetales, y efecto de las variables del proceso en las propiedades y comportamiento de los composites	23
2.4 Estudios de análisis del ciclo de vida del cemento Portland, cemento oxiclорuro de magnesio y algunos materiales cementantes	27
2.4.1. Etapas de un análisis de ciclo de vida	29
3. OBJETIVOS	60
3.1 Objetivo general	60
3.2 Objetivos específicos	60
4. HOJA DE RUTA DE LA TESIS	61
5. FASE I - ESTABLECIMIENTO DE UNA METODOLOGIA PARA LA OBTENCION DE UN MATERIAL CEMENTICIO A BASE DE OXIDO DE MAGNESIO A PARTIR DE DIFERENTES RELACIONES MOLARES	62
5.1 Materiales	63
5.2 Métodos.....	63
5.2.1 Preparación de las muestras	63
5.2.2 Caracterización de las muestras de óxido de magnesio.....	64
5.2.3 Caracterización de los materiales	66
5.3 Resultados y discusión	67
5.3.1 Composición química, Densidad y área superficial de las muestras de MgO	67

5.3.2	Propiedades de los materiales obtenidos	68
5.4	Conclusiones	76
6.	EVALUACION DEL EFECTO DE LA INCORPORACION DE CASCARILLA DE ARROZ EN LA MATRIZ CEMENTICIA A BASE DE OXIDO DE MAGNESIO	77
6.1	Materiales	77
6.2	Métodos	78
6.2.1	Mergerización de la cascarilla de arroz	78
6.2.2	Preparación de los materiales a base de óxido de magnesio reforzados con cascarilla de arroz	78
6.2.3	Caracterización de la cascarilla de arroz y del material compuesto	79
6.2.4	Caracterización del material compuesto.....	82
6.3	Resultados y discusión	82
6.3.1	Análisis físico de la cascarilla de arroz	82
6.3.2	Análisis químico de la cascarilla de arroz	85
6.3.3	Análisis de las propiedades del material compuesto	86
6.4	CONCLUSIONES	109
7.	ANALISIS ASPECTOS AMBIENTALES ASOCIADOS AL PROCESO DE FABRICACION DE UN MATERIAL CEMENTICIO A BASE DE OXIDO DE MAGNESIO	111
7.1	Metodología	112
7.2	Resultados y discusión	112
7.2.1.	Análisis de impactos ambientales del MOC.....	117
7.2.2.	Análisis de alternativas para la disminución de los impactos	120
7.2.3.	Desafíos.....	122
7.3.	Conclusiones	124
8.	CONCLUSIONES	125
9.	RECOMENDACIONES	127
10.	TRABAJOS FUTUROS	128
	REFERENCIAS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes de los materiales compuestos [53]	15
Figura 2.2 Etapas para el análisis del ciclo de vida (ACV).....	29
Figura 2.3 Alcances de un ACV [91]	30
Figura 2.4 Alcance comparativo CP Vs MOC [27]	30
Figura 2.5 Impactos ambientales determinados por el método CML 2000 en la producción de clíinker para tres escenarios [21].....	33
Figura 2.6 Comparación de resultados de caracterización de cuatro escenarios [44]	36
Figura 2.7 Comparativo de categorías de impactos de la producción de CP y MgO [27]	38
Figura 2.8 Comparación de las emisiones de gases efecto invernadero de diferentes tipos de paneles [95]	40
Figura 2.9 Categorías de impacto de cada aglutinante [96]	42
Figura 2.10 Comparación de impactos ambientales de 1.0 kg de concreto MOC preparado con MgO obtenido de la ruta del proceso seco (calcinación de magnesita) y 1.0 kg de concreto MOC preparado con MgO obtenido de la ruta del proceso húmedo (sintetizado a partir de agua de mar); y 1.0 kg de hormigón CP [97]	43
Figura 2.11 Comparativo de emisiones de GEI de diferentes tipos de tableros [80]	44
Figura 2.12 Potencial de calentamiento global GWP 100a [98]	45
Figura 2.13 ACV de morteros con rMgO fabricado por Ruta seca (izquierda) y ruta húmeda (derecha) [99]	47
Figura 2.14. Impacto de las industrias del cemento en el ecosistema natural [5]	48
Figura 2.15 Comparación de los ACV de los diferentes escenarios	50
Figura 2.16 GWP informado en kg CO ₂ eq/m ³ (en escala logarítmica) de las etapas de producción y construcción de materiales para 3DCP y métodos de construcción de hormigón convencionales [100]	52
Figura 2.17 Resistencia a flexión y compresión de los grupos del mortero de cemento de desechos sólidos después de 3, 7 y 28 días [103]	55
Figura 2.18 Resultados de caracterización de cemento de residuos y el cemento convencional [103]	56
Figura 2.19 Resultados de resistencia a la compresión para la mezcla propuesta y mezcla control [29]	57
Figura 2.20 Comparativo de resultados cemento Portland Vs nuevo material cementante, asociado cambio climático [29]	59
Figura 5.1 Isotermas de adsorción/desorción de nitrógeno a 77 K	68
Figura 5.2 Izquierda: Resistencia a la compresión a los 7 días. Derecha: Densidad.....	70
Figura 5.3 Izquierda: Absorción de agua. Derecha: Contenido de humedad	71
Figura 5.4 Difractogramas 1) MOC 1 = 12.5:1-15:1, 2) MOC 2= 14.8:1-15:1, 3) MOC 3 = 16.1:1-15:1, 4) MOC 4=18.8:1-15:1	72
Figura 5.5 Imágenes SEM: a)12.5:1 – 15:1, b) 14.8:1 – 15:1, c) 16.1:1 – 15:1, d) 18.8:1 – 15:1	74
Figura 5.6 EDS 18.8:1 – 15:1	75
Figura 6.1 Diseño experimental elaboración del material compuesto	79
Figura 6.2. Distribución promedio de tamaño de partículas	83
Figura 6.3 Imágenes SEM de la cascarilla de arroz a) sin tratamiento, b) al 5% de NaOH, c) al 10% NaOH.	84

Figura 6.4 Materiales compuestos elaborados	86
Figura 6.5 Densidad MOC-CA	87
Figura 6.6 Porcentaje de absorción de agua (superior) y contenido de humedad (inferior).....	87
Figura 6.7 Resultados compresión a los 7 días. Izquierda: resistencia máxima. Derecha: módulo ..	90
Figura 6.8 Resistencia a la compresión a los 28 días	94
Figura 6.9 Resultados flexión a los 7 días.....	97
Figura 6.10 Resultados flexión a los 28 días.....	99
Figura 6.11 DRX material compuesto MOC-CA: corrida 0=0 % F-0 % NaOH, corrida 1, corrida 2, corrida 4, corrida 5, corrida 7	102
Figura 6.12 Micrografías SEM de muestras tomadas de superficies fracturadas.....	105
Figura 6.13 Análisis interfacial - Composites con 1,5% de fibra. a) 0% de tratamiento, b) 5% de tratamiento, c) 10% de tratamiento	106
Figura 6.14 SEM (análisis interfacial) corridas 2, 3,5, 6, 8 y 9.....	108
Figura 7.1 Número de artículos seleccionados sobre la evaluación ambiental de materiales cementantes, por año de publicación.....	113
Figura 7.2 Categorías de impactos evaluadas en los ACV de los artículos revisados	117
Figura 7.3 Alternativas para mejorar el comportamiento ambiental de la producción de cemento	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Tratamiento a las fibras	25
Tabla 2.2 Desarrollo del análisis de ciclo de vida a través de los [87].....	28
Tabla 2.3 Caracterización y evaluación de daños [21].....	34
Tabla 2.4 Valores de caracterización del potencial de calentamiento global, en CO ₂ eq, para la producción de 1 kg de clínker en las plantas de cemento (CP) evaluadas [89].....	43
Tabla 2.5 Impacto de las plantas de cemento en el aire, suelo, agua y salud de la población [5]	49
Tabla 2.6 Resultados de caracterización a nivel de punto medio para 1 t de cemento en los casos 1 (business-as-usual, 2014), 2 (Escenario 2 °C, 2030) y 3 (Escenario bajo en carbono, 2030) [101] .	53
Tabla 2.7 Esquema de prueba de cada grupo [103]	55
Tabla 2.8 Resultados ACV nuevo material cementante [29]	58
Tabla 5.1. Formas de preparar la mezcla.....	63
Tabla 5.2 Relaciones molares para preparar las muestras	64
Tabla 5.3 Condiciones de desgasificación	65
Tabla 5.4 Condiciones de análisis de adsorción/desorción de N ₂ a 77 K.....	65
Tabla 5.5 Valores de densidad del óxido de magnesio	68
Tabla 5.6 Resultados a la compresión a los 7 días de los materiales a base de (MgO impuro)	69
Tabla 5.7 Resistencia a la compresión (MPa) a los 7 días de los materiales a base de MgO puro y de cemento Portland.....	69
Tabla 5.8 Propiedades MOC seleccionados	72
Tabla 5.9 Análisis comparativo - Resultados DRX y SEM	75
Tabla 5.10 Porcentaje en masa de elementos presentes en el MOC	75
Tabla 6.1 Orden experimental para la elaboración del material compuesto	78
Tabla 6.2 Análisis físico de la cascarilla de arroz analizada	83
Tabla 6.3 Análisis químico de la cascarilla de arroz	85
Tabla 6.4 Resistencia a la compresión a los 7 días	89
Tabla 6.5 Módulo de elasticidad a los 7 días	89
Tabla 6.6 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a compresión 7 días	91
Tabla 6.7 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad 7 días.....	92
Tabla 6.8 Resistencia a la compresión a los 28 días	93
Tabla 6.9 Módulo de elasticidad a los 28 días	93
Tabla 6.10. Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a la compresión a los 28 días	95
Tabla 6.11 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad compresión a los 28 días.....	95
Tabla 6.12 Resistencia a la flexión a los 7 días.....	96
Tabla 6.13 Módulo a los 7 días	96
Tabla 6.14 . Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a la flexión a los 7 días	98
Tabla 6.15. Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad flexión 7 días	98
Tabla 6.16 Resistencia a la flexión a los 28 días.....	99
Tabla 6.17 Módulo a los 28 días	99

Tabla 6.18 . Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a la flexión a los 28 días	100
Tabla 6.19 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad flexión a los 28 días	100
Tabla 7.1 Resumen de impactos ambientales de materiales cementantes disponibles en la literatura revisada	114
Tabla 7.2 Potencial de calentamiento global de materiales cementantes – GWP	117
Tabla 7.3 Comparativo de categorías de impacto CP-MOC	119
Tabla 7.4 Ventajas de las alternativas identificadas para disminuir los impactos ambientales.....	121

ABREVIATURAS

CP: Cemento Portland

CaCO₃: Carbonato de calcio, caliza

MOC: Cemento oxiclورو de magnesio

MgCO₃: Carbonato de magnesio, magnesita

MgO: Óxido de magnesio

rMgO: Óxido de magnesio reactivo

MgCl₂: Cloruro de magnesio

CA: Cascarilla de arroz

SCM: Materiales cementicios suplementarios

ISO: Organización Internacional de Normalización

ACV: Análisis de ciclo de vida

CO₂: Dióxido de carbono

NO_x: Óxidos de nitrógeno

SO_x: Óxidos de azufre

GEI: Gases efecto invernadero

GWP: Potencial de calentamiento global

ADP E: Disminución de elementos abióticos

ADP F: Disminución de combustibles fósiles

AP: Potencial de acidificación

EP: Potencial de eutrofización

WCP: Disminución del agua

IRP: Radiación ionizante

SOP: Disminución de recursos minerales

FAETP: Ecotoxicidad de agua dulce

MAETP: Ecotoxicidad marina

EOFP: Calidad del ecosistema

POCP: Formación de oxidantes fotoquímicos

PMFP: Formación de material particulado

LOP: Ocupación del terreno agrícola

TP: Ecotoxicidad terrestre

ODP: Disminución de la capa de ozono

IPCC: Panel intergubernamental sobre el cambio climático

GWI: Intensidad o impacto del calentamiento global

ICF: Encofrados o formas de concreto aislado

ASTM: American Society for Testing and Materials

RESUMEN

En esta investigación se estableció una metodología para la obtención de un material cementicio a base de óxido de magnesio a partir de la evaluación de diferentes relaciones $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ y $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2$. De acuerdo a los resultados obtenidos y la consistencia de las pastas, se prepararon nuevas muestras utilizando las relaciones molares $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ (12.5:1, 14.8:1, 16.1:1, 18.8:1) y manteniendo constante $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2$ (15:1). A los 7 días se analizó la resistencia a la compresión, contenido de humedad, porcentaje de absorción de agua, morfología del material mediante microscopía electrónica de barrido y detalles estructurales mediante difracción de rayos X. También se evaluó el efecto de la incorporación de la cascarilla de arroz y el tratamiento con NaOH sobre propiedades mecánicas. La interacción interfase fibra-matriz, se evaluó de manera cualitativa, se analizaron las cargas ambientales del proceso de fabricación del cemento oxiclورو de magnesio y se compararon con las del proceso de fabricación del cemento Portland u otros semejantes reportados en la literatura. Se logró comprobar la capacidad cementante del material y se encontró que el material elaborado con la relación molar $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ (12.5:1) y $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2$ (15:1), presentó las mejores propiedades. A partir del análisis de varianza resultado del diseño de experimentos factorial 3^k se encontró que el porcentaje de fibra tuvo un efecto estadísticamente significativo en la resistencia y el módulo, del material compuesto reforzado con cascarilla de arroz mercerizada, a los 28 días. El mejor material compuesto obtenido, derivado de los diferentes tratamientos propuestos en el diseño de experimentos factorial 3^2 fue el compuesto con 1.5% de fibra tratada con 5% de hidróxido de sodio. Los análisis de ciclos de vida muestran que la categoría de impacto ambiental más evaluada a nivel mundial es el potencial de calentamiento global (GWP). y, se encontró que la producción del CP provoca más impactos ambientales.

Palabras claves: Cemento Oxiclورو de magnesio, MOC, Óxido de magnesio, cascarilla de arroz, mercerización, material compuesto, Análisis de ciclo de vida, ACV, LCA, SEM, DRX, GWP

ABSTRACT

In this investigation, a methodology was established to obtain a cementitious material based on magnesium oxide from the evaluation of different ratios $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ and $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2$. According to the results obtained, and the consistency of the pastes, new samples were prepared using the molar ratios $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ (12.5:1, 14.8:1, 16.1:1, 18.8:1) and keeping constant $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2$ (15: 1). After 7 days, the compressive strength, moisture content, percentage of water absorption, morphology of the material by scanning electron microscopy and structural details by X-ray diffraction were analyzed. The effect of the incorporation rice scale was also evaluated, and the treatment with NaOH on mechanical properties, the fiber-matrix interface interaction was qualitatively evaluated. The environmental loads of the magnesium oxychloride cement manufacturing process were also analyzed and compared with those of the Portland cement manufacturing process, or other similar processes reported in the literature. It was possible to verify the cementing capacity of the material and it was found that the material which elaborated with the molar ratio $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ (12.5:1) and $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2$ (15:1), presented the best properties. From the analysis of variances resulting from the 3^k factorial design of experiments, it was found that the percentage of fiber had a statistically significant effect on the resistance and modulus of the composite material reinforced with mercerized rice husks at 28 days. The best composite material obtained, derived from the different treatments proposed in the factorial 3^2 design of experiments, was the composite with 1.5% fiber treated with 5% sodium hydroxide. Life cycle analysis shows that the most evaluated environmental impact category worldwide is global warming potential (GWP), and it was found that the production of PCs causes comparatively more environmental impact.

Key words: Magnesium oxychloride Cement, MOC, Magnesium oxide, rice husk, mercerization, composite materials, MOC, Life cycle assessment, ACV, LCA, SEM, DRX, GWP

1. INTRODUCCION

Uno de los objetivos del desarrollo sostenible es adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, que actualmente se identifica como un problema mundial. En la década de 1980 la Organización de las Naciones Unidas introdujo el concepto de desarrollo sostenible y lo definió como el “desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” [1]. Un problema importante al que se enfrenta la humanidad es el aumento de la población mundial y la presión asociada sobre el entorno construido. El actual ritmo de desarrollo social empieza a tener efectos visibles en el medio ambiente. En los últimos años, en todo el mundo, los líderes han estado tratando de adoptar e implementar soluciones para disminuir el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático COP26 en Glasgow, en noviembre de 2021, adoptó un programa para intensificar los esfuerzos de implementación de objetivos y acciones para el empoderamiento del cambio climático de modo que todos los miembros de la sociedad participen [2]. Uno de los mayores desafíos en este esfuerzo está relacionado con la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y detener los efectos del cambio climático [3].

El cambio climático inducido por el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) antropogénico es la mayor amenaza medioambiental del siglo XXI. Los niveles actuales de CO₂ en la atmósfera están aumentando a un ritmo de 1,85 ppm/año y llegaron a 400,11 ppm en 2015. Esto ha llevado a un creciente interés en las prácticas sostenibles en consonancia con la mayor presión sobre las industrias para desarrollar tecnologías alternativas con emisiones de CO₂ reducidas [4], con una gestión eficiente y eficaz de los recursos naturales para su conservación, y la eliminación de desechos industriales tóxicos, los cuales también son objetivos importantes para el crecimiento y el desarrollo económico. Del mismo modo, es fundamental apoyar y empoderar a las empresas, los negocios y los clientes en los países en desarrollo para lograr un desarrollo económico sostenible [5]. Uno de los mayores desafíos en este esfuerzo está relacionado con la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y detener los efectos del cambio climático [3]. Esto ha llevado a un creciente interés en las prácticas sostenibles en consonancia con la mayor presión sobre las industrias para desarrollar tecnologías alternativas con emisiones de CO₂ reducidas [4].

Los métodos de reducción de materia prima juegan un papel fundamental en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en cualquier industria, lo que da como resultado productos más sostenibles y con menos emisiones de carbono [5]. Hasta la fecha, la forma más eficaz de reducir

las emisiones de CO₂ durante la producción del cemento Portland, es reducir el contenido de Clinker mezclando cementos con materiales cementicios suplementarios (SCM) [4] [6]. Estos SCM generalmente son escoria de alto horno granulada molida, cenizas volantes, humo de sílice y piedra caliza [6]. También pueden ser residuos industriales y agrícolas como por ejemplo la cascarilla de arroz y su ceniza, ya que su incorporación reduce el contenido de cemento y así, disminuye la emisión de carbono ocasionando beneficios ambientales [7]. Dadas todas las implicaciones ambientales de la industria de la construcción, el interés por los materiales de construcción alternativos ha ido creciendo continuamente en las últimas décadas. Los compuestos ambientalmente sostenibles se estudian cada vez más y se utilizan en la práctica para reducir las emisiones artificiales de los procesos industriales y, por lo tanto, el deterioro gradual del medio ambiente. La búsqueda de una alternativa para el Cemento Portland (CP) ha sido previamente descrita en la literatura, mostrando el gran potencial de cementos alternativos como el cemento a base de óxido de magnesio reactivo. Últimamente, el interés por cementos a base de óxido de magnesio reactivo se centra principalmente en el cemento de oxiclورو de magnesio (MOC). La incorporación de materiales como la ceniza de la cáscara de arroz reducen el contenido de cemento y así, disminuye la emisión de carbono ocasionando beneficios ambientales [7].

Recientemente se ha verificado el uso de aglutinantes alternativos al cemento Portland, como por ejemplo el cemento de oxiclورو de magnesio (MOC: magnesium oxychloride cement), el cual es considerado como un material prometedor. El MOC es un material preparado a través de la reacción química del óxido de magnesio y cloruro de magnesio en una solución. Comparado con el cemento Portland, el MOC tiene propiedades superiores, no necesita curado húmedo, tiene alta resistencia al fuego, baja conductividad térmica y buena resistencia a la abrasión; además, se puede utilizar con diferentes agregados y/o fibras reforzantes con buena resistencia a la adherencia [8] [9], generando así un material compuesto que aporta menos impactos negativos al medio ambiente.

El cemento Sorel, también llamado cemento de oxiclورو de magnesio, cemento magnesiano o MOC, fue descubierto en 1.867 por Stanislas Sorel [10]–[12] se inventó poco después del cemento Portland. Se forma mezclando óxido de magnesio en polvo con una solución concentrada de cloruro de magnesio, dado que la disolución de cloruro de magnesio es a su vez una mezcla de MgCl₂ y agua, para el fraguado son necesarios tres componentes: MgO (magnesita cáustica calcinada), MgCl₂ (cloruro de magnesio) y H₂O (agua) [10] [13] [14]; la mezcla de estos componentes en diferentes proporciones da como resultado la conformación del material cementicio. Este cemento, es químicamente ligado y secado al aire. En virtud de estas ventajas, el cemento MOC se ha utilizado convencionalmente para la fabricación de suelos industriales, muelas abrasivas y una variedad de

paneles con diferentes funciones específicas, como decoración, protección contra incendios, y aislamientos acústicos y térmicos [9].

Colombia es un país agroindustrial que produce grandes cantidades de residuos, que si bien contribuyen a los problemas de contaminación ambiental, son una abundante biomasa renovable de baja densidad que se pueden utilizar en muchos procesos para diseñar productos de valor agregado, como materiales de construcción [15]. Dentro de los materiales renovables que se pueden usar en la industria de la construcción para reforzar el concreto están algunos residuos de la industria agrícola, entre los cuales están las fibras vegetales; lo cual ayuda a los países a incrementar su desarrollo económico, ambiental y social. El concreto reforzado con fibras vegetales ha sido utilizado a nivel mundial, ya que éstas disminuyen los costos y ahorran energía durante el proceso de producción, en comparación con otros tipos de fibras [16]. El uso de las fibras naturales, productos de los residuos agrícolas, ayudan a disminuir la contaminación ambiental. La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados con los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en ese sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV) [17].

Con el desarrollo del presente proyecto no se busca remplazar totalmente el uso del cemento Portland como matriz para composites reforzados con fibras vegetales, debido al nivel de optimización del proceso de producción de este, la disponibilidad de las materias primas que se necesitan para su producción y la confianza que ya tiene el mercado para su producción, pero se trata de la exploración de una alternativa para mitigar las emisiones de CO₂ y así ayudar a disminuir el cambio climático. Todo lo anterior muestra una oportunidad en el campo investigativo. Esta investigación también pretende aportar a una economía circular, definida según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE (agosto, 2020) como un sistema de producción y consumo que promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía; teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales a través de la implementación de innovaciones tecnológicas, alianzas y colaboraciones entre actores, y el impulso de modelos de negocio que respondan a los fundamentos del desarrollo sostenible; ya que se usan los residuos generados por la industria arrocera para reforzar materiales a base de óxido de magnesio, logrando así una producción más limpia.

Planteamiento del problema y justificación

Para el desarrollo social y económico de una región, se piensa que el sector de la construcción es el más productivo, ya que provee vivienda, edificaciones e infraestructura a una población en crecimiento y en proceso de urbanización continua, especialmente en los países en desarrollo. El cemento Portland y el concreto han sido materiales esenciales para la urbanización de la sociedad, donde anualmente se generan alrededor de 10 mil millones de toneladas de concreto en el mundo [18]. No obstante, este sector también ha sido un referente mundial en temas de contaminación ambiental, ya que requiere un alto consumo de energía, implica la explotación de recursos naturales como canteras, emite gases contaminantes como CO₂, SO₂, y NO_x [19] [20] y, además, produce una cantidad significativa de residuos. Para mitigar este impacto, debe existir un balance de modo que no se comprometa la sostenibilidad del medio ambiente.

El sector de la construcción es conocido como uno de los mayores consumidores de recursos naturales y un importante productor de emisiones de CO₂ [1]. Este sector es responsable de generar altas tasas de emisiones de GEI y de residuos de construcción y demolición, además del consumo desmesurado de recursos abióticos y energía no renovables [1]. Las mayores emisiones de estos gases se registran en la producción de cemento, con una producción aproximada del 5-10% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) [2] [21], ocupando el segundo puesto como emisor de CO₂ industrial a nivel mundial. La producción de cemento se encuentra entre los sectores con mayores emisiones en el mundo, representando alrededor del 25-27% de las emisiones totales de la industria, con aproximadamente el 5-7% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial [4] [20] [22] [23] [24].

Las altas emisiones de CO₂ (660.820 kg de CO₂ por tonelada de cemento) durante la fabricación del cemento Portland se deben a la calcinación de la piedra caliza y la arcilla, es decir, por la descomposición de CaCO₃ en CaO y CO₂, que es equivalente al 60% del CO₂ emitido. El resto de CO₂ emitido proviene de la energía consumida durante este proceso [25]. Otros problemas ambientales asociados con el cemento incluyen el transporte de materias primas, combustibles, Clínter y cemento, y el impacto de la minería, el agotamiento de los recursos y la generación de desechos [21].

En una planta moderna de cemento la producción de una tonelada de Clínter implica la emisión de 0,8 a 1,2 toneladas de CO₂ [26]. Este CO₂ llega a la atmósfera y se convierte en uno de los principales causantes del cambio climático, afectando a toda la población mundial; de ahí la necesidad de ayudar al planeta realizando actividades que ayuden a mitigar tales efectos. En 2013, las emisiones globales de CO₂ fueron de 36 Gton (9,9 Gt onde C) debido al uso de combustible y la producción de cemento. Este es un aumento del 61% desde 1990 en comparación con un aumento del 2,3% en 2012.

La cantidad de CO₂ emitido depende en gran medida del método de fabricación y del tipo de combustible utilizado durante la producción [27]. Además del CO₂, las emisiones a la atmósfera de las plantas cementeras incluyen otros contaminantes como partículas de óxido de nitrógeno (NO_x), óxido de azufre (SO₂) y algunos contaminantes menores, que van desde impactos ambientales locales hasta globales.

En Colombia, las emisiones de CO₂ durante 2018 fueron de 90.045 kilotoneladas, las cuales crecieron 3.812 kilotoneladas respecto a 2017, correspondiente a un 4,42%. Con estos datos, Colombia es el país número 140 del ranking de países por emisiones de CO₂, de un total de 184 países, en el que se ordenan los países de menos a más contaminantes [26]. Además de sus emisiones totales de CO₂ a la atmósfera, que lógicamente dependen entre otras variables de la población del país, es conveniente analizar el comportamiento de sus emisiones per cápita: en 2018, las emisiones per cápita de CO₂ fueron de 1,82 toneladas por habitante, y emitió 0,14 kilos por cada \$1.000 de PIB, más que en 2017 [26].

En cuanto al tema energético, el sector de la construcción es responsable de 12–15% del uso de energía industrial en todo el mundo [28]. La industria de producción del cemento Portland es el tercer consumidor más grande del mundo. La producción del cemento no es sostenible, actualmente se estima que se producen 4,1 millones de toneladas métricas de cemento en todo el mundo, con un consumo de 10,5 EJ. Para el año 2050, el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) pronostica que habrá un aumento entre el 12 y 23% en su producción, lo que podría aumentar su participación en la contaminación mundial [29]. Se requiere aproximadamente 1.757 KJ para obtener un kilogramo de cemento [25]. Para la fabricación de este material se necesitan temperaturas muy altas, entre 1.400 y 1.500 °C, lo que permite que se lleven a cabo todas las reacciones químicas que conducen a la formación del Clinker del cemento Portland [18] [19] [25]. Además de la calcinación, los procesos de molienda de las materias primas y de los componentes del cemento final también tienen un alto consumo de energía [19]. Se estima que la energía consumida por la industria cementera es alrededor de un 3% del consumo global [20]. Una opción para esta problemática es el uso de combustibles alternativos o energías renovables, o sustituir el cemento Portland por materiales con bajo contenido de carbono que requieran una menor demanda energética [25]. La intensidad energética media de la producción de cemento está entre 4 y 6 GJ/ton, dependiendo de los diferentes procesos de producción [28].

Además del alto consumo energético y emisiones de CO₂, la industria cementera es una industria en donde se explotan recursos naturales (canteras) [20]. Dentro de los recursos consumidos en el sector de la construcción, el más representativo es el cemento, en especial el cemento Portland ordinario.

Considerando los problemas medio ambientales generados por la industria del cemento, la comunidad científica está interesada en obtener alternativas cementantes que puedan remplazar parcial o totalmente el cemento Portland, que sean menos agresivas con el medio ambiente. Una solución es utilizar nuevos tipos de materiales que pueden tener un menor impacto ambiental y un mejor rendimiento de ingeniería en la industria de la construcción, como el cemento nanoestructurado, el cemento geopolímero, y el cemento de oxiclورو de magnesio (MOC) [30].

Los cementos de oxiclورو de magnesio (MgO) se proponen como un aglutinante potencialmente sostenible debido a sus temperaturas de producción más bajas (~700 frente a 1.450 °C) que el cemento Portland, la capacidad de carbonatar completamente, y ganar resistencia durante el fraguado [27]. Estudios de materiales a base de óxido de magnesio han demostrado que son buenos candidatos para reducir las emisiones de CO₂, ya que estos pueden secuestrar el CO₂ cuando se exponen al aire, son 100% reciclables cuando se utiliza la magnesia como aglutinante [25]. También ofrecen ventajas, comparados con el cemento Portland, como: peso ligero, alta resistencia, baja alcalinidad, buena resistencia a la abrasión, retardantes de llama, buena adherencia, y buen aislamiento térmico. Estos materiales son productos bajos en carbono [25], y utilizan como aglutinante cemento Sorel, que se forma por la reacción química entre el óxido de magnesio y el cloruro de magnesio. Los materiales a base de óxido de magnesio tienen una composición muy similar al cemento Sorel hidratado, pero tienen adiciones orgánicas, tales como polvo de sierra (aserrín) y adiciones de relleno inorgánico como arena, cal o ceniza volcánica [31].

Pese a las ventajas del cemento de oxiclورو de magnesio, todavía existen interrogantes en torno a su conformación y comportamiento mecánico, por ejemplo: relaciones molares óptimas, reforzamiento con fibras vegetales y resistencia como elementos estructurales; factores que se presentan como una gran oportunidad, haciendo muy atractivo su estudio. Además, presentan algunos retos como mejorar su resistencia al agua, a la corrosión del acero y a la absorción de humedad [32].

Algunas de las desventajas que presenta el cemento Portland, como la fisuración, se han contrarrestado con la incorporación de un volumen de fibra como reforzamiento de su matriz. Las fibras logran mejorar el comportamiento del material después de la primera grieta, evitando la propagación rápida de las mismas. Se presenta un incremento en la tenacidad en las fases de post-agrietamiento. A su vez, las fibras brindan al nuevo compuesto un incremento en la capacidad de deformarse y aumentar su resistencia al impacto, lo cual implica un aumento en la capacidad de absorber energía, como se afirma en [33]. Las fibras vegetales son bien conocidas para producir materiales cementantes sostenibles para su uso en la construcción civil [23]. Se ha estudiado la fibra vegetal de diferentes orígenes como refuerzo de matrices a base de cemento, como banano, sisal,

cáñamo, coco verde, bagazo de caña de azúcar, pulpa de bambú, pulpas de pino y eucalipto [23]. Con su uso como reforzante de materiales compuestos, se tiene una alternativa ecológica para remplazar las fibras sintéticas. Las propiedades mecánicas que han mostrados fibras como el lino, cáñamo, sisal, yute, banana, entre otras, junto con su bajo costo, baja densidad, reciclabilidad, biodegradabilidad, han hecho de las fibras vegetales una potente alternativa frente a fibras muy comerciales como las de vidrio y carbono [34]. En Colombia, la producción anual global de fibras vegetales es de 31 millones de toneladas y de fibras de vidrio es de 4 millones de toneladas [35]. Sin embargo, estos estudios no han sido extrapolados a los materiales a base de óxido de magnesio.

La industria agrícola representa una fuente importante para el suministro de fibras vegetales, las cuales son consideradas en ocasiones una fuente de contaminación por la gran cantidad que se genera en los procesos agrícolas; esto se debe a que, en la mayoría de los casos no son procesadas o dispuestas adecuadamente, situación que contribuye al proceso de contaminación ambiental [36]. Estas fibras provienen de materiales lignocelulósicos como hojas, raíces y tallos, entre otras partes de las plantas. Aunque algunos productores aprovechan los residuos en las plantaciones en forma de abono verde y alimentación animal, en la mayoría de los casos esta biomasa es incinerada o vertida a los causes receptores sin tratamiento previo, contribuyendo a la degradación del ecosistema [37].

El arroz es uno de los principales cultivos alrededor del mundo, su consumo ha aumentado paulatinamente con el paso del tiempo, alcanzando 501,3 millones de toneladas de arroz para el año 2019. La cascarilla de arroz es la cubierta externa del arroz, la cual posee poco valor nutricional y, por tanto, se elimina durante el proceso de molienda del mismo. Esta representa alrededor del 15 al 20% del fruto, y tradicionalmente, se desecha en vertederos. Por ejemplo, India, segundo país productor de arroz a nivel mundial, utiliza menos del 1% de la producción total de los residuos de cascarilla, lo que implica que la cantidad no utilizada de residuos que se desecha en los vertederos es de millones de toneladas métricas por año. La eliminación inadecuada de los residuos de cascarilla de arroz, así como de otros residuos agroindustriales, tiene efectos nocivos sobre el medio ambiente, como la contaminación de la tierra y de las fuentes hídricas, lo cual, a su vez, tiene a largo plazo afectación sobre la salud humana. Por lo tanto, la valorización de estos residuos permitirían darles un alto valor agregado [38].

Es importante tener en cuenta los problemas asociados a la elaboración de composites cementicios reforzados con fibras vegetales como lo son la durabilidad de las fibras en la matriz de cemento altamente alcalina [39], la cual tiende a descomponer las fibras con el tiempo [34]. Quintero y Gonzalez (2006) [40], afirman que los materiales cementicios reforzados con fibras vegetales pueden presentar los siguientes problemas: alta alcalinidad de la pasta (pH 12 – 13) que deteriora con el

tiempo las fibras naturales celulósicas, también ocurre mineralización en el interior de las fibras por precipitación de los productos de hidratación del cemento; deterioro de la fibra por aumento de la densificación de la interfase, y degradación de las propias cadenas de celulosa con el tiempo por ataque alcalino [40]. Un estudio realizado en 1979 por el Instituto de Investigación del Cemento de Suecia, tras tres años de investigación para mejorar la durabilidad de los VRFCC, utilizando fibras de sisal, concluyeron que los mejores resultado se obtenían al reducir la alcalinidad de la matriz, mediante el remplazo parcial del cemento portland ordinario con una puzolana altamente reactiva [33]. Otro problema reportado son los agrietamientos en las matrices concreto-fibras naturales [41].

Algunos métodos que han sido probados para reducir los daños ocasionados por la alcalinidad de las matrices cementicias son: i) adiciones puzolánicas directamente introducidos en la masa del cemento o aplicados a las fibras, y/o a través de curado en una atmósfera de CO₂; y ii) refinado de la fibra con tratamientos de cornificación [26]. También se pueden mejorar las propiedades de la matriz tratando químicamente las fibras naturales, por ejemplo, el tratamiento alcalino, evitando con esto la degradación por el ambiente alcalino del mortero [27], también, las fibras se pueden recubrir con resinas para evitar la degradación [28]. Para evitar los agrietamientos en las matrices concreto-fibras naturales tanto en los procesos de armado y curado, se han utilizado varios tipos de tratamientos con diferentes porcentajes de usos, entre los cuales se encuentran algunos cloruros y capas finas de Igol-T onegrolin, los cuales han mejorado la relación entre la interfase por encima del 90% [25].

Teniendo en cuenta la poca información y estudios científicos que se encuentra en relación con los materiales compuestos a base de óxido de magnesio empleando fibras naturales como material de refuerzo, se plantea la siguiente pregunta:

¿Es posible elaborar un material compuesto a base de óxido de magnesio reforzado con fibras vegetales para aplicaciones en la construcción, que presente características funcionalmente comparativas a los que son a base de cemento portland, pero con un menor impacto ambiental?

Por todo lo anterior, esta investigación se basa en la siguiente hipótesis:

Los materiales compuestos de matriz cementicia a base de óxido de magnesio pueden tener propiedades y comportamiento adecuado para ser usados en la construcción; además, pueden tener menor impacto ambiental.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Situación actual del conocimiento en el área de la investigación – Acuerdo de París

El objetivo central del Acuerdo de París es reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático; evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2 °C respecto a los niveles preindustriales y busca, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5 °C. El acuerdo tiene por objeto aumentar la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático y lograr que las corrientes de financiación sean coherentes con un nivel bajo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y una trayectoria resistente al clima. Para alcanzar estos ambiciosos objetivos, es preciso establecer un marco tecnológico nuevo y mejorar la capacidad de los países, con el fin de apoyar las medidas que adopten los países en desarrollo y los países más vulnerables, en consonancia con sus propios objetivos nacionales, y movilizar y proporcionar los recursos financieros necesarios. El Acuerdo también prevé un marco mejorado de transparencia para la acción y el apoyo [42].

2.2 Estudios relacionados con el desarrollo de materiales a base de óxido de magnesio

El óxido de magnesio, conocido también como magnesia, es un mineral sólido blanco que se produce naturalmente como periclasa y es una fuente de magnesio. La mayoría de óxido de magnesio producido en la actualidad se obtiene mediante el procesamiento de materiales de origen natural, tales como magnesita (carbonato de magnesio), cloruro de magnesio rico en salmuera y agua de mar. El óxido de magnesio reactivo, o magnesia calcinada, se obtiene normalmente por calcinación de magnesita ($MgCO_3$) a una temperatura alrededor de 750 °C [10]. Se puede obtener óxido de magnesio, como MgO cáustico, a partir de la descomposición de sus correspondientes hidróxidos, desde temperaturas superiores a 400 °C e inferiores a 1.000 °C [43].

La Magnesita, también llamada Carbonato de magnesio, $MgCO_3$. China cuenta con abundantes recursos de magnesita de buena calidad con reservas probadas de 3.642 millones de toneladas, lo que representa el 28,85% de las reservas totales del mundo, lo que la sitúa en el primer lugar a nivel mundial [44]. De acuerdo con la temperatura de sinterización, se divide principalmente en tres tipos diferentes: magnesia calcinada cáustica (CCM), magnesia calcinada a muerte (DBM), magnesia fundida (FM), utilizando la ruta de proceso seco basada en magnesita natural extraída. Entre estos tipos, FM, por su baja energía de hidratación, estructura compacta, buena resistencia a la escoria y al

choque térmico, es ampliamente utilizado en muchos campos (metalurgia, material de construcción, vidrio, petroquímica, cemento, defensa nacional, etc.) como buena materia prima para ladrillos de aire de carbono senior y refractarios monolíticos.

De otra parte, el cloruro de magnesio (MgCl_2) es el otro de los materiales que junto con el óxido de magnesio forman el cemento Oxiclورو de magnesio (MOC) o cemento Sorel. El cloruro de magnesio cristaliza en sistema monoclinico-prismático, se disuelve fácilmente en agua, su densidad real es de $1,58 \text{ g/cm}^3$, funde a $118 \text{ }^\circ\text{C}$ y se congela a $-115 \text{ }^\circ\text{C}$. Forma hidratos con 2, 4, 6, 8 y 12 moles de agua, de los cuales sólo presentan importancia técnica los de 4 y 6 moles de agua de cristalización; sus variedades comerciales son “fundido”, “molido”, “copos” y “escamas”. La modalidad técnica más interesante es la del cloruro de magnesio fundido con 6 moles de agua de cristalización ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$); que es la que se utilizará en este estudio. Este material forma una masa homogénea, fuerte, seca y vítrea, transparente, incolora, blanca o débilmente azulada, y existe según Van't Hoff, entre los límites de $-3,4$ a $116,7 \text{ }^\circ\text{C}$ [10].

El cemento de oxiclورو de magnesio (MOC) se inventó poco después del cemento Portland en 1.867. Este cemento aglomerado químicamente secado al aire tiene muchas propiedades superiores al cemento Portland ordinario, como fraguado rápido, alta resistencia mecánica, buena resistencia a la abrasión y al fuego, baja conductividad térmica y excelente unión. Además, presenta buena capacidad de unión para una amplia gama de rellenos. En virtud de estas ventajas, el cemento MOC se ha utilizado convencionalmente para la fabricación de suelos industriales, muelas abrasivas y una variedad de paneles con diferentes funciones específicas, como decoración, protección contra incendios, y aislamientos acústicos y térmicos [9]. También conocido cemento de magnesio es una lechada preparada mediante la combinación de una relación de masa específica de polvo de magnesia de combustión ligera y solución de cloruro de magnesio. Tiene menor impacto ambiental dado por la menor temperatura de calcinación, en torno a los 700 a $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$, frente a los 1.400 a $1.450 \text{ }^\circ\text{C}$ en el caso del cemento Portland. El mayor potencial del cemento MOC puede ser su capacidad para ser utilizado como componente de materiales compuestos de construcción de bajo consumo energético mientras actúa como un sumidero de CO_2 [2].

El mecanismo de formación implica que el MgO reactivo se disuelva primero con los iones Mg^{2+} y OH^- en la solución acuosa de MgCl_2 , antes de que Mg^{2+} , Cl^- , OH^- y H_2O reaccionen directamente en el sistema de suspensión. La reacción produce $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ('fase 5·1·8' o F5), $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (fase 3·1·8' o F3), y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ gel. Cuando la relación molar activa MgO/MgCl_2 es superior a seis, el producto resultante es $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ gel. Entre estos compuestos, $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ consiste principalmente en

microestructuras en forma de aguja, mientras que la morfología de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ es gel y es en su mayoría escamoso y fibroso. Estudios han demostrado que la fase 5·1·8 es la principal fase de resistencia del cemento de oxiclورو de magnesio, y esta fase proporciona las propiedades mecánicas. El cemento de oxiclورو de magnesio endurece al aire; debido a sus ventajas de endurecimiento rápido, resistencia temprana, aislamiento acústico y proceso de preparación simple, es ampliamente utilizado en artes y manualidades, paneles compuestos, materiales de construcción, chimeneas de cemento de magnesio, etc. En el futuro, con el ajuste del sector energético de China, se espera que los productos relacionados con el cemento de oxiclورو de magnesio tengan perspectivas de aplicación más amplias y un gran potencial de mercado [45].

En 1977, Matkovic et al [46] analizaron las propiedades del MgO producto de la calcinación de carbonato de magnesio y los productos obtenidos de la reacción, como son la fase 3 y la fase 5, en las propiedades de cemento de oxiclورو de magnesio para ser usado en pisos. El óxido de magnesio se obtuvo calcinando carbonato de magnesio básico durante 6 horas a diferentes temperaturas (600, 650, 700, 750, 800, 900 y 1000 °C). A el MgO se le verificó mediante difracción de rayos X, su superficie específica y el tamaño del cristalito. Se preparó una solución de cloruro de magnesio de gravedad específica 1.300 g/cm^3 disolviendo $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en agua destilada. Las muestras de la pasta de cemento se prepararon con relaciones molares $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ de 5 y 3, y adicionando suficiente agua; se almacenaron durante 24 horas y luego se desmoldaron y se curaron a temperatura ambiente durante un 1 año máximo. Los resultados obtenidos no mostraron rastros de carbonato de magnesio ni de ningún otro compuesto, e indicaron que la mezcla ideal para obtener cemento de oxiclورو de magnesio como material para pisos debe estar cerca de la relación molar $\text{MgO}:\text{MgCl}_2:\text{H}_2\text{O} = 5:1:13$, con un exceso de MgO . Además, se observó que la actividad del MgO , la cual depende de la temperatura de calcinación, influye en la velocidad de reacción y los productos de reacción, lo que determina el desarrollo de la resistencia de los cementos de oxiclورو de magnesio [46].

En 1980, Urwongse et al [47] midieron la solubilidad del óxido de magnesio y compararon los resultados con los análisis de las propiedades de cementos de oxiclورو de magnesio puro, para construir un diagrama de fase de equilibrio para el sistema $\text{MgO}:\text{MgCl}_2:\text{H}_2\text{O}$. La gravedad específica y la acidez de las soluciones saturadas con MgO y las humedades relativas de las fases de vapor sobre las muestras selladas, se midieron y combinaron con los datos de DRX para definir los compuestos en equilibrio con dos fases cristalinas. Se utilizó MgO grado químico producido por calcinación de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en aire a temperatura ambiente. A cada una de las soluciones obtenidas se le midió la gravedad específica y el pH, y se observó que el sistema $\text{MgO}:\text{MgCl}_2:\text{H}_2\text{O}$ se comporta como un verdadero sistema. Los estudios de la tasa de reacción relativa indicaron que la fase 5 cristaliza más

rápidamente que la fase 3 y que los cementos cerca de la composición 3:1:8 reaccionan rápidamente con el CO atmosférico para formar la fase de clorocarbonato [47].

En 2007, Li et al [13] investigaron la influencia de las relaciones molares de MgO:MgCl₂ y H₂O:MgCl₂ en las propiedades del cemento de oxiclورو de magnesio (MOC). Se observó que las relaciones molares de MgO:MgCl₂ y H₂O:MgCl₂ pueden afectar significativamente las propiedades del cemento MOC y su estructura cristalina. Los autores encontraron que las proporciones molares de MgO:MgCl₂ de 11-17 y H₂O:MgCl₂ de 12-18 permiten garantizar la producción de la fase 5, lo que permite un alto rendimiento del MOC y buena manejabilidad. Además, se evidenció que la relación molar H₂O:MgCl₂ depende en gran medida de la relación de MgO:MgCl₂, principalmente para controlar la trabajabilidad de la pasta. Por lo tanto, el parámetro más crítico para ser seleccionado en el proceso de diseño es la relación molar de MgO:MgCl₂, aunque la reactividad del polvo de MgO también es importante. En el estudio se concluyó que la mejor combinación de las relaciones molares para cemento MOC es MgO:MgCl₂ de 13 y H₂O:MgCl₂ de 12 [13].

En 2012, Tapia [10] analizó el comportamiento de paneles de cemento de magnesio a altas temperaturas y hace un comparativo con paneles de alma de yeso, utilizados habitualmente en la construcción. Para la elaboración de los materiales se tuvo en cuenta que la relación MgCl₂:MgO:H₂O debe oscilar entre 1:2:5 y 1:3:5; donde en 1:2:5 el poder ligante de la magnesita (MgCO₃ de donde se puede obtener el óxido de magnesio) es máximo y se puede decir que no existe exceso de MgO ni de MgCl₂ en la mezcla. Las probetas se realizaron con lejías de 28 °Be, mezcladas como mínimo por 24 h antes de su aplicación. Los ensayos realizados mostraron que existe una clara diferencia de conductividad térmica entre los paneles de cemento de magnesio y los de alma de yeso, siendo en estos últimos claramente más baja [10].

En 2015, Jurisová et al [14] demostraron que se pueden obtener materiales de oxiclورو de magnesio de buena calidad usando cloruro de magnesio que se origina como subproducto de la producción de nitrato de potasio. Los autores prepararon diferentes proporciones molares de MgO:MgCl₂ (9:1 a 5,5:1) y adicionaron la cantidad de agua necesaria para mantener la consistencia adecuada. Informaron que la relación óptima para obtener mejores propiedades mecánicas es MgO:MgCl₂-7:1 y H₂O:MgCl₂ =15 [14]. Los autores proponen nuevos trabajos donde se evalúe el comportamiento del cemento sorel con diferentes tipos de magnesita.

En 2016, Hu C et al [9] investigaron las propiedades micromecánicas (módulo de indentación) del producto de reacción fase 5 (5Mg(OH)₂. MgCl₂. 8H₂O) en el sistema de cemento de oxiclورو de magnesio (MOC). Se determinó que el módulo de indentación promedio y la dureza de la fase 5 fueron 32,5 ± 4,2 GPa y 1,03 ± 0,19 GPa respectivamente. El material se preparó usando polvo de

magnesia quemado por la luz, cloruro de magnesio hexahidratado y agua. El cloruro de magnesio se disolvió en agua antes de su uso y las relaciones molares usadas fueron $\text{MgO}:\text{MgCl}_2 = 11$ y $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2 = 15$. Se observó que el módulo de indentación de la magnesia sin reaccionar en el MOC es mucho más bajo que el cristal de magnesia, ya que la primera de ellas es mucho más porosa. Estudios estequiométricos mostraron que la formación de la fase 5 solo requiere la relación molar $\text{MgO}:\text{MgCl}_2 = 5$, mientras que, en la práctica, se han empleado comúnmente relaciones molares más altas. Esta podría ser la razón atribuida al cloruro de magnesio rara vez observado en la mayoría de los sistemas de cemento MOC endurecido maduro con períodos de curado de 28 días o incluso más. La morfología de la muestra indica que, a los 28 días podría observarse en la pasta 2 fases sólidas que son el óxido de magnesio sin reaccionar y la fase 5 [9].

En 2016, Rode et al [31] investigaron las propiedades para la retención de humedad y el transporte de placas de óxido de magnesio; para esto, observaron los daños causados por la humedad en fachadas ventiladas de edificios daneses nuevos o recién renovados. Para la medición de las propiedades higroscópicas (ab y desorción de humedad) recogieron tableros de 8 mm de espesor de cuatro edificios y a estas les midieron las proporciones de magnesio a cloruro en masa (Mg/Cl). Las muestras se secaron de dos formas con el objetivo de ver si se producía alguna diferencia entre los dos métodos. También midieron la resistencia al vapor de agua utilizando el método de copa según la norma EN 12572. Llegaron a la conclusión que los daños en los tableros de óxido de magnesio fueron causados por la absorción de humedad relativa del aire exterior, generada en periodos de alta humedad (90-100%), lo cual forma gotas en las superficies. Se observó que estas gotas contenían una gran cantidad iones de cloruro soluble. La resistencia al vapor fue relativamente baja y similar al de la placa de yeso. Se afirmó que los tableros de óxido de magnesio no son adecuados como revestimiento en fachadas exteriores o cualquier otra aplicación donde estén en contacto con un clima húmedo [31].

En 2017, Xu et al [48] investigaron la influencia de los regímenes de curado que involucraban diferentes temperaturas en las propiedades mecánicas de los compuestos a base de cemento de oxiclорuro de magnesio (MOC). Las materias primas utilizadas fueron polvo de magnesia quemado por luz con una pureza del 94%, solución de cloruro de magnesio hexahidratado con una concentración del 26,4%, y arena de río con módulo de finura de 2,7; además, se adicionó dihidrógeno fosfato de potasio al 1% con el fin de mejorar la resistencia al agua. Los materiales fueron fabricados utilizando las relaciones molares $\text{MgO}:\text{MgCl}_2 = 10,8$ y $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2 = 14,6$; primero se mezclaron los sólidos y posteriormente se añadió la solución de cloruro de magnesio; la mezcla obtenida se llevó a moldes y se compactó mediante mesa de vibración. Se utilizaron cuatro regímenes de curado donde se evaluó el efecto del tiempo y la temperatura de curado, y además como afectaba envolver la

muestra herméticamente después de curar al aire. Después de 28 días de curado se sumergieron en agua y posteriormente se evaluó la resistencia a la compresión. Concluyeron que la aplicación de curado a alta temperatura puede variar los tipos de productos de reacción primaria, modificar la estructura cristalina y cambiar aún más la microestructura de los compuestos. Además, todas estas variaciones de micro-características inducidas cambian el rendimiento mecánico y las propiedades de resistencia al agua de los compuestos a base de cemento MOC [48].

En 2018, Gravit et al [49] estudiaron los problemas del uso de tableros de óxido de magnesio en la construcción. Realizaron experimentos en los que, durante un mes o más, colocaron láminas de magnesio en un entorno de humedad relativa de 93%. Observaron que estos materiales absorben la humedad del aire en cantidades considerables y que en la superficie se formaban gotas de agua. También les midieron el pH y demostraron que tienen valores inferiores a 10 (entre 7 a 8), en consecuencia, no se podrían proteger de la formación de moho. Afirman que es necesario proporcionar una clasificación de los tableros de magnesio y definir los requisitos técnicos. También expresan que los problemas de los tableros se presentan debido a las condiciones climáticas en las que se utilizan y proponen que se realicen estudios a largo plazo basados en observaciones a escala completa y exposición de materiales en condiciones casi operacionales. Expresan, además, que este material no está suficientemente explorado [49].

En 2018, Ye et al [50] realizaron ajustes a la estructura de fase y rendimiento mecánico del cemento oxiclورو. Prepararon diferentes cementos MOC a diferentes temperaturas de curado (8, 25, 40 y 55 °C) con un rango de contenido de agua (relación molar $H_2O:MgCl_2$) de 11 a 20. Los resultados indicaron que el efecto de la temperatura de curado en la estructura de fase y el rendimiento mecánico del cemento MOC estaban estrechamente relacionados con la relación molar $H_2O:MgCl_2$ en el sistema ternario $MgO - MgCl_2 - H_2O$. Se observó que las propiedades mecánicas de MOC estaban estrechamente relacionadas con la estructura de fase y la microestructura, la cual dependía de la temperatura de curado y el contenido de agua [50].

En el 2018, Guo et al [51] hicieron una revisión de la literatura clave sobre el cemento de oxiclورو de magnesio (MOC) para establecer una comprensión completa y profunda de este. El objetivo principal de la revisión fue identificar los problemas más comunes en el desarrollo y aplicación del MOC y los diversos métodos para resolver esos problemas. Revisaron las características del MOC, incluida la composición de las fases de hidratación, el desarrollo de la resistencia y la durabilidad; revisaron los diversos factores que influyen en la resistencia al agua del MOC, sus características más críticas, como la reactividad del óxido de magnesio, los aditivos y las condiciones de curado.

Finalmente, resumen los métodos para mejorar la resistencia al agua y sus problemas relacionados con MOC y proponen investigaciones futuras [51].

En 2020, Qu et al [52] prepararon mezclas de MOC utilizando diferentes relaciones molares $MgO:MgCl_2$ y $H_2O:MgCl_2$: 5 y 10, 6 y 8, 6 y 10, respectivamente. Informaron que con los MOC con una relación molar 5 y 10 se obtiene mayor cantidad de fase 5, mientras que, el MOC $MgO:MgCl_2$ de 6 alcanza a los 14 días una resistencia a la compresión de 75 MPa; y que el MOC con una proporción de $MgO:MgCl_2:H_2O$ de 6 y 10 es la receta óptima para la fabricación de superficies súper hidrofóbicas [52].

2.3 Estudios del desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras vegetales

Un material compuesto o composite es un sistema en el que se combinan dos o más materiales, que se diferencian en función, forma o composición, con el fin de obtener un material con propiedades únicas. En los materiales compuestos destacan una o más propiedades características aportadas por las fases constituyentes, de tal forma que el conjunto resulte con la mejor combinación posible [53].

Los materiales compuestos son basados en la unión de una matriz con un material de refuerzo que suele ser un tipo de fibra. Las fibras reciben la tensión a la que se somete el material y debido a su gran módulo de elasticidad se adquieren unas propiedades mecánicas únicas [17]. En un material compuesto, la interfaz tiene un rol primordial en la obtención de las propiedades finales del material. Su cometido es conseguir una unión entre las propiedades de las fibras y de la matriz [54]. En la Figura 2.1 se aprecian los componentes de un material compuesto; estos son matriz, interfase y refuerzo.

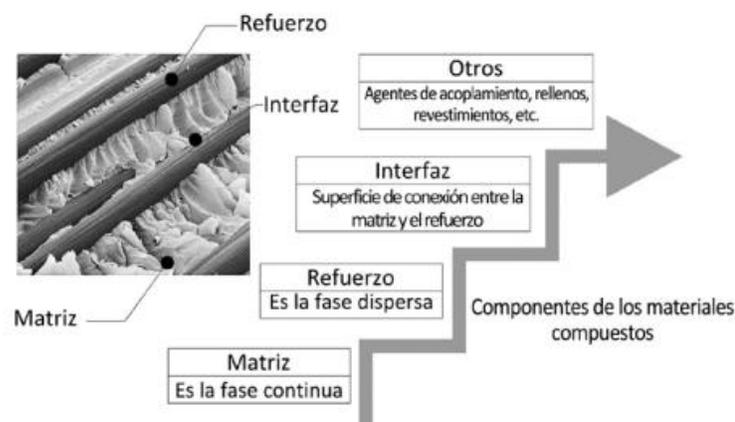


Figura 2.1 Componentes de los materiales compuestos [53]

En un material compuesto la matriz desempeña varias funciones. Fundamentalmente es la fase continua, la cual engloba y sostiene los elementos de refuerzo, otorgando consistencia y continuidad al material. Por otro lado, el principal papel del refuerzo es mejorar las características de la matriz, es el componente que soporta la carga y que también puede aportar con propiedades al material compuesto. La interfase es la superficie existente entre la matriz y el refuerzo; y debe garantizar la unión entre los constituyentes del material [53]. Esta unión juega un papel muy importante para la transferencia de cargas de la matriz al refuerzo, por lo tanto, ayuda a la mejora de las propiedades del material compuesto.

El objetivo de la producción de materiales compuestos, o composites, es la obtención de materiales que combinen las propiedades de sus constituyentes. A diferencia de las mezclas, los componentes de los materiales compuestos son inmiscibles entre sí, dando lugar a la perfecta diferenciación de cada uno de ellos. Forman por tanto dos fases: una matriz, que es la que contiene el refuerzo y lo protege de posibles agentes que causen su deterioro y da forma a la pieza; y el refuerzo que soporta los esfuerzos transmitidos por la matriz. El espacio en el que suceden estas interacciones se denomina interfase. La obtención de una interfase de calidad es un requisito indispensable para la correcta transmisión de los esfuerzos de la matriz al refuerzo [55].

Los refuerzos pueden ser partículas, fibras, láminas o tejidos. Las fibras generalmente se usan a escala macro para mejorar la resistencia de la matriz, mientras que las partículas son utilizadas a escala micro y nanométrica de tal forma que se puedan modificar un sinnúmero de propiedades, incluyéndose las propiedades físicas, ópticas, mecánicas, eléctricas y magnéticas [53]. Las fibras vegetales se utilizan cada vez más en los compuestos debido a sus buenas propiedades mecánicas y su baja huella de carbono; los compuestos hechos con fibras vegetales se consideran más ecológicos y tienen aplicaciones mecánicas y térmicas [56] [57].

Las características de las fibras como baja densidad, gran abundancia, carácter renovable, biodegradabilidad y bajo costo, las hacen especialmente atractivas para el desarrollo de nuevos materiales compuestos. Además, es de destacar la ausencia de riesgos para la salud en el proceso de su manipulación y el hecho de que su poca rigidez puede ser una ventaja durante el procesamiento, ya que las fibras se pueden doblar en lugar de romperse, como pasa con otros tipos de fibras sintéticas. No obstante, existen dificultades intrínsecas en la utilización en las fibras vegetales como agente reforzante en nuevos materiales compuestos, como por ejemplo, la dificultad de lograr una buena dispersión de las fibras en la matriz, su gran capacidad de absorción de agua, baja resistencia a la degradación biológica y una limitada resistencia térmica si se les compara con las fibras artificiales o sintéticas [58].

Las fibras soportan esfuerzos de tracción que transmiten por adherencia a la matriz, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad [59]. El costo de las fibras naturales es relativamente bajo, ya que son abundantes y provienen de recursos renovables en comparación con otras fibras sintéticas [60]; aunque la microestructura de las fibras naturales es compleja y heterogénea. Por ello, cuando se utilizan este tipo de fibras naturales con matrices cementosas, la interacción entre ambas se ve especialmente afectada [56].

2.3.1. Estudios del desarrollo de materiales a base de óxido de magnesio reforzados con fibras vegetales

Se reportan muy pocos trabajos en la literatura en los cuales se adicione un material vegetal a la matriz cementante de oxiclورو de magnesio. Dentro de los reportes se ha encontrado la siguiente información:

En 2006, Pereiro y Guitan [61] patentaron un procedimiento para obtener materiales porosos aglomerados con cemento de periclusa; para ello utilizaron una fase dispersa de origen vegetal como tallos y hojas de diversas plantas o de origen inorgánico como conchas de moluscos o arcilla expandida. Los tableros fueron caracterizados física, mecánica, térmica y acústicamente; y encontraron que los tableros podían ser usados como absorbentes acústicos, elementos decorativos, aislantes, revestimientos y soportes [61].

En 2007, Feigin y Sing [62] patentaron el trabajo “*Magnesium oxide-based construction board*”, donde presenta la elaboración de un tablero de óxido de magnesio. Para su desarrollo utilizó MgO, MgCl₂, y agentes aglutinantes como perlita, virutas de madera, restos de cartón reciclado, agua, fibra de vidrio y poliéster. Obtuvo un material con buenas características como resistente al agua, al fuego y mucho más duradero que el sheetrock convencional, libre de silicato, natrón y cemento [62].

En 2010, Trout [63] patentó la investigación “*Extruded cross-banded magnesium oxide construction board and method of making same*”, donde presentó la elaboración de un tablero de óxido de magnesio utilizando como materias primas: MgO, MgCl₂, agente aglutinante y material sólido particulado como partículas de fibra de vidrio, cáñamo, bambú y hierba trenzada azul. El material fue obtenido por extrusión; el método comprende una etapa de inyección del material sólido particulado en al menos un lado de la suspensión extruida o inyección en dos lados opuestos. Se obtuvo un material fuerte que soporta clavos y similares; y mantiene su integridad estructural durante largos periodos de tiempos cuando se usa en edificios, además, presenta resistencia a la extracción de clavos [63].

En 2017, Zhang et al [64] investigaron los efectos de la adición de cristales de semilla (*seed cristal*) en la formación de fases 5 y sobre la resistencia a la compresión, la resistencia al agua, proceso de reacción y sobre la microestructura de dos tipos de sistemas MOC: uno con ácido fosfórico y otro sin este reactivo. La resistencia a la compresión se evaluó en edades de curado 3, 7, 14, 21 y 28 días. Para determinar la resistencia al agua las muestras fueron sumergidas durante 28 días en agua y luego se midió la resistencia a la compresión. El análisis del grado de reacción del cloruro de magnesio se realizó en edades de curado 3, 7, 14, 21 y 28 días. Los autores concluyeron que la adición de cristales de semillas mejora la resistencia a la compresión, puede mejorar la formación de la fase 5 y hace que la microestructura sea más compacta, mejorando así la fuerza y la resistencia al agua [64].

En el 2020, Marmorato et al [8] estudiaron los efectos de la adición de sílice de cascarilla de arroz sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del fibrocemento de oxiclورو de magnesio (MOFC); y encontraron que esta aumenta el módulo de ruptura y tenacidad de MOFC, y mejora la durabilidad de estos compuestos [8]. También, utilizó diferentes valores de relaciones molares $MgO:MgCl_2$ para fabricar un fibrocemento a base de cemento oxiclورو de magnesio (MOFC), adicionado con sílice de la cascarilla de arroz y evaluó las propiedades mecánicas; reporta que la sílice de la cascarilla de arroz aumentó la resistencia a flexión en todas las composiciones independientemente de la relación molar empleada [8]. En el 2021, analizaron el empleo de la sílice de la cascarilla de arroz (RHS) como material ecológico para mejorar la resistencia al agua del cemento de oxisulfato de magnesio (MOS) y el cemento de oxiclورو de magnesio (MOC); produjeron compuestos donde reemplazaron la masa de MgO con RHS para verificar su influencia en las propiedades mecánicas, la resistencia al agua y la microestructura de los cementos de magnesita. Los compuestos producidos se curaron en condiciones de aire y agua tibia. Realizaron pruebas mecánicas a los 28 días, microscopía electrónica y difracción de rayos X. Los resultados indicaron una mayor expansión y fases solubles para los compuestos MOC que para los compuestos MOS. Además, todos los compuestos basados en cemento MOS muestran una mejor estabilidad en agua, especialmente cuando se adicionó una mayor cantidad de RHS. Se concluye que la tecnología de cemento MOS asociada a la adición de RHS es una tecnología eficaz y ambientalmente racional para la producción de materiales de construcción alternativos [65].

En el 2021, Wang et al [66] prepararon compuestos ligeros de paja modificada/oxiclورو de magnesio (M-SMOCL) de peso ligero y alta resistencia utilizando material cementoso de oxiclورو de magnesio (MOC) como matriz, paja modificada como material de refuerzo y otros reactivos como aditivos. Se examinaron y discutieron los efectos de los agentes de acoplamiento, incluidos KH-550, KH-560, KBM-603, HY-201, en los grupos de paja y la absorción de agua, así como la resistencia

mecánica y la resistencia al agua de los compuestos. Los resultados mostraron que los agentes de acoplamiento redujeron la hidrofilia de la paja y la absorción de agua, y mejoraron el rendimiento del compuesto. KBM-603 en particular poseía los mejores efectos de modificación, con una absorción de agua de paja tratada con KBM-603 reducida al 27%, y las resistencias compuestas a compresión y flexión alcanzaron los valores máximos de 12,93 MPa y 4,78 MPa, respectivamente [66].

2.3.2. Estudios relacionados con el desarrollo de materiales a base de cemento Portland reforzados con fibras vegetales

El desarrollo de los materiales compuestos no es nuevo; en las últimas décadas se ha generalizado su estudio debido a sus propiedades y características, con respecto a los materiales convencionales. Un tipo de estos materiales son los compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras. La versatilidad de los compuestos cementosos reforzados con fibras naturales ha dado lugar a varias aplicaciones. Algunos autores estudiaron su uso para el refuerzo de estructuras de mampostería [56]. Pese a que se encuentran pocos reportes del uso de fibras vegetales como refuerzo de materiales a base de óxido de magnesio, estas han sido ampliamente utilizadas en el desarrollo de materiales a base de cemento Portland, en los cuales cumplen diferentes funciones, tales como aumentar la resistencia a flexión y tracción, así como la durabilidad [67] [68] [57].

El uso de fibras naturales como refuerzo de matrices cementosas tiene un gran potencial. Cada fibra tiene características específicas que afectan su desempeño de refuerzo y aporte en el composite, esto fue estudiado por varios autores. Por ejemplo, Savastano et al (2004) [69] relacionaron la respuesta a la flexión con la morfología de la fibra para compuestos cementosos reforzados con fibras de sisal, pulpa de banano y *eucalipto grandis*. Se estudió el comportamiento de la matriz cementosa reforzada con hilos de sisal tratados. También se consideró la resistencia a la compresión y a la flexión de los compuestos reforzados con fibras de cáñamo. Ruano et al (2020) [56] analizaron el comportamiento de impacto del hormigón reforzado con fibra de bambú (FRC) y las propiedades de flexión.

En 1994, Zhu et al [70] realizaron compuestos de cemento reforzado con fibra de plátano curados al aire, y encontraron que, los materiales elaborados con fibra de plátano desulpada, con una carga entre el 8 y el 16%, tenían un resistencias a la flexión superior a 20 MPa; y con una carga de fibra del 14%, la resistencia a la flexión aumentaba a 24,92 MPa y el valor de tenacidad a la fractura era de 1,74 kJm⁻², propiedades adecuadas para la producción de materiales de construcción comercialmente viables [70].

En el 2002, Juárez [16] elaboró un material compuesto a partir de cemento Portland reforzado con fibras naturales de Agave - Lechuguilla. Se buscaba que material tuviera resistencia, durabilidad y que pudiera ser usado para fabricar materiales de construcción baratos. Encontraron que la fibra de lechuguilla es resistente a la tensión, pero es severamente deteriorada por el medio alcalino del concreto. Sin embargo, si la fibra es protegida con parafina y la matriz es densificada con ceniza volante, el compuesto soporta aceptablemente la exposición a ambientes agresivos y a las variaciones de humedad y temperatura. Las fibras largas y en cantidades reducidas proporcionan incrementos en la resistencia a flexión y tensión del concreto [16].

En 2004 Savastano et al [69] estudiaron la microestructura y propiedades mecánicas de materiales compuestos que contienen residuos fibrosos. Encontraron que las pulpas de sisal y *Eucalyptus grandis* mostraron una adherencia satisfactoria a la matriz de cemento, con predominio de la extracción de fibras (mayor incidencia de desprendimiento que de fractura de fibra) como lo indican los altos valores de absorción de energía. En contraste, los compuestos reforzados con pulpa de banano exhibieron la fractura de la fibra como el principal mecanismo de falla. En todos los materiales compuestos analizados, la desunión parcial de fibras y la microfisuración de la matriz fueron dominantes en las interfaces. Sin embargo, no hubo evidencia de una zona de transición porosa o concentración masiva de hidróxido de calcio en la interfaz [69].

En el 2007, J. Osorio et al [71] estudiaron la influencia del tamaño y la adición de fibras en la resistencia a la compresión y en la densidad de un concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. Los resultados estadísticos permiten concluir que los factores como los días de fraguado, el porcentaje de la fibra adicionada y abertura del tamiz, resultaron significativos ($P < 0,05$) sobre la resistencia a compresión. El porcentaje de fibra entre el 0,5 y 2,5% en relación al peso total del agregado grueso, permite reducciones en la densidad del material que varían entre 141 y 336 Kg/m³, con respecto a probetas patrones con densidades promedias de 2.400 Kg/m³; la resistencia a compresión del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña es inversamente proporcional al porcentaje de la fibra adicionada y al diámetro de las partículas [71].

En el año 2011, Pacheco y Jalali [72] hicieron una revisión de los materiales cementosos reforzados con fibras vegetales; encontraron que los datos de la literatura disponibles se relacionan principalmente con el comportamiento mecánico. Concluyeron que se necesitan más investigaciones para aclarar varios aspectos como el efecto retardador de la inclusión de fibra, interacciones químicas entre la matriz y las fibras naturales, tratamientos adecuados para mejorar la compatibilidad de la matriz de fibra y cemento, la variación en las propiedades de la fibra, y los problemas relacionados con la durabilidad [72].

En el 2011, Tonoli et al [73] evaluaron los efectos de 14 años de exposición a la intemperie sobre la microestructura y la composición mineral de tejas cementosas, aún en servicio, reforzadas con fibras de fique (género *Furcrae*); y encontraron que las tejas bajo exposición a la intemperie presentaron una mayor absorción de agua y un volumen vacío aparente en comparación con las tejas bajo exposición de laboratorio. Por otro lado, su microestructura presentaba una menor permeabilidad al aire que las muestras envejecidas en el entorno interno del laboratorio. Además, en las tejas envejecidas se produce un proceso de hidratación más intenso, ya que se identificó una mayor cantidad de fases hidratadas que en las muestras envejecidas en laboratorio [73].

En 2012, Serrano et al [74] analizó la posibilidad de utilizar la cascarilla de arroz con y sin pretratamientos, como una adición en la fabricación de morteros ligeros. Se estudiaron diversos pretratamientos de la cascarilla, tales como el lavado con agua destilada, baño en disolución ácida durante 24 horas, baño en disolución básica durante 24 h, así como combinaciones y variaciones de los anteriores pretratamientos. Se determinaron propiedades como la densidad, la resistencia a flexión y la resistencia a compresión de los morteros realizados. Finalmente se sometieron a análisis de microscopía electrónica tres de las muestras más representativas. Los resultados mostraron que se obtuvieron morteros de muy baja densidad y elevada porosidad que los convierten en candidatos para elaborar materiales de construcción para aislamiento térmico y acústico, pero no para fabricar elementos portantes debido a su baja resistencia mecánica, entre 2 y 4 MPa. Se concluye que el tratamiento químico de la cascarilla con reactivos alcalinos y la adición de cloruro cálcico como acelerante del fraguado, son dos propuestas efectivas para la reutilización de estos residuos en morteros aligerados [74].

En el 2014, Llerena [33] estudió compuestos cementicios reforzados con fibras vegetales con el objetivo de mejorar la durabilidad del compuesto. Se buscaba reducir la alcalinidad de la matriz con el uso de una adición puzolánica, como el metacaolín; y mejorar el refuerzo mediante un tratamiento previo de “lavado y cornificación” para optimar la adherencia fibra-matriz. Se elaboraron paneles para fachada con cemento portland blanco reforzado con un textil no-tejido de fibras de lino y cáñamo, que permite incorporar el mayor volumen de fibras largas sin que éstas se enreden. Se elaboraron 6 paneles blancos y 1 panel amarillo. Encontraron que el refuerzo con fibras vegetales permite que el compuesto se deforme debido aplicación de una carga y alerte de su rotura, y además, mantiene las condiciones de impermeabilidad al agua [33].

En el 2015, Santos et al [75] realizaron un estudio con el objetivo de exponer algunas estrategias (hornificación, fibrilación de las superficies de las fibras) para mitigar la degradación de las fibras vegetales utilizadas (sisal, bambú, plátano, fique, cáñamo) como refuerzo en fibrocementos no

convencionales y rentables. Se obtuvo una mejoría en el rendimiento de sus propiedades mecánicas y durabilidad para su aplicación en el área de la construcción de viviendas. Los autores encontraron que el recubrimiento de fibras con silano es un proceso prometedor para mejorar la durabilidad y la adhesión de las fibras vegetales utilizadas como material de refuerzo en compuestos a base de cemento. Las fibras presentaron mayor estabilidad dimensional con el proceso de hornificación; el cual no causó ningún cambio significativo en el grado de cristalinidad o en la superficie de las pulpas de eucalipto; la fibrilación y la hidrofilia de la superficie de la fibra mejora la adherencia de la fibra al cemento [75].

En el 2015, Sawsen et al [68] estudiaron el efecto de los tratamientos de fibras de lino sobre el comportamiento reológico y mecánico de un compuesto de cemento. Se realizó un tratamiento hidrotérmico y un recubrimiento con lechada de cemento CEM I 52.5 R. Las fibras de lino fueron tratadas con Rheomac Deco Oleo. Encontraron que la resistencia a la flexión y a la compresión se incrementaron debido a la mejora de las propiedades reológicas del material compuesto de cemento; afirman que el con Rheomac conduce a mejores resultados [68].

En el 2018, Ozuna [67] estudió las características mecánicas que puede aportar un no tejido de fibra de lino como refuerzo, pensando en su aplicabilidad en el área de restauración de edificios, y encontró que al aumentar el número de capas de las fibras de lino y al optimizar la dosificación de las materias primas que forman la matriz de cal, se puede apreciar una mejora en el comportamiento a flexión y en la resistencia mecánica del material a pesar de la poca interacción entre las fibras y la matriz [67].

En el 2018, Mercedes et al [57] estudiaron el comportamiento mecánico de compuestos de matriz cementicia (FRCM) y tejidos de fibras vegetales. Se elaboraron compuestos de diferentes fibras vegetales (lino, cáñamo, sisal y algodón) utilizando un tratamiento a base de poliéster para evitar la degradación de las fibras y mejorar su eficacia dentro de los compuestos cementicios. Los resultados obtenidos mostraron que los compuestos reforzados con cáñamo y lino alcanzaron mayor resistencia a la tracción, y los reforzados con fibras de algodón mayor capacidad de alargamiento y multifisuración [57].

En 2020, Ayobami y Dai [76] desarrollaron morteros de cemento modificado con fibras de plátano y cenizas de fondo de madera (WBA). Concluyeron que se puede obtener un rendimiento óptimo del compuesto cuando el cemento se reemplaza por hasta un 10% de WBA, un 1,5% de fibra de plátano y un 0.3% de emulsión de polímero de estireno butadieno. El compuesto desarrollado proporcionó un buen aislamiento térmico [76].

En 2021, Dhawan et al [77] evaluaron las propiedades mecánicas de hormigones fabricados con la adición de cenizas volantes, cenizas de bagazo y fibra de banano. La mezcla de concreto se desarrolló

utilizando cenizas volantes (reemplazando el 20% del cemento) y reemplazando parcialmente la arena por un desecho industrial, es decir, ceniza de bagazo de caña de azúcar (reemplazando el 0%, 10%, 20% de arena) con adición de fibra de plátano (0%; 2,5%; 5%). Se observó que la adición de 2,5% de fibra de plátano; parcialmente reemplazado por 20% de cenizas volantes y arena; parcialmente reemplazada por 10% de ceniza de bagazo es la mejor combinación que da mejores propiedades mecánicas [77].

En 2019, Saravanan et al [78] proponen usar fibras de banano de 10 mm de longitud tratadas con ácido maleico y fibra de vidrio. Las fibras de banano tratadas y no tratadas variaron en fracciones en peso de 20%, 25%, 30%, 35%, 40% y 45% en los compuestos híbridos vidrio / banano. Los compuestos híbridos de fibra de plátano tratados / vidrio exhibían propiedades mecánicas apreciables. La resistencia se puede ampliar fabricando el compuesto híbrido con múltiples capas (más de tres y más de 7 mm de espesor) [78]. Este mismo año, Elbehiry et al. [79], estudiaron el rendimiento de vigas de hormigón armado con barras de fibra de plátano. Los resultados muestran que el uso de barras de plátano como material de refuerzo puede aumentar significativamente la capacidad de resistir el agrietamiento y el desconchado en las vigas de concreto. Por lo tanto, el uso de barras de plátano como refuerzo principal en el concreto proporciona una mayor resistencia a la flexión con aproximadamente un 25% en comparación con el concreto simple [79].

2.3.3. Estudios de compatibilidad entre la matriz cementicia – fibras vegetales, y efecto de las variables del proceso en las propiedades y comportamiento de los composites

En el 2018, Mercedes et al [57] estudiaron el comportamiento mecánico de compuestos de matriz cementicia (FRCM) y tejidos de fibras vegetales, se elaboraron especímenes FRCM de diferentes fibras vegetales (lino, cáñamo, sisal y algodón), utilizando un tratamiento a base de poliéster para evitar la degradación de las fibras y mejorar su eficacia dentro de los compuestos cementicios. Los especímenes fueron sometidos a ensayos de tracción directa, donde los resultados mostraron una excelente interacción entre los tejidos y la matriz utilizada, pues el poliéster además de mejorar las propiedades mecánicas de los hilos, aumenta la adherencia con la matriz, y con ello mejora las prestaciones mecánicas del FRCM. Los resultados obtenidos mostraron que la impregnación de las mallas de fibras vegetales parece mejorar la adherencia con el mortero mostrando un comportamiento de multifisuras y alcanzando unos niveles de cargas superiores a los especímenes reforzados con basalto. Lo que sugiere la posibilidad de que los FRCM de fibras vegetales puedan alcanzar propiedades mecánicas comparables o superiores a los FRCM de fibras sintéticas [57].

Beraldo [80], en 2016, estudió compuestos de biomasa vegetal y cemento (CBC); presenta las propiedades básicas de la biomasa vegetal en términos de su constitución elemental y de sus interacciones con el cemento Portland, y las principales técnicas para la evaluación de la compatibilidad química entre la biomasa vegetal y el pegante (cemento Portland), y se proponen ensayos físicos y mecánicos para la caracterización del compuesto biomasa vegetal-cemento (CBC). Afirman que las características del CBC dependen fundamentalmente de las interacciones positivas entre la biomasa vegetal y el cemento. Concluyen que los tratamientos preliminares efectuados (lavado, uso de aceleradores, recubrimientos, mineralización, modificaciones en la matriz) en la biomasa vegetal minimizan el problema de su incompatibilidad con el cemento y se puede entonces lograr la obtención de CBC con adecuada resistencia mecánica. Los autores verificaron un incremento significativo de la resistencia a compresión en los casos donde se efectuó la mineralización de las partículas vegetales. La minimización de la incompatibilidad lo evidencian con los resultados de la resistencia a la compresión; los autores verificaron un incremento significativo de esta, en los casos donde se efectuó la mineralización de las partículas [80].

He et al [81], en 2019, afirmaron que es necesario abordar la incompatibilidad entre la madera y cemento Portland, causada por el efecto inhibitor de los contenidos de extraíbles de la madera, ya que estos retardan la hidratación del cemento Portland, y que en comparación con los compuestos de cemento de oxiclورو de magnesio y madera, estos últimos muestran menos incompatibilidad y menor tiempo de hidratación [81].

De otra parte, Wang et al [66], en 2021, informaron que Nazerian y Karade demostraron que las fibras vegetales se descomponen y mineralizan gradualmente en el fuerte ambiente alcalino del cemento Portland (pH ~ 13). Después de la mineralización, las fibras pierden su efecto de refuerzo, dejando un espacio entre las fibras y el cemento, lo que resulta en una disminución de la resistencia del compuesto. También informaron que la naturaleza de la madera utilizada también puede ser un factor clave en el desarrollo de la resistencia de cada tablero, ya que el tipo de madera y cómo se ha tratado previamente puede afectar las reacciones de hidratación del cemento y afectar negativamente el desarrollo de resistencia [66].

La mayor dificultad en la realización de materiales de construcción de madera y cemento es la incompatibilidad entre la madera y el cemento [2] [66] [81]. Esto es causado por el bloqueo o la detención del proceso de hidratación del cemento por algunos de los químicos solubles en la madera [2]. El resultado es la obtención de compuestos de madera-cemento con menor resistencia mecánica en comparación con los productos de cemento simple. Una solución para superar esta incompatibilidad es el uso de otras alternativas en los composites madera-cemento como los cementos

a base de magnesia [2]. Como tiene una alcalinidad más baja y un tiempo de fraguado corto, el cemento MOC puede ser una combinación perfecta para los productos de cemento de madera. Al mismo tiempo, el color natural del cemento MOC es amarillento, por lo que se acerca más al color de muchas especies de madera natural.

Para mejorar la compatibilidad interfacial en los composites se han utilizado agentes de acople. Wang et al [66] informaron que los agentes de acoplamiento (KH-550, KH-560, KBM-603, HY-201), aumentan la actividad superficial y la compatibilidad interfacial del material compuesto MOC-paja de arroz [66]. El MOC tiene una alcalinidad más baja (pH de 10-11) que el CP (pH de 12-13), por lo que cuando se usa junto con fibras de vidrio y fibras vegetales, los notorios problemas de envejecimiento podrían eliminarse [13].

En la Tabla 2.1 se resumen algunas de las fibras más usadas y los tratamientos realizados.

Tabla 2.1 Tratamiento a las fibras

Tipo de fibra	Tratamiento	Referencia
Agave lechuguilla	Parafina	[16]
Lino	Metacaolín	[33]
Cáñamo	Cornificación Lavado	
Lino	Rheomac deco oleo Lechada de cemento	[68]
Plátano	Ácido maleico	[78]
Sisal	Poliéster	[57]
Algodón		
Lino	Silano, Hornificación	[75]
Cascarilla de arroz	Mergerización	[82] [74]

Fuente: Elaboración propia

Otro tratamiento es el curado por carbonatación acelerada a edades tempranas que es una tecnología en desarrollo para aumentar la durabilidad de los materiales compuestos; disminuye la porosidad, promueve una mayor densidad en la interfaz, generando una buena adhesión fibra-matriz y un mejor comportamiento mecánico [23]. Algunos porcentajes de fibras utilizados para reforzar fibrocementos han sido: nanosilíce de la cascarilla de arroz (0, 3, 5 y 7%) [67]; cáscara de arroz (5, 10 y 15%) [68]; fibras de coco (0,2 – 0,8%) [69]; sílice de la cascarilla de arroz (5 y 10%) [5]; fibras de banano (8 y 16%) [60].

La cascarilla de arroz se encuentra dentro de una de las fibras más importantes, porque es una buena fuente de óxido de silicio (SiO₂). En el estudio de la química de la ceniza de arroz en una planta

colombiana, se registró que la cáscara de arroz tiene un silicio total superior al 90%. De acuerdo con las proyecciones, a medida que aumente la población durante este siglo, la demanda de arroz crecerá hasta un estimado de 2000 millones de toneladas métricas para 2030. La reutilización de estos residuos, los cuales se producen en grandes cantidades, ayudaría a mitigar los impactos ambientales asociados con la disposición final de estos. Según cifras del World Bank Group, la categoría de desechos con mayor producción a nivel mundial son los residuos de alimentos y materia orgánica, dicha categoría representa el 44% de los desechos generados globalmente. En Colombia para el año 2020 la distribución de los residuos para su disposición final fue la siguiente: 90% en rellenos sanitarios; 7% botaderos a cielo abierto; 2% celdas de contingencia; 1% celda transitoria. Por otra parte, la cascarilla de arroz es incinerada como método de disposición final o como medio de combustible, esta práctica resulta en la emisión de gases, toxinas y material particulado directamente al aire, y que afecta la calidad del aire causando enfermedades respiratorias y neurológicas [29].

Actualmente el arroz es cultivado en todos los continentes exceptuando la Antártida. Según un informe de la FAO, durante el año 2017 la producción de arroz alcanzó una cifra récord de 759,6 millones de toneladas producidas y en Colombia en ese mismo año la producción alcanzó la cifra de 2.7 millones de toneladas [86], y va en aumento. Dada la cantidad de cultivos de arroz y su crecimiento, la cascarilla de arroz (CA) se convierte en un subproducto abundantemente de la molienda del arroz. Se estima que la producción mundial anual es de 70 millones de toneladas [9]. Debido a la alta producción de CA, la industria ha optado por usar estos residuos como materia prima para la generación de energía térmica, obteniendo como desecho principal la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) [29].

Mercerización de la cascarilla de arroz. Uno de los tratamientos usados para mejorar la adherencia entre fibra y matriz es la mercerización. La mercerización es uno de los tratamientos superficiales aplicados a las fibras vegetales para la modificación de su estructura. Es un tratamiento alcalino que consiste en sumergir las fibras en una solución alcalina (con frecuencia se utiliza una solución de NaOH), durante un período de tiempo [83]. El propósito del proceso de pretratamiento (mercerización) es eliminar estas impurezas y biosustancias lo más alto posible para hacer que las fibras naturales sean rígidas y duraderas [84]. Se cree que funciona aumentando la rugosidad de la superficie de la fibra, lo que mejora la unión mecánica [83]. Cabe mencionar que el tratamiento alcalino con hidróxido de potasio (KOH) también es factible. Sin embargo, el uso de KOH para el tratamiento alcalino es más costoso en comparación con el uso de NaOH. Esto se debe al hecho de que el NaOH se produce a partir de la sal común de mesa, que es comparativamente más barata que el KOH. Además, el uso de NaOH para el tratamiento alcalino posee otra ventaja de mayor

solubilidad en agua en comparación con el uso de KOH. Durante el proceso de alcalinización o mercerización, se eliminan los productos químicos cementantes como la lingocelulosa, la lignina, la pectina, las ceras y los aceites [84].

El efecto de la mercerización es la eliminación del contenido amorfo, la hemicelulosa y la lignina, lo que hace que la superficie de la fibra se vuelva áspera. Se espera que tales superficies rugosas promuevan un fuerte vínculo de unión interfacial cuando las fibras y los materiales compuestos de la matriz están hechos de fibras como refuerzo [85].

2.4 Estudios de análisis del ciclo de vida del cemento Portland, cemento oxiclورو de magnesio y algunos materiales cementantes

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología estandarizada para identificar y cuantificar los impactos ambientales desde la obtención inicial de materiales, pasando por la producción, distribución y uso, hasta la disposición final [86] [87]. El ACV es una herramienta de gestión de la sostenibilidad y de la transparencia medioambiental [88]. De acuerdo con la normativa ISO 14040 [89], se utiliza para evaluar los impactos ambientales y los recursos utilizados durante todo el ciclo de vida de un producto, así como la gestión de los residuos (ISO 2006a). Antes de que fuera conocida como Análisis de Ciclo de Vida recibió otras denominaciones como Ecobalance, Análisis de recursos y Perfil medioambiental, Análisis medioambiental integrado, etc. Su desarrollo metodológico se inició en la década de los 70. En el año 1997 se establece la primera norma internacional (la ISO 14040) sobre Análisis del Ciclo de Vida, por parte de la Organización Internacional para la Estandarización (*International Organization for Standardization*) [88]. Se usa en un número creciente de políticas e instrumentos de negocio tales como el Eco-Diseño, Eco-Etiquetado, Huella de Carbono, Declaración Ambiental de Productos, Gestión del Final de Vida del Producto [88].

En este contexto, el ACV es una metodología estandarizada internacionalmente que permite analizar desde una perspectiva holística los impactos ambientales de los productos o servicios a lo largo de su ciclo de vida. En consecuencia, el ACV es una metodología adecuada para identificar los puntos críticos ambientales y las posibles estrategias de mitigación a lo largo de diferentes compartimentos ambientales [90]. En el caso particular del cemento, por ejemplo, se sabe que su producción genera importantes emisiones de CO₂ y metales pesados. Además, el contenido de Clinker en un determinado tipo de cemento influirá en la cantidad de emisiones como el dióxido de azufre (SO₂) y NO_x, que tienen un impacto importante en términos de acidificación y eutrofización, respectivamente. A pesar de estas principales tendencias que se han identificado en la literatura para la producción de cemento, es importante comprender las condiciones locales en diferentes naciones, dado que los impactos

ambientales pueden variar regionalmente debido a un conjunto de factores determinantes. De hecho, algunos autores han identificado el factor de emisión de energía, la estructura energética (es decir, la combinación de electricidad y otros combustibles para alimentar los hornos), la intensidad energética, la capacidad de producción de la planta, la actividad de producción de cemento y la actividad de producción del Clinker como los principales impulsores del impacto ambiental en la producción de cemento [90].

El análisis del ciclo de vida (ACV) se considera un método fiable para evaluar las interrelaciones entre los sistemas de producción, productos o servicios y el medio ambiente. La producción y el uso de materiales de construcción son responsables del 40% de las emisiones globales de GEI. Si bien la sustentabilidad está impulsando la tracción en la industria de la construcción, su núcleo central son las innovaciones para mejorar los impactos ambientales de los materiales y productos usados [30]. Con el uso del ACV se pueden manejar los residuos en una forma sustentable desde el punto de vista ambiental, minimizando todos los impactos asociados con el sistema de manejo [91]. La Tabla 2.2 presenta el desarrollo del análisis de ciclo de vida a través de los años [88].

Tabla 2.2 Desarrollo del análisis de ciclo de vida a través de los [88]

Desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida	
Año	Acontecimientos
1963	Primeros estudios conocidos sobre análisis de recursos y perfil ambiental (<i>Resource and Environmental Profile Analyses - REPA</i>).
1969	Primer estudio comparativo multi-criterio ambiental de Coca Cola, base de la metodología actual de los estudios de Ciclo de Vida.
1991	La sociedad de Toxicología, Medioambiente y Química (<i>Society of Environment Toxicology and Chemistry - SETAC</i>) desarrolla la metodología de evaluación de impacto del Análisis del Ciclo de Vida
1992	Primer sistema europeo de etiquetado ecológico establecido por la Comisión Europea, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (<i>World Business Council for Sustainable Development - WBCSD</i>), fundada por la industria para abordar la sostenibilidad. Se constituyen la Sociedad para la promoción del desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida (<i>Society for the Promotion of Life Cycle Development - SPOLD</i>).
1993	SETAC desarrolla Código de Práctica (<i>Code of Practice</i>) para el Análisis del Ciclo de la Vida, llevándose a cabo el primer Análisis de Ciclo de Vida en un coche.
1995	Desarrollo del formato estándar SPINE (<i>Sustainable Product Information Network for the Environment</i>).
1997	La Organización Internacional de Normalización (ISO) publica las primeras normas para el Análisis del Ciclo de Vida.
2001	La Comisión Europea publica el Libro Verde sobre Política Integrada de Producto (<i>Integrated Product Policy - IPP</i>) sobre la base del concepto del Ciclo de Vida.
2002	El Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente UNEP (United Nations Environment Programme) y SETAC formaron UNEP/SETAC la Iniciativa Ciclo de Vida (<i>Life Cycle Initiative</i>).
2003	Comunicación de la Comisión Europea sobre Política de Productos Integrada.

Desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida	
Año	Acontecimientos
2005	La Comisión Europea crea la Plataforma europea de Análisis de Ciclo de Vida. La Unión Europea publica las estrategias temáticas sobre la prevención y el reciclado de residuos, así como la utilización sostenible de los recursos naturales.
2006	La Comisión Europea publica en línea la primera versión de la Base de Datos Europea de Referencia de Ciclo de Vida (<i>European Reference Life Cycle Database - ELCD</i>). La Organización Internacional de Normalización (ISO) actualiza las normas 14040 y 14044 para el Análisis del Ciclo de Vida.
2007	Se inicia el desarrollo del Manual de Referencia Internacional del Sistema de Información para el Ciclo de Vida (<i>International Reference Life Cycle Data System - ILCD</i>).
2008	La Comisión Europea publica el Plan de Producción y Consumo Sostenible y las Políticas de Acción Sostenibles. <i>British Standards</i> publica las especificaciones de la huella de carbono (<i>Publicly Available Specification - PAS2050</i>) que utiliza la información proporcionada por el Análisis de Ciclo de Vida.
2009	La Organización Internacional de Normalización (ISO) inicia el desarrollo de la primera norma internacional para la huella de carbono. La comisión Mundial sobre el Medio ambiente y el Desarrollo (<i>World Business Council for Sustainable Development - WBCSD</i>) y el Instituto Mundial de Recursos (<i>World Resources Institute - WRI</i>) comienzan a elaborar el Protocolo para Gases de efecto Invernadero (<i>Green House Gas Protocol</i>) y el Estándar de la Cadena de Suministro basado en el ciclo de vida y en el estándar Scope 3.
2010	La Comisión Europea publica el Manual ILCD (<i>International Reference Life Cycle Data System</i>).

2.4.1. Etapas de un análisis de ciclo de vida

La Figura 2.2 muestra las cuatro etapas de un ACV de acuerdo con la norma NTC ISO 14040 [89].

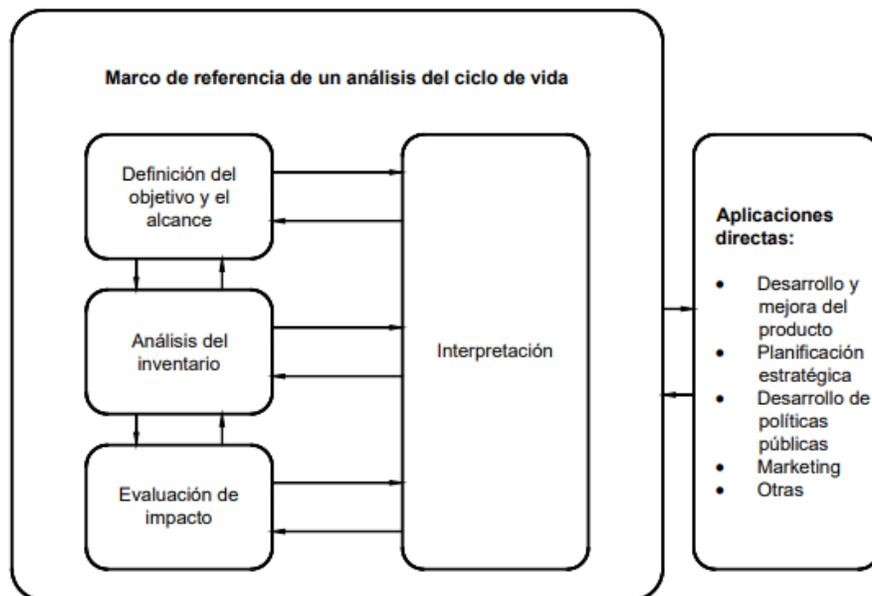


Figura 2.2 Etapas para el análisis del ciclo de vida (ACV)

Según la norma ISO 14040 las etapas del ACV son:

1. Definición de objetivo y alcance: El alcance de un ACV depende del objetivo del estudio a realizar. Se pueden elegir entre varios tipos de alcances como son: de la cuna a la tumba, de la cuna a la puerta, de la puerta a la puerta, y de la cuna a la cuna, tal como se puede observar las Figura 2.3 y 2.4. En esta etapa se identifica la razón por la cual se realiza el ACV y se definen los aspectos del sistema como hipótesis utilizadas, la unidad funcional y categoría de los impactos.

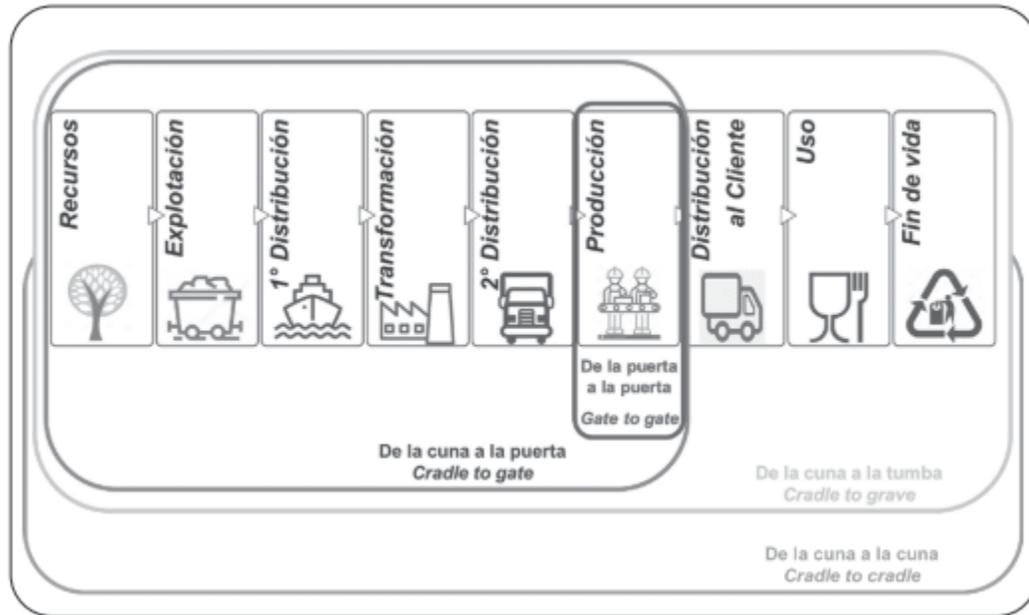


Figura 2.3 Alcances de un ACV [92]

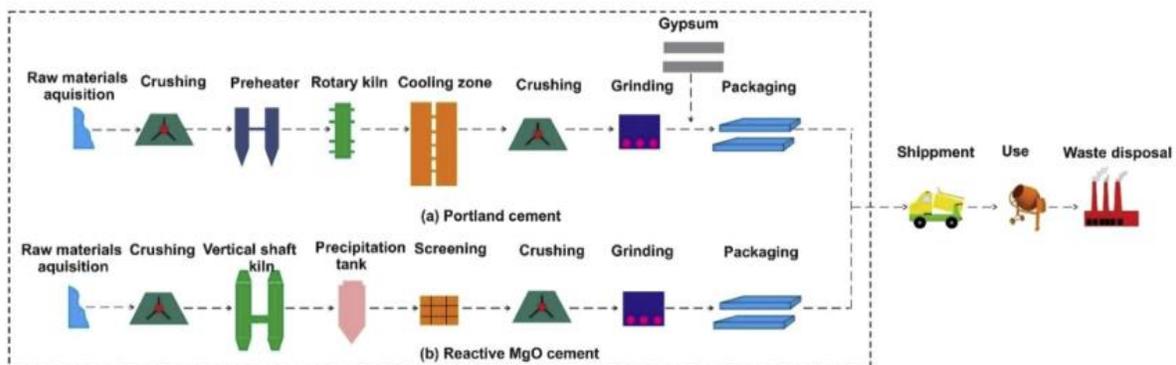


Figura 2.4 Alcance comparativo CP Vs MOC [27]

2. Análisis de inventarios: Es la recopilación de toda la información que se utilizará, denominada entrada y salida. Es la etapa más vital del ACV, debido a la disponibilidad de los datos y la calidad de estos. Se desarrolla de la siguiente manera:

- Recopilación de datos: Información primaria (datos experimentales) e información secundaria (fuentes externas).
 - Cuantificación de entradas y salidas del sistema del producto: Entradas de materias primas, energía, combustible; y las salidas como emisiones y vertidos.
 - Definición de tabla de inventarios: Se recopilan los datos como entrada de materiales, consumo de agua, consumo de energía, emisiones y residuos, entre otros.
3. **Análisis de impactos:** Es la evaluación de la importancia de los impactos ambientales potenciales, utilizando los resultados del análisis de inventarios. Estos resultados se utilizan para evaluar el impacto ambiental del producto utilizando modelos de caracterización. El análisis de impacto de los inventarios se puede dividir en cuatro fases principales: clasificación, normalización, caracterización y pesaje. Las categorías de impacto del producto o proceso se seleccionan y calculan utilizando varios métodos de evaluación de impacto basados en el propósito y los criterios del estudio [28]. Esta etapa se desarrolla de la siguiente manera:
- Selección de las categorías de impacto
 - Definición de indicadores por categoría
 - Clasificación de los impactos
 - Cuantificación de los impactos

Impacto ambiental: Según la *ISO 14001*, el impacto ambiental se refiere a cualquier cambio en el medio ambiente, ya sea adverso o beneficioso, como resultado total o parcial de los aspectos ambientales de una organización [89]. De igual manera, se dice que hay impacto ambiental cuando una acción, actividad natural o inducida causa daño, alteración, afectación o modificación a los recursos naturales de un sistema (ecosistema). Los impactos ambientales se dividen en categorías, y se destacan los siguientes:

- **Potencial de calentamiento global (GWP):** Es el responsable del cambio climático. Se genera por el incremento de los GEIs atribuibles a las actividades humanas que se originan por el forzamiento radiactivo (absorción infrarroja en la región del espectro electromagnético entre 10 y 15 micrómetros). Está relacionado con la liberación de gases a la atmósfera, los más importantes son el CO₂, el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) [1].
- **Agotamiento de los recursos abióticos (ADP E):** Se presenta en tres niveles de actividad: 1) la reducción de las reservas hasta el punto de causar un agotamiento irreversible, como en el caso de los metales, los combustibles fósiles y otros minerales; 2) recursos temporales o

localmente agotables, tales como la turba (carbón ligero) y nutrientes del suelo, y 3) recursos no agotables que tienen disponibilidad limitada, como la radiación solar y la lluvia [1].

- **Potencial de acidificación (AP):** Se refiere a un exceso en la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en el sistema de agua y suelo (debido a procesos de lixiviación o bioquímicos). Las principales sustancias acidificantes son los óxidos de nitrógeno (NO_x), los sulfuros (SO_2) y el amoníaco (NH_3) [1]. El impacto más dañino lo dan los gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO_2 , SO_x , NO_x , O_3). Estos últimos inducen la acidificación de las aguas de lluvia y escorrentía [29]. La acidificación consiste en la acumulación de sustancias acidificantes (ácido sulfúrico, ácido clorhídrico) en las partículas de agua en suspensión en el ambiente. Depositado en el suelo por las lluvias, los contaminantes acidificantes tienen una amplia variedad de impactos sobre los suelos, las aguas subterráneas, las aguas superficiales, los organismos biológicos, los ecosistemas y los materiales. Procesos o circunstancias locales influirán a la contribución de una sustancia a la acidificación [93].
- **Potencial de eutrofización (EP):** Se refiere al enriquecimiento de nutrientes en las aguas superficiales (ríos, lagos y embalses). Las principales sustancias eutrofizantes son NO_x y NH_3 [1]. La eutrofización es un proceso mediante el cual las masas de agua, como lagos o ríos, reciben los nutrientes químicos en exceso, con nitrógeno o fósforo, que estimulan el crecimiento excesivo de plantas. Este consumo de oxígeno puede conducir a alcanzar unas condiciones anaerobias que provocaran la descomposición causada por bacterias anaeróbicas que liberaran CH_4 , H_2S y NH_3 . En último término desaparece cualquier tipo de vida aeróbica. El proceso de eutrofización aumenta en verano [93].
- **Potencial de toxicidad humana (HTP):** Se refiere a los efectos de las sustancias tóxicas en el ambiente humano [44]. Los modelos de evaluación de impacto ambiental consideran sus factores de caracterización mediante la determinación de entre 180 y 1250 sustancias diferentes, pero que en general se pueden subdividir en sustancias orgánicas, inorgánicas y metálicas [1].

4. Interpretación de resultados: El ACV finaliza con el análisis de los resultados y su posterior interpretación y análisis. Se desarrolla de la siguiente manera:

- Confrontación de los resultados del análisis de inventario con la evaluación del impacto
- Explicación de limitaciones
- Conclusiones
- Recomendaciones

El análisis de los documentos seleccionados se realizó mediante revisión del contenido.

En 2012, Valderrama et al [21], realizaron una evaluación de la eficiencia energética y los impactos ambiente antes y después de técnicas mejoradas de fabricación de cemento en una empresa ubicada en Cataluña (España). Las líneas antiguas que llevaban 30 años en funcionamiento eran L3, L4 y L5 y la nueva línea de producción de cemento la denominaron L6, la cual fue diseñada y construida teniendo en cuenta las mejores técnicas disponibles para la industria del cemento. Las mejoras estuvieron relacionadas con la eficiencia de un nuevo horno que representaba menor cantidad de combustible fósil y menor emisión a la atmósfera por kg de Clínker producido. Utilizaron el análisis de ciclo de vida para la cuantificación y evaluación de los impactos ambientales de la nueva línea de producción (L6). En la Figura 2.5 se muestran los impactos ambientales determinados por el método CML 2000 en la producción de clínker para tres escenarios; muestra la caracterización de la acidificación y la eutrofización, así como otras categorías en el método de línea base CLM para ambos escenarios en la producción de clínker.

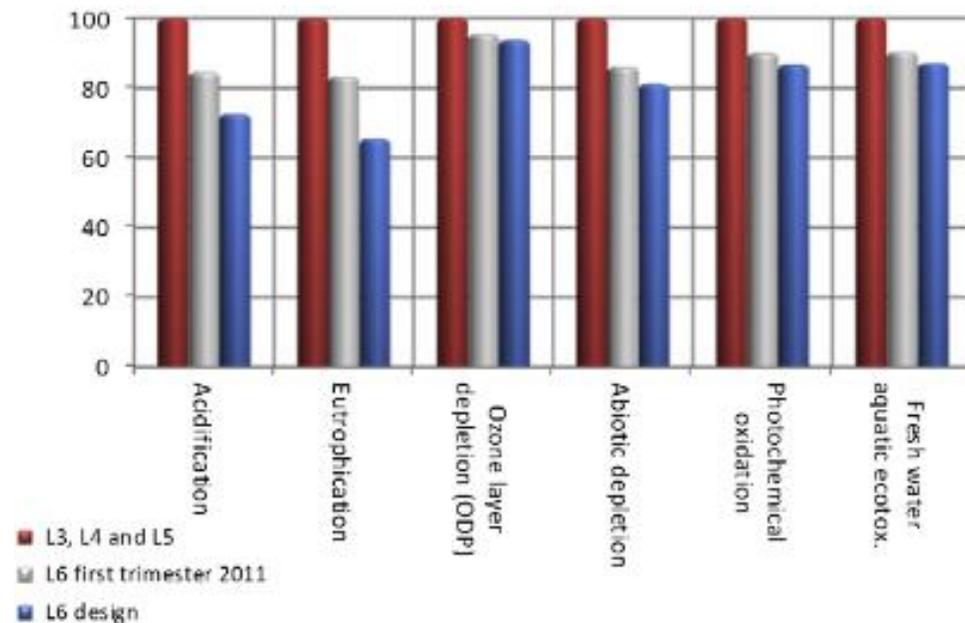


Figura 2.5 Impactos ambientales determinados por el método CML 2000 en la producción de clínker para tres escenarios [21]

De acuerdo con los resultados obtenidos, los autores informan que las categorías de agotamiento abiótico y de la capa de ozono, ecotoxicidad acuática en agua dulce y oxidación fotoquímica reportan una mejora para el escenario de la nueva línea de producción (L6) (entre 10 y 14%) en comparación con las antiguas líneas de producción de clínker, que representan el 75% de la reducción prevista para finales de 2011.

Los autores informaron que estas mejoras podían estar relacionadas con la mayor eficiencia energética, menor cantidad de combustible fósil por tonelada de clínker y la reducción de

emisiones. Por otra parte, presentan la caracterización y evaluación de daños, para los diferentes escenarios; y los resultados son presentados en la Tabla 2.3. Además, concluyeron que la nueva línea de producción (L6) proporcionó una reducción significativa del impacto ambiental por calentamiento global (5%), acidificación (15%), eutrofización (17%) y demanda de exergía acumulada (13%). También, confirmaron que la nueva línea de producción (L6) reportó una reducción significativa del impacto en la salud humana (11%), la calidad del ecosistema (11%) y los recursos (14%) en comparación con las líneas anteriores. Las importantes mejoras conseguidas con la nueva planta estuvieron relacionadas con la eficiencia energética del nuevo sistema de hornos que supone una menor cantidad de combustible fósil y una menor emisión a la atmósfera por kg de clínker producido [21].

Tabla 2.3 Caracterización y evaluación de daños [21]

Category	Unit	L3, L4 and L5	New L6 (desing data) (% reduction)	New L6 (first trimester 2011) (% reduction)
Characterization step				
Carcinogens	DALY*10 ⁷	0,141	0,127 (10)	0,130 (8)
Respiratory organics	DALY*10 ¹⁰	3,12	2,58 (17)	2,72 (13)
Respiratory inorganics	DALY*10 ⁷	3,40	2,42 (29)	2,90 (15)
Climate change	DALY*10 ⁷	2,07	1,90 (8)	1,97 (5)
Radiation	DALY*10 ⁹	1,63	1,47(10)	1,50 (8)
Ozone layer	DALY*10 ¹¹	6,73	5,46 (19)	5,79 (14)
Ecotoxicity	PAF m ² yr	0,0331	0,0298 (10)	0,0331 (7)
Acidification/eutrophication	PDF m ² yr	0,015	0,009 (36)	0,012 (17)
Land use	PDF m ² yr*10 ³	7,15	5,84 (18)	6,19 (13)
Minerals	MJ surplus*10 ³	3,28	3,06 (7)	3,11 (5)
Fossil fuels	MJ surplus*10 ³	980	793 (19)	842 (14)
Damage assessment				
Human health	DALY*10 ⁷	5,65	4,47 (21)	5,02 (11)
Ecosystem quality	PDF M ² yr 10 ²	5,54	4,54 (18)	4,94 (11)
Resources	MJ surplus*10	9,83	7,96 (19)	8,45 (14)

En 2015, Li et al [44] compararon los impactos ambientales de dos procesos de fabricación de magnesita fundida (FM) convencionales y dos nuevos, basados en el análisis de ciclo de vida, incluyendo todas las fases involucradas desde la extracción de materias primas hasta los productos finales, y evaluaron la viabilidad ambiental de los procesos alternativos. También, desarrollaron un inventario del ciclo de vida de ambos procesos. Incluyeron 4 escenarios: Escenario 1 (S1): un proceso de una sola fase que utiliza magnesita natural como materia prima; Escenario 2 (S2): un proceso de dos fases que utiliza magnesia calcinada cáustica como materia prima; Escenario 3 (S3): un proceso alternativo basado en la sustitución de materia prima; y Escenario 4 (S4): otra alternativa que mejora el proceso general, la ventaja de este escenario es que el calor residual y CO₂ se convierten en recursos, lo que reduce el consumo de energía y las emisiones de GEI.

La Figura 2.6 presenta el comparativo de la caracterización de los cuatro escenarios, donde: ADP elements = Potencial de Agotamiento de elementos Abiótico; ADP fósil = potencial de agotamiento fósil; AP = Potencial de Acidificación; EP = Potencial de Eutrofización; GWP = Potencial de Calentamiento Global 100 años; FAETP = Potencial de Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce; HTP= Potencial de Toxicidad Humana; MAETP = Potencial de Ecotoxicidad Acuático Marino; ODP = Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono; POCP= potencial de creación de ozono fotoquímico; TETP = Potencial de Ecotoxicidad Terrestre; Equiv = Equivalente; CCMB = bola de magnesia calcinada cáustica; CCMP = polvo de magnesia calcinada cáustica; CMB = bola de magnesita concentrada; FM = magnesia fundida.

Los resultados presentados en la Figura 2.6 muestran que, para todos los escenarios, el suministro de la combinación de electricidad contribuye entre el 50 y 100% de los impactos ambientales, lo que representa la mayor contribución en las 11 categorías de impacto. Indicaron que, S1 es superior a S2 en términos de impacto ambiental. Sin embargo, las dos alternativas no muestran diferencias significativas. S3 no reduce los impactos ambientales en su conjunto, sino que los transfiere de la fase de producción a otras fases de producción de materias primas. S4 tiene el mejor desempeño ambiental con una reducción efectiva de cada categoría de impacto, especialmente el potencial de calentamiento global (GWP), que se redujo en un 48% en comparación con S1. Este estudio demostró que promover el desarrollo sostenible de la industria FM requiere una mejora general del proceso para garantizar la utilización integral de los recursos y la energía y reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero [44].

En 2015, Martínez [94] realizó una evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas para determinar su viabilidad como alternativa del cemento Portland, y un análisis teórico ambiental comparativo entre estos. Utilizó el análisis de ciclo de vida y de acuerdo con los resultados obtenidos informo lo siguiente: en cuanto al tema del análisis ambiental de las materias primas empleadas en el geopolímero, la puzolana volcánica no representa un inconveniente desde el punto de vista ambiental, sino antes bien se constituye como un material de gran potencial, que puede ser usado como materia prima para la elaboración de geopolímeros, y a su vez sería una buena manera de tratar un contaminante natural, que de no emplearse podría causar graves efectos a las poblaciones circundantes. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el uso de los activadores alcalinos, los cuales requieren de futuros análisis e investigaciones que permitan determinar cuantitativamente sus efectos en el ambiente y en la misma medida proponer alternativas más sustentables [94].

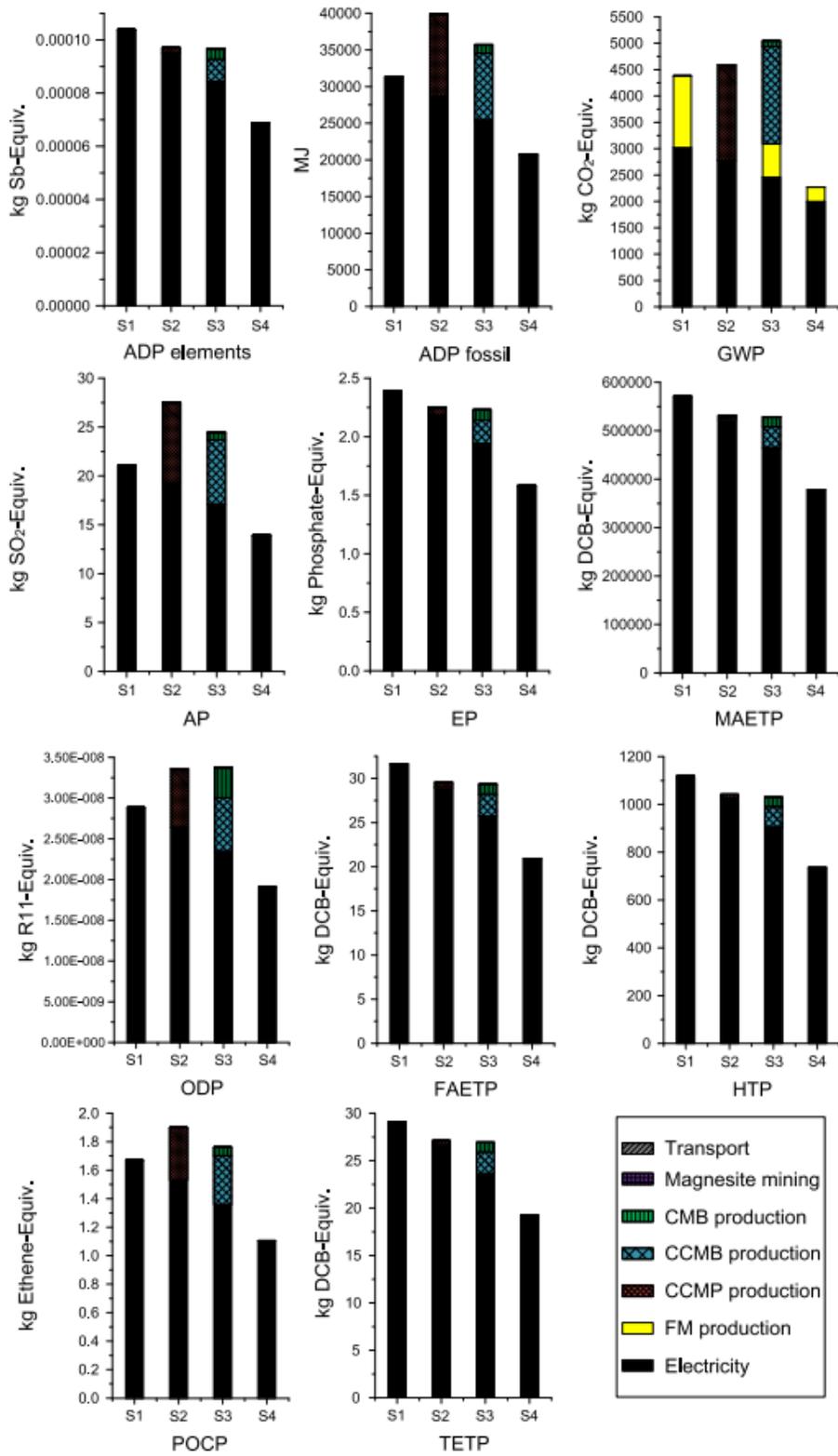


Figura 2.6 Comparación de resultados de caracterización de cuatro escenarios [44]

En lo que concierne a la comparación ambiental entre el proceso productivo del cemento Portland y los geopolímeros, la autora reportó que, la industria de la construcción basada en el cemento Portland como principal material de sustento se encuentra bajo cuestionamiento, debido a las grandes implicaciones ambientales que ha representado, entre ellas escasas de materia prima y consumo energético, pero principalmente contribuciones en materia de emisión de gases de efecto invernadero, tales como el CO₂ [94].

Tras examinar detenidamente las investigaciones y análisis de ciclo de vida efectuados en torno a los geopolímeros y al cemento portland, afirmó que existen importantes ventajas ambientales para los geopolímeros, donde se debe hacer un fuerte énfasis en la disminución de los gases de efecto invernadero. Estas reducciones, según las estimaciones realizadas van desde un moderado 20% a un ambicioso 80% con respecto a lo generado por el cemento. Sin embargo, se debe mencionar que el perfil ambiental de los geopolímeros depende enormemente de los materiales de partida, los cuales también deben ser considerados. Por lo anterior, sin desconocer sus beneficios con respecto al potencial de calentamiento global, resaltó la importancia de las materias primas, las cuales pueden tratarse de recursos intensivos primarios y secundarios sólidos y fluidos [94].

Al realizar un balance entre los dos procesos productivos, expresó que, a pesar de los grandes avances en la técnica de la geopolimerización, sus excelentes propiedades mecánicas y de resistencia exhibidas, así como su gran contribución en la disminución del calentamiento global, sería muy precipitado aseverar que resultará ser una alternativa muy competitiva con el cemento Portland. Recomendó que era preciso que la Industria del cemento Portland revisara sus actuales prácticas, y avance hacia una cultura más responsable con la capa de ozono. Dicho avance implicaba más inversión en investigación, optar por los nuevos materiales alternativos, teniendo en cuenta su disponibilidad y composición, que permitieran reducir la intensiva extracción de recursos naturales y adoptar tecnologías que disminuyeran el alto consumo energético. Sin embargo, informó que la técnica de la geopolimerización podría resultar como una excelente opción y alternativa en la medida que se avance hacia la investigación y obtención de otros activadores alcalinos menos contaminantes como los que se han propuesto hasta entonces, evitando de ese modo las implicaciones en las otras categorías de impacto. Así mismo, se debería optar por una adecuada selección de los materiales de partida, donde las arcillas calcinadas con adecuadas relaciones (Si/Al) serían una buena opción, y los actuales activadores alcalinos (principalmente hidróxido de sodio y silicato de sodio) deben ser reemplazados por materiales más viables ecológicamente. La investigadora concluye que, en las proporciones adecuadas, como las estudiadas, es viable el uso de geopolímeros, y que representan una buena oportunidad para el sector de la construcción [94].

En 2016, Ruan y Uncler [27] evaluaron los impactos ambientales de la producción de MgO reactivo y proporcionan una comparación con la producción de CP mediante un enfoque de evaluación del ciclo de vida. La Figura 2.7 muestra la evaluación de daños de los impactos ambientales individuales de CP y la producción de MgO reactivo.

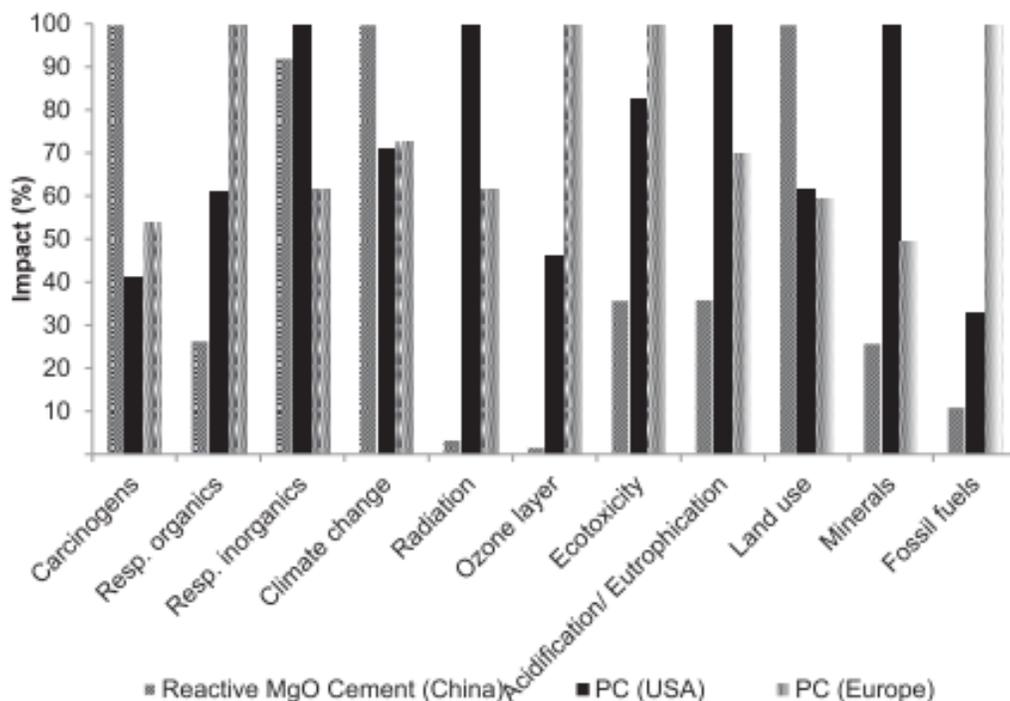


Figura 2.7 Comparativo de categorías de impactos de la producción de CP y MgO [27]

A partir de los resultados obtenidos, reportaron que las ventajas de la producción de MgO con respecto a la radiación, la capa de ozono, la ecotoxicidad, la acidificación/eutrofización, los minerales y los combustibles fósiles superan las desventajas en comparación con la producción de CP. También, informaron que el MgO tiene un impacto menor en la calidad general del ecosistema y los recursos que el CP, pero representa un daño mayor para la salud humana debido al alto uso de carbón por parte de la mayoría de las plantas. La descomposición de la magnesita libera una mayor cantidad de CO₂ que la piedra caliza (~1,1 frente a 0,78–0,83 t/t), lo que crea una puntuación de cambio climático más alta para el MgO a pesar de sus temperaturas de producción más bajas. Sin embargo, informaron que cuando se considera la capacidad de carbonatación de los cementos de MgO, las emisiones de CO₂ son ~73% más bajas que las del CP.

La introducción de una modificación de la relación de resistencia en la producción de MgO da como resultado una intensidad de CO₂ y un impacto de daño en la salud humana de ~13% y ~32% más bajos en comparación con la producción de CP, respectivamente. La influencia del tipo y la cantidad de energía en diferentes categorías de impactos y daños asociados con la producción de MgO se reveló mediante el modelado de escenarios. La cantidad de materias primas tuvo un efecto insignificante en el impacto ambiental general de la producción de MgO reactivo, mientras que el aumento de las emisiones condujo a un aumento del cambio climático. La energía se identificó como el parámetro clave con mayor influencia en las cargas ambientales de la producción de MgO reactivo. Los resultados indicaron que el uso de combustibles alternativos podría mejorar aún más la sostenibilidad general de la producción de MgO reactivo. Los resultados obtenidos al final de este ACV comparativo resaltaron las ventajas ambientales del MgO reactivo sobre la producción de CP en todas las categorías de daño e impacto cuando se incorporan en la evaluación la modificación de la relación de resistencia y la capacidad de carbonatación relevantes del cemento de MgO reactivo [27].

En 2016, Salas et al [95] realizaron revisión bibliográfica para: (i) describir los impactos ambientales, (ii) aclarar los enfoques metodológicos en ACV, y (iii) identificar las principales alternativas para mejorar el desempeño ambiental de la producción de cemento. Revisaron varios estudios disponibles sobre el desempeño ambiental de la fabricación y el uso de productos de cemento. Encontraron que la mejora de la eficiencia energética, el uso de combustibles alternativos, la sustitución del clínker y la captura y almacenamiento de carbono (CCS) como las principales soluciones para mitigar los impactos ambientales causados por la producción de cemento. También informaron que las primeras tres opciones han sido minuciosamente analizadas, aplicadas y han mostrado mejoras a lo largo de los años. CCS tiene un alto potencial de mejora; sin embargo, presenta barreras técnicas y económicas para su implementación [95].

En 2018, Sinka et al [96] utilizaron hormigón de cáñamo – cal, y aglutinante de oxiclورو de magnesio para la realización de paneles de construcción de base biológica para un desarrollo bajo en carbono. Utilizaron ACV para evaluar el impacto ambiental (GWP) de dichos paneles (pared de hormigón celular, bloques cerámicos, filled Wood frame y de magnesio-cáñamo). La Figura 2.8 presenta el comparativo del material de magnesio y cáñamo con materiales alternativos seleccionados con igual conductividad térmica.

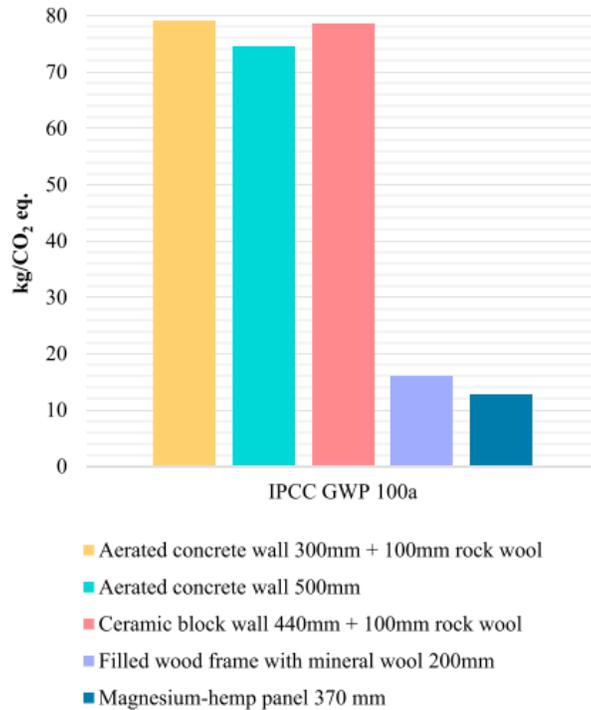


Figura 2.8 Comparación de las emisiones de gases efecto invernadero de diferentes tipos de paneles [96]

De acuerdo con lo presentado en la Figura 2.8, los autores informaron que los paneles de magnesio y cáñamo emiten solo 12,7 kg/CO₂ eq. por m² de pared, que en promedio es de 5 a 6 veces menor que las emisiones de los materiales utilizados tradicionalmente – hormigón celular o pared de bloques cerámicos [96].

Sinka et al [97] también propusieron ligantes de magnesio alternativos para sustituir el ligante de cal usado tradicionalmente en el hormigón de cáñamo, comparando el impacto ambiental de esos ligantes. Utilizaron el análisis del ciclo de vida (ACV) para calcular los impactos ambientales negativos y positivos de los aglutinantes seleccionados y se comparan los impactos ambientales (ADPE, AP, EP, GWP, FAETP, MAETP, HTP, TETP, ODP, POCP) para diferentes composites. Los cuatro ligantes seleccionados fueron: 1) MPC: cemento de fosfato de magnesio: proporción de MgO calcinado a muerte a KH₂PO₄ en masa 1.25:1, 2) MOC-cemento de oxocloruro de magnesio-MgO cáustico a salmuera de MgCl₂ (1:1) en masa 1.5:1, 3) FHL-aglomerante de cal formulado experimentalmente-relación de cal hidratada CL90 a metacaolín por masa 1.5:1, y 4) HL-aglomerante de cal hidráulica comercial-relación de cal hidratada a cal hidráulica a aditivos puzolánicos en masa 7:2:1. En la Figura 2.9 se presentan los resultados por categoría de impacto de cada aglutinante. Informaron a que el MPC tiene el mayor impacto en casi todas las categorías, excepto en el agotamiento de la capa de ozono y la ecotoxicidad acuática en agua dulce, aunque la puntuación en

ambas también es alta. También es el único aglomerante que tiene una emisión positiva de CO₂, mientras que todos los demás compuestos exhiben secuestro de CO₂.

En cuanto a las categorías de impacto de acidificación y eutrofización, el MPC tiene un impacto de cinco a diez veces mayor que todos los demás aglutinantes, es decir, de dos a tres veces mayor en otras categorías. Estos datos les permitieron concluir que el mayor impacto lo causa el fosfato monopotásico, ya que lidera en casi todas las categorías, particularmente en acidificación y eutrofización. De otra parte, informaron que los compuestos aglutinantes a base de cal lograron emisiones negativas de CO₂, que variaron de -46,5 a -68,6 kg CO₂/m³, y que el MOC mostró resultados prometedores con el relleno de base biológica, ya que su impacto ambiental combinado fue menor en la mayoría de las categorías en comparación con el concreto de cal y cáñamo, y se lograron emisiones negativas de CO₂ de -37,38 kg CO₂/m³ [97].

En 2019, Kastiukas et al [98] realizaron evaluación ambiental de muestras de cemento oxiclورو de magnesio preparado con MgO proveniente de la ruta seca y humedad y lo compararon con muestras de CP (estudio de caso en Europa). Utilizaron un enfoque de evaluación del ciclo de vida (desde la cuna hasta la tumba). La Figura 2.10 presenta una comparación de la puntuación única para 1.0 kg de hormigón MOC preparado con MgO obtenido de la ruta del proceso seco (es decir, calcinación de magnesita) y la ruta del proceso húmedo (es decir, sintetizado a partir de agua de mar) y 1,0 kg de hormigón CP. Se observa que el concreto MOC preparado con MgO obtenido de la ruta del proceso seco superó a la muestra de CP en términos de impacto ambiental general, reflejado en un puntaje único 45,2% más bajo. Además, la preparación de concreto CP provocó un daño más severo a los recursos que el concreto MOC preparado con MgO obtenido de la ruta del proceso seco. Reportaron que en términos de los impactos ambientales generales, el concreto MOC solo puede reconocerse como un aglutinante más sostenible que el concreto CP cuando el componente principal, MgO, se obtiene a través de la ruta del proceso seco en lugar de la ruta del proceso húmedo [98].

En 2019, Vázquez-Rowe et al [90] analizaron los impactos ambientales, específicamente el cambio climático, de la producción de cemento en tres plantas cementeras en Perú, para identificar las principales estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero a lo largo de toda la cadena de suministro. Analizaron tres tipos diferentes de cemento producidos en las tres plantas: cemento portland ordinario (CP1), cemento con puzolana natural añadida (CP2) y cemento con escoria de alto horno añadida (CP3). Utilizaron la evaluación del ciclo de vida para cuantificar las emisiones de GEI vinculadas a la producción de una bolsa estándar de cemento, bajo la aplicación de las normas ISO 14040 y 14044 estandarizadas internacionalmente (ISO 2006^a, ISO 2006b).

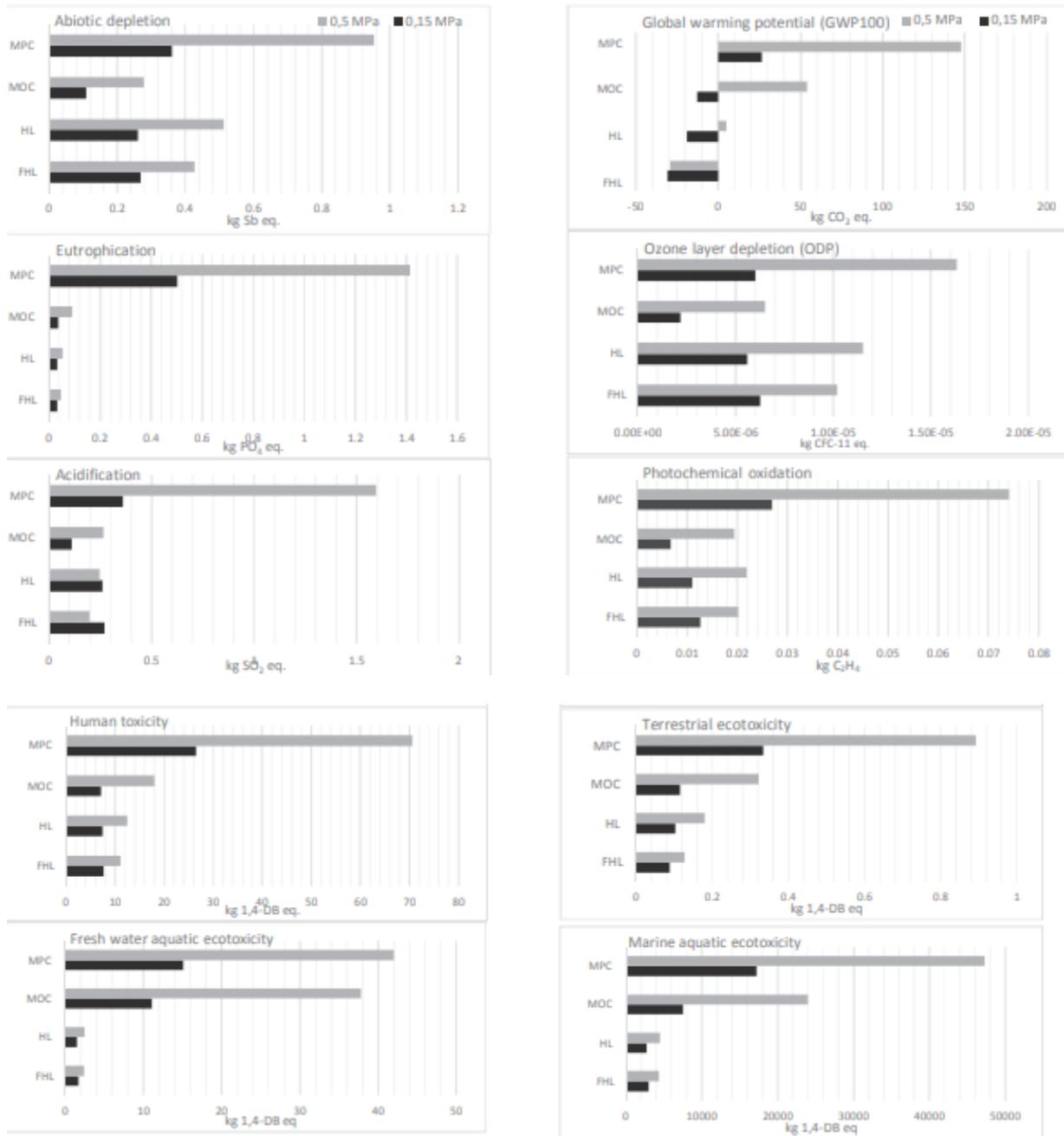


Figura 2.9 Categorías de impacto de cada aglutinante [97]

La Tabla 2.4 muestra las emisiones de GEI por la producción de 1 kg de clínker. Se evidencia que para los CP 1 y 2, el proceso de clinkerización representó el 64% y el 54%, respectivamente, del total de emisiones totales, mientras que la combustión representó el 31% para el CP1 y el 42% para el CP2. En el caso de CP3, los conjuntos de datos de inventario extraídos de la base de datos ecoinvent®

no permitieron discriminar entre clinkerización y emisiones de combustión, representando la contribución conjunta del 78% del impacto total.

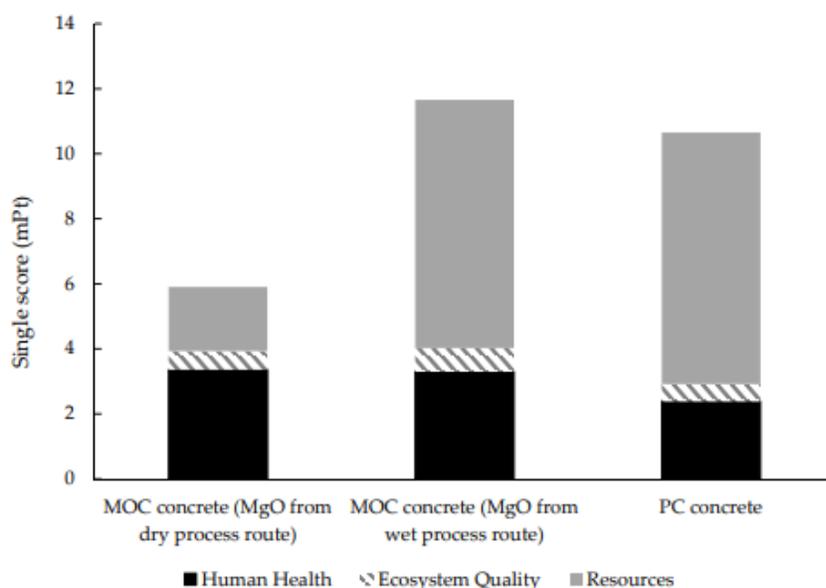


Figura 2.10 Comparación de impactos ambientales de 1.0 kg de concreto MOC preparado con MgO obtenido de la ruta del proceso seco (calcinación de magnesita) y 1.0 kg de concreto MOC preparado con MgO obtenido de la ruta del proceso húmedo (sintetizado a partir de agua de mar); y 1.0 kg de hormigón CP [98]

Tabla 2.4 Valores de caracterización del potencial de calentamiento global, en CO₂ eq, para la producción de 1 kg de clínker en las plantas de cemento (CP) evaluadas [90]

Operational activities	CP1	CP2	CP3
Extraction and transport of limestone	16.0	1.00	- ^a
Marine and terrestrial freight of clinker imports	-	-	134
Clinkerization	520	520	839
Combustion (heat)	250	407	
Electricity	18.0	26.0	42.0
Other processes	3.00	4.00	65.0 ^b
TOTAL	807	958	1080

^a For CP3 limestone extraction is included in the clinkerization process.

^b Other processes in the case of CP3 include the extraction of coal and other raw materials.

Los autores informaron que los cementos adicionados con puzolanas en Perú aparecieron en el rango inferior de las emisiones de GEI recuperadas en la literatura. De manera similar, el cemento Portland, a pesar de sus mayores emisiones por unidad de masa, también apareció en el rango más bajo de emisiones en comparación con el mismo tipo de cemento en otras naciones. Las razones detrás de

estas menores emisiones para el Perú están ligadas a la preponderancia del gas natural en el proceso de combustión; y señalan que la mayoría de los estudios disponibles en la literatura utilizaron datos del período 2006-2014, mientras que los datos de CP1 se obtuvieron para 2016. Por lo tanto, es plausible suponer que en algunas de las plantas evaluadas en la literatura esté la transición a gas natural que se ha implementado en los últimos años. Concluyeron que aunque los resultados estuvieron en el rango más bajo en comparación con la literatura, estos variaron significativamente entre las plantas de cemento, lo que reafirma que el cemento Portland tiende a tener mayores impactos en el calentamiento global que cuando se produce cemento mezclado [90].

En 2019, He et al [81] investigaron las propiedades mecánicas, durabilidad y aspectos ambientales de los tableros MOC con diferentes porcentajes de fibra de madera, cenizas volantes pulverizadas (PFA) y cenizas de lodos de aguas residuales (ISSA). Utilizaron el análisis de ciclo de vida para evaluar y comparar la emisión de gases efecto invernadero. En la Figura 2.11 se muestra una comparación de las emisiones de GEI de la producción de tableros (C0: MOC, S0: MOC+ISSA, S25: MOC+ISSA+madera, PW: madera contrachapada, PB: tablero de partículas).

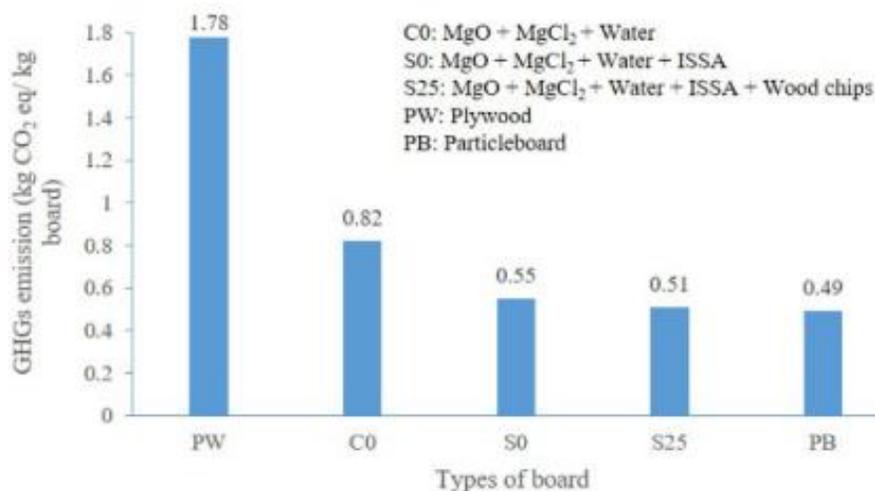


Figura 2.11 Comparativo de emisiones de GEI de diferentes tipos de tableros [81]

Los resultados mostraron que la emisión de GEI de C0, S0 y S25 fue de 0,82 kg, 0,55 kg y 0,51 CO₂ eq/kg, que fue 54%, 69% y 71%, respectivamente, menor al compararlo con la producción de madera contrachapada (1.78 CO₂ eq/kg de madera contrachapada. Sin embargo, la emisión fue un 40%, 11% y 4% mayor para C0, S0 y S25, respectivamente, en comparación con la producción tradicional de tableros de partículas. Sin embargo, se asoció una menor emisión de GEI con la

producción de tableros S25 debido al uso de ISSA y astillas de madera (con menor cantidad de MgO) en comparación con C0 y S0, y el valor también fue comparable al del tablero de partículas a base de resina. Además, la emisión de GEI podría reducirse cuando una distancia de transporte más corta asociada con el suministro de MgO y MgCl₂. Sin embargo, la emisión fue un 40%, 11% y 4% mayor para C0, S0 y S25, respectivamente, en comparación con la producción tradicional de tableros de partículas.

Finalmente, informaron que la producción del tablero MOC de madera induce una menor emisión de GEI que el contrachapado y una menor toxicidad humana que el tablero de partículas a base de resina convencional; las emisiones de GEI asociadas con los tableros MOC de madera que incorporan ISSA fueron un 71% más bajas en comparación con la producción de madera contrachapada y comparables con los tableros de partículas a base de resina. Además, la toxicidad humana del tablero MOC de madera fue un 58% menor en comparación con la producción convencional de tableros de partículas a base de resina [81].

En 2020, Bumanis et al [99] analizaron alternativas al hormigón de cal y cáñamo que lograrían propiedades térmicas similares con un impacto ambiental equivalente o menor. Propusieron aglutinantes como el yeso, los geopolímeros y el almidón, como alternativas debido a su desempeño y bajo impacto ambiental. Utilizaron el ACV para evaluar el impacto ambiental de los aglutinantes alternativos para la producción de biocompuestos (con aglomerantes de yeso, geopolímeros y almidón) comparados con el hormigón de cal y cáñamo. En la Figura 2.12 se pueden ver los resultados del ACV para aglutinantes alternativos y usados tradicionalmente.

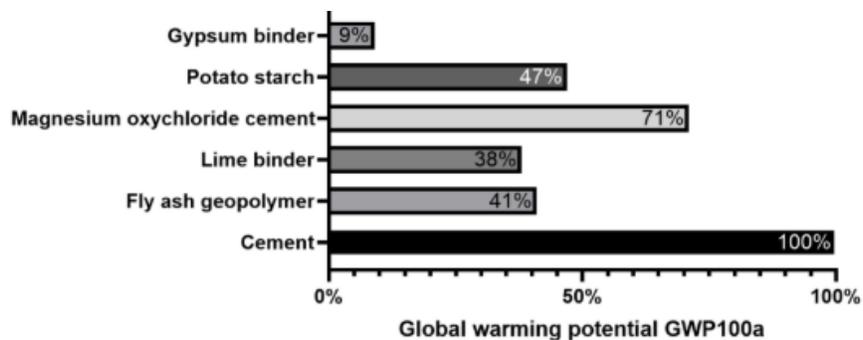


Figura 2.12 Potencial de calentamiento global GWP 100a [99]

A partir, de los resultados del ACV, los autores informaron que los geopolímeros y los aglutinantes de almidón tienen un impacto ambiental similar, como son usados tradicionalmente. Si el impacto ambiental de las materias primas de los geopolímeros se examina por separado, las cenizas volantes y las soluciones de activación alcalina tienen el mismo efecto en la mayoría de las categorías, incluido el GWP, aunque su masa difiere cuatro veces; y que esto lleva a afirmar que, al elegir una solución

de activación alternativa, es posible disminuir el impacto ambiental de los geopolímeros. El aglutinante de yeso mostró el impacto más bajo en todas las categorías, lo que está asociado con la baja temperatura de cocción y el proceso de tecnología de producción sencillo.

Así mismo, evidenciaron que los aglutinantes alternativos elegidos, a saber, yeso, geopolímeros y almidón, tienen un impacto ambiental similar o menor que los aglutinantes tradicionales que ya se utilizan para los biocompuestos (es decir, aglutinantes de cal y magnesio). Por lo tanto, estos aglutinantes alternativos también son prometedores desde el punto de vista medioambiental. Señalan que algunos aglutinantes alternativos pueden ser residuos o subproductos. De otra parte, informan que, el impacto del biocompuesto de cemento de oxiclورو de magnesio es de 5 a 6 veces menor que el de los materiales utilizados tradicionalmente. Esto les permitió concluir que los biocompuestos con aglutinantes alternativos revisados en esta investigación tienen un impacto ambiental aún menor en comparación con los materiales utilizados tradicionalmente, si se pueden lograr propiedades similares al aglutinante de cemento de oxiclورو de magnesio [99].

En 2021, Ige et al [28] realizaron una revisión de estudios anteriores, sobre los impactos ambientales de la producción de cemento Portland, centrándose en aquellos estudios que emplearon la aplicación de un análisis de ciclo de vida. Revisaron las limitaciones/diferencias generales en la información proporcionada a través de las aplicaciones del ACV al iniciar un proyecto de producción de cemento, y se centraron en los límites del sistema, las unidades funcionales, las fuentes de datos y las evaluaciones de la calidad de los datos utilizados; para determinar el nivel de cumplimiento de las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO). Reportaron que los resultados de los ACV del cemento Portland se ven afectados principalmente por los límites del sistema relacionado con los costos de investigación y la calidad de los datos; y que, por lo tanto, se requieren descripciones detalladas de los límites del sistema para obtener mejores resultados, como también, la evaluación de la calidad de los datos. De otra parte, informaron como posibles medidas de mejoras el uso de combustibles alternativos, la eficiencia energética y la sustitución de materiales porque estas medidas se podrían considerar técnicamente sostenibles. Concluyeron destacando la necesidad de realizar más estudios sobre las fuentes y calidad de los datos de los ACV del cemento, y que se necesitan más trabajos para mejorar los límites del sistema [28].

En 2021, Zhang et al [100] investigaron y compararon si reemplazar, parcial o totalmente, cemento Portland con MgO reactivo (rMgO) en mortero puede reducir el impacto potencial del calentamiento global (GWP) en el contexto geográfico de Ontario, Canadá. Realizaron ACV de acuerdo con las normas ISO 14040 e ISO 14044, y el análisis se limitó a la categoría de impacto del cambio climático, a tres mezclas de mortero: 100% CP (MI), 50% CP + 50% rMgO (M-II) y 100% rMgO (M-III). Los

resultados se calcularon con el modelo GWP100 (es decir, el potencial de calentamiento global en un horizonte temporal de 100 años) propuesto por el IPCC (Panel intergubernamental sobre el cambio climático). La Figura 2.13 presenta la comparación de los ACV de los tres morteros con el rMgO fabricado por vía seca y húmeda, con combustibles fósiles o electricidad como fuente de energía. Para cada sistema aglutinante, se presentan las emisiones de GEI totales correspondientes, el CO₂ mineralizado y el GWI (intensidad o impacto del calentamiento global) neto por m³/MPa.

Los resultados mostrados en la Figura 2.13 informaron que el rMgO obtenido por vía seca o vía húmeda puede producir morteros con un GWI neto más bajo por unidad de resistencia que los morteros tradicionales basados en CP. Los morteros hechos con 50% de rMgO generalmente tienen un GWI neto más bajo por unidad de resistencia que los morteros hechos con 100% de rMgO, debido a una mayor resistencia a la compresión y una mayor cantidad de CO₂ mineralizado. En comparación con la fabricación por vía seca de rMgO mediante la calcinación de magnesita, el procesamiento por vía húmeda mediante la extracción de MgO a partir de MgCl₂. Las soluciones ricas requieren más energía para producir cada kilogramo de rMgO. Por lo tanto, M-II y M-III que contienen rMgO de ruta húmeda que utilizan combustibles fósiles como suministro de energía logran un GWI neto más alto por unidad de fuerza que el de MI. Sin embargo, en el mejor de los casos de usar electricidad como suministro de energía, M-II con ruta húmeda rMgO logra un GWI neto por unidad de fuerza solo el 53,7% del MI, mientras que M-II con ruta seca rMgO logra un 22,5% menos GWI neto por unidad de fuerza que el de MI. Los morteros fabricados con rMgO de ruta húmeda generalmente tienen un GWI neto más bajo por unidad de resistencia que los morteros fabricados con rMgO de ruta seca en los mejores escenarios. Dado que no hay emisiones de GEI del proceso químico de vía húmeda.

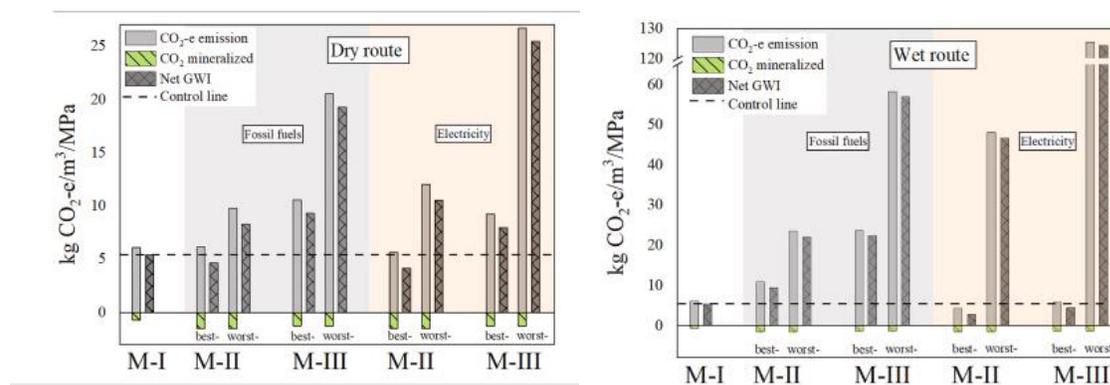


Figura 2.13 ACV de morteros con rMgO fabricado por Ruta seca (izquierda) y ruta húmeda (derecha) [100]

Los investigadores concluyeron que el mortero con rMgO-CP como aglutinante exhibe un GWP neto más bajo por unidad de resistencia que los morteros con 100% de CP o 100% de rMgO como aglutinante en los mejores escenarios. Uso de fuentes de energía con bajas emisiones de carbono (como las energías renovables y la energía nuclear) para la producción de rMgO y los residuos de CO₂ in situ reduciría significativamente las emisiones globales de GEI (en un 82%). En la situación óptima, el mortero rMgO-CP puede lograr una reducción neta de GWI de casi el 50% por unidad de resistencia. La ruta húmeda para producir rMgO parece particularmente prometedora para un futuro sector de la construcción descarbonizado, ya que no se libera químicamente CO₂ durante su fabricación [100].

En 2022, Mishra et al [5] realizaron una revisión sistemática sobre el impacto de las industrias del cemento en el medio ambiente, incluida la producción, la contaminación, el impacto en el ecosistema natural, las mejoras tecnológicas y de procesos, los modelos sostenibles, las últimas leyes, los desafíos, las necesidades y caminos a seguir. La Figura 2.14 y la Tabla 2.5 presentan el impacto de las industrias del cemento en el ecosistema natural.

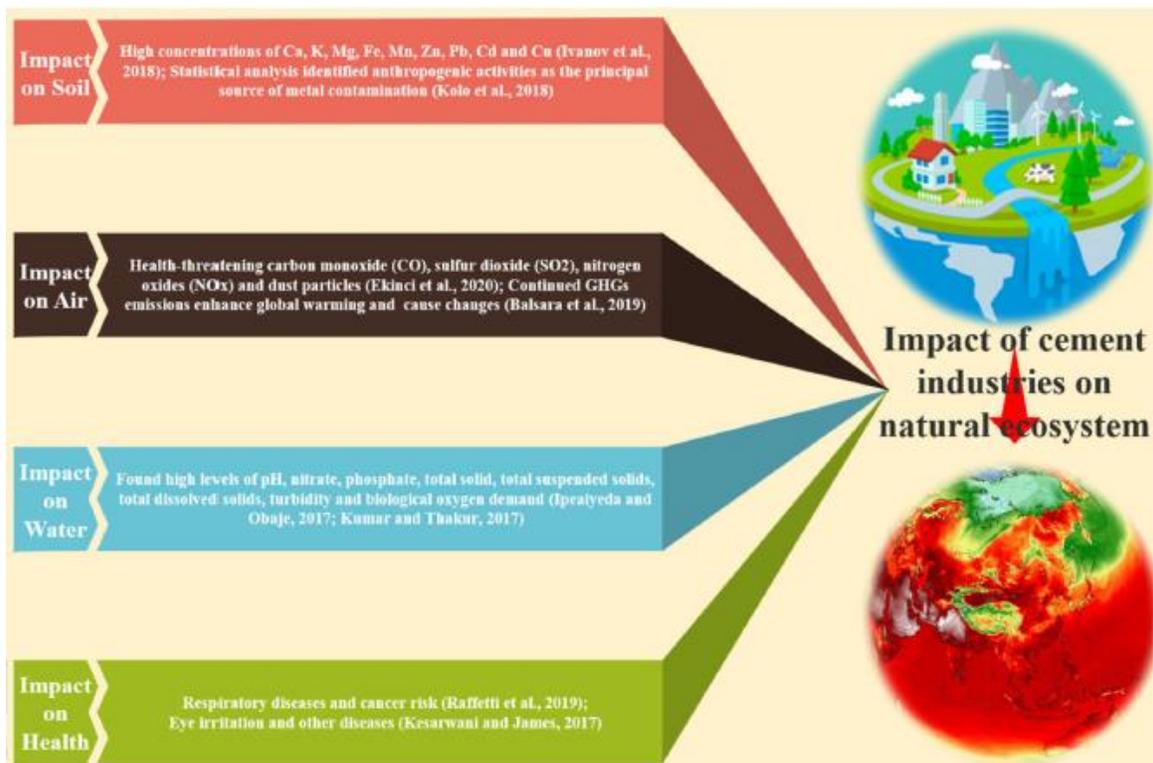


Figura 2.14. Impacto de las industrias del cemento en el ecosistema natural [5]

Tabla 2.5 Impacto de las plantas de cemento en el aire, suelo, agua y salud de la población [5]

Year	Region	Process Activity	Impact
2020	India Italy	Raw material calcinations and fuels combustions	Greenhouse gases emitter
2020	Italy	Cement production	Emission of the harmful carbon dioxide
2020	Germany	Simulation Process	Geological uncertainty
2020	Italy	asbestos exposure	High global impact (occupational, familial, and environmental)
2018	India	Cement dust production	Environment, plant and soil health problems
2018	Nigeria	Combustion	Soil contamination, environmental pollution problems, ranging from air to water contamination
2017	Europe	Cement powder production process	Problem in breathing, skin, and eye infection problem
2014	India	Cement manufacturing	Photosynthesis process and Plant Productivity

De acuerdo a los resultados, se informó que la exposición a la planta de cemento puede tener una influencia negativa en la salud tanto de los empleados como del público en general. La materia gaseosa y el material particulado se liberan al entorno durante la fabricación y el transporte del cemento. El NO_x, SO_x, CO₂, H₂S, los carbonos orgánicos volátiles, las dioxinas, los furanos y las partículas son emisiones comunes al aire de la fabricación de cemento. Durante el proceso de combustión se produce la liberación de gases que contienen óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, óxidos de carbono, compuestos orgánicos y sulfuro de hidrógeno. Las partículas como el polvo y las partículas de carbón se encuentran como resultado de excavaciones, perforaciones, voladuras, extracción, producción de combustible, empaque, limpieza de caminos y colocación; tal como se presentó en la Figura 2.14 y Tabla 2.5.

Según los hallazgos, afirmaron que, India es el segundo mayor productor de cemento después de China. NO_x, SO_x, CO, CO₂, H₂S, VOCs, dioxinas, furanos y partículas son todos contaminantes comunes del aire provenientes de la fabricación de cemento; y que otras fuentes de partículas de polvo incluyen canteras, voladuras, perforaciones, camiones, plantas de cemento, producción de combustible, embalaje, limpieza de caminos y losas. Además, informaron que los métodos de reducción juegan un papel importante en la disminución de las emisiones industriales, lo que da como resultado productos con menos carbono y más sostenibles. Concluyeron que empleando técnicas y tecnologías sostenibles, el cambio a combustibles alternativos ahorrará un 12% de las emisiones totales de CO₂ para 2050 [5].

En 2022, Aslani y Hachem-Vermette [30] investigaron el impacto ambiental de los paneles de MOC y lo comparan con paneles convencionales. Primero calcularon la huella de carbono y los impactos ambientales del MgO producido en Alberta (Canadá) y lo compararon con el cemento Portland (CP). También, realizaron la evaluación ambiental del uso de gas natural en el proceso de

producción. Definieron cinco escenarios: panel MOC (S1), dos productos a base de hormigón de CP: concreto Tilt-up M20 (S2) y concreto aislado (ICF) M20 (S3); y dos escenarios a base de madera: SIP (S4) y Stud (S5). Utilizaron las normas ISO 14040 y 14044 para realizar los análisis y cálculos; en primer lugar, realizaron el ACV del MgO y CP utilizando gas natural y lo compararon con la literatura existente; y luego calcularon los impactos ambientales de los 5 escenarios. Después, el ACV de los paneles de pared MOC (S1) lo compararon con los otros escenarios para obtener una evaluación integral y una comparación de los problemas ambientales. La Figura 2.15 muestra la comparación de los ACV de los diferentes escenarios en cada categoría ambiental en el nivel medio.

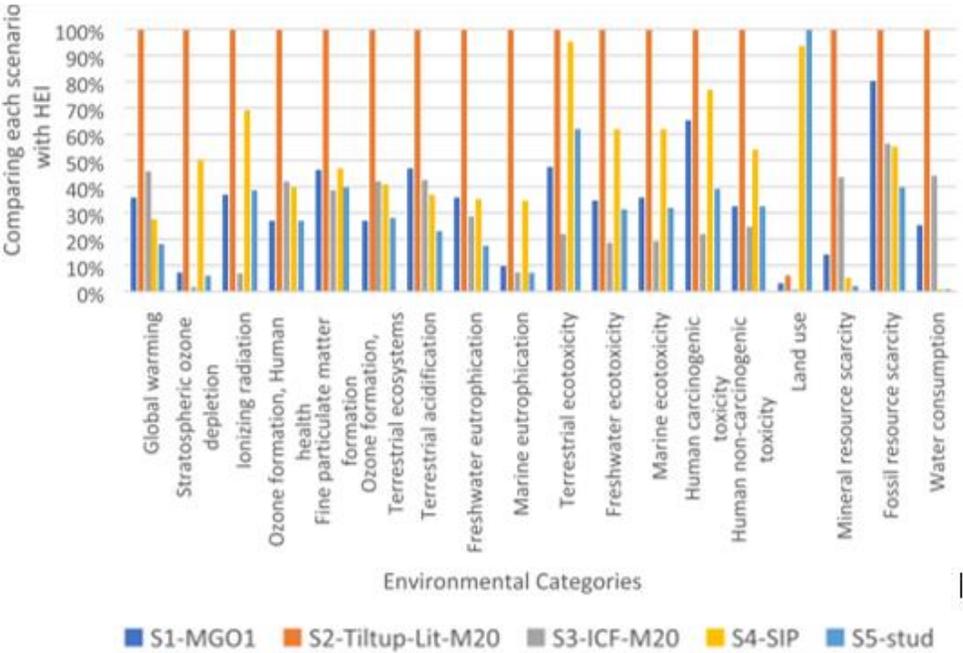


Figura 2.15 Comparación de los ACV de los diferentes escenarios

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 2.15, los autores reportan que, entre los diferentes escenarios estudiados, el tilt-up tiene la mayor emisión de CO₂ con 23.037 kg CO₂ eq, que es 2,8 veces más que los paneles MOC. Tilt-up también tiene los impactos ambientales más altos en comparación con otros escenarios en casi todas las categorías (excepto en el uso de la tierra). Esto se atribuye principalmente al uso de hormigón (empleando cemento Portland) como principal fuente de problemas ambientales. En términos de emisión de GEI y calentamiento global, el panel MOC tiene un menor impacto ambiental en comparación con los escenarios basados en hormigón (tilt-up e ICF). Sin embargo, el panel MOC tiene mayores emisiones de CO₂ en comparación con SIP y Stud. La emisión de CO₂ del panel MOC es casi un 36% de la del tilt-up y un 95% más alta que la

de la pared de montantes. La razón es que los materiales utilizados para SIP y Studs tienen un 32% y un 48% menos de emisiones de CO₂ en comparación con MOC y paneles a base de hormigón, respectivamente. Por otro lado, el panel MOC tiene el agotamiento de ozono estratosférico más bajo en comparación con el panel inclinado hacia arriba y SIP. El impacto de NO_x del panel MOC es un 73% menor que el de inclinación hacia arriba. Además, el impacto de SO_x es casi un 53% menor que el de la pared inclinada. En términos de impactos de toxicidad, la placa MOC tiene un impacto ambiental menor en comparación con el S2 y S4.

También informaron que la emisión de CO₂ del MgO producido por el gas natural es un 18% menor que la del MgO producido por el carbón. La emisión de CO₂ de los paneles MOC fue casi el 36% de las emisiones de los muros tilt-up y el 78% de las emisiones de ICF (formas de concreto aislado). En términos de impactos de NO_x y SO_x, los paneles MOC tuvieron impactos más bajos en comparación con los sistemas de muros a base de hormigón. Concluyeron que en general, los paneles MOC tienen un peso menor y un menor impacto ambiental en comparación con los escenarios a base de CP [30].

En 2022, Tinoco et al [101] realizaron una revisión sistemática de la literatura sobre los materiales utilizados para impresión 3D de concreto y el uso del ACV para predecir sus impactos ambientales. Consideraron hormigones imprimibles producidos tanto con cemento Portland (3DCP) como con materiales no convencionales, tales como geopolímeros (3DGP). Muestran una revisión sobre el uso de materiales cementosos para aplicaciones de impresión 3D en el contexto de la sostenibilidad ambiental y el sector de la construcción. Presentan los materiales utilizados actualmente para la impresión 3D de hormigón. Consideraron aplicaciones estructurales y no estructurales. Discuten nuevas investigaciones sobre materiales más duraderos y sostenibles. Además, revisaron las contribuciones recientes sobre el uso del análisis del ciclo de vida (ACV) para evaluar los impactos potenciales de la tecnología de impresión 3D. Informaron que el impacto más común evaluado fue el potencial de calentamiento global, seguido de otros impactos ambientales importantes como la eutrofización, el agotamiento de la capa de ozono, la acidificación y la toxicidad humana, el agotamiento de los fósiles y el agua, y la ecotoxicidad. La Figura 2.16 presenta los resultados del análisis del potencial de calentamiento global, los datos se dividieron en etapas de producción y construcción de materiales para la construcción de hormigón convencional y 3DCP.

Los resultados presentados en la Figura 2.16, muestran que los valores de impacto potencial para el calentamiento global son mucho más altos en la etapa de producción de materiales tanto para el concreto convencional como para el 3DCP. En general, los dos métodos presentaron órdenes de magnitud similares en ambas etapas. De otra parte, en la etapa de construcción para ambos métodos

(recuadros naranjas), casi no hay datos disponibles, ya que varios autores no toman en cuenta esta etapa por considerar que su influencia en el GWP no es relevante. Por ello, cabe señalar que para reducir la huella de carbono 3DCP, se ha puesto el foco en la etapa de producción de materiales, ya que el impacto asociado es más pronunciado.

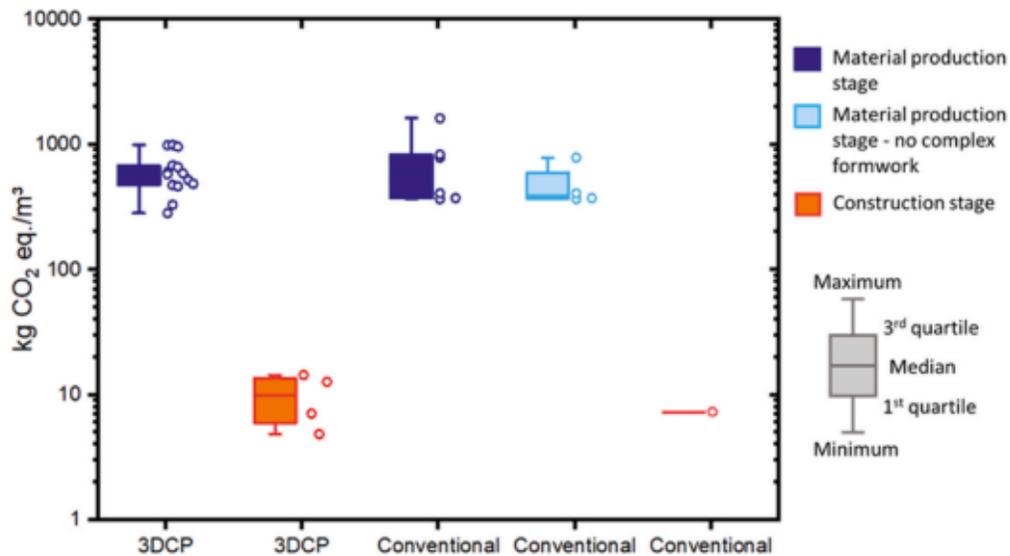


Figura 2.16 GWP informado en $\text{kg CO}_2 \text{ eq./m}^3$ (en escala logarítmica) de las etapas de producción y construcción de materiales para 3DCP y métodos de construcción de hormigón convencionales [101]

La revisión mostró que hay pocos estudios sobre ACV del hormigón para la impresión 3D y que el hormigón empleado para este propósito generalmente utiliza fracciones de gran volumen de cemento Portland para lograr una reología adecuada. También, reportaron que nuevos estudios demuestran que los materiales cementicios suplementarios, residuos reciclados y matrices alternativas pueden ser utilizados para reducir los impactos ambientales del ciclo de vida. Además, informaron que algunos estudios también muestran que el desempeño ambiental de las estructuras impresas se puede mejorar a través de la hibridación funcional, la optimización estructural y el aumento de la eficiencia energética de los sistemas de impresión.

Finalmente, muestran que la impresión 3D de hormigón es una tecnología prometedora que puede tener un impacto positivo en la industria de la construcción en los próximos años; y que cuando se utiliza el ACV para evaluar el impacto ambiental de esta tecnología, se puede afirmar que, los impactos ambientales del hormigón utilizado en la impresión 3D se concentran en: 1) el cemento (debido a la gran cantidad de cemento en las mezclas de hormigón) y el acero de refuerzo, 2) el uso

de la impresión 3D y materiales alternativos como los cementos de arcilla calcinada con piedra caliza, y 3) el reemplazo parcial del cemento por materiales cementicios complementarios como las cenizas volantes y el humo de sílice; ya que estos pueden ayudar a disminuir los impactos ambientales. Los materiales basados en la tierra, como la mazorca, emergen como alternativas prometedoras para reducir los impactos ambientales de las construcciones impresas en 3D, ya que no utilizan cantidades sustanciales de aglutinantes químicos. Sin embargo, debería evaluarse mejor la viabilidad de estos materiales para aplicaciones a gran escala; y, existe la posibilidad de reducir el uso de encofrados y la producción de residuos son algunas de las ventajas de este nuevo método que podría conducir a construcciones más sostenibles [101].

En 2022, Palermo et al [102] realizaron evaluación comparativa de tres escenarios para 2030 de la industria cementera brasileña. Evaluaron diferentes impactos ambientales de la producción de 1 ton de cemento en cuatro escenarios. Compararon un escenario de referencia de negocios habituales: caso 1, con tres escenarios alternativos del plan sectorial de mitigación de carbono para 2030; caso 2, configuración de producción brasileña; y caso 3a y 3b, (escenario bajo en carbono) que asumen tecnologías maduras. Analizaron 18 categorías de impacto. La Tabla 2.6 presenta los resultados de caracterización para 1 ton de cemento en los casos 1 (business-as-usual, 2014), 2 (Escenario 2 °C, 2030) y 3 (escenario bajo en carbono, 2030).

Tabla 2.6 Resultados de caracterización a nivel de punto medio para 1 t de cemento en los casos 1 (business-as-usual, 2014), 2 (Escenario 2 °C, 2030) y 3 (Escenario bajo en carbono, 2030) [102]

Impact category	Unit	Case 1	Case 2	Case 3a	Case 3b
PMFP	kg PM _{2.5} eq	5.88E-01	5.38E-01	4.49E-01	4.47E-01
GWP	kg CO ₂ eq	7.14E+02	6.17E+02	4.80E+02	4.79E+02
ODP	kg CFC11 eq	1.50E-04	1.50E-04	1.40E-04	1.40E-04
HOFP	kg NOx eq	1.14E+00	1.00E+00	8.43E-01	8.37E-01
EOFp	kg NOx eq	1.16E+00	1.01E+00	8.50E-01	8.44E-01
TAP	kg SO ₂ eq	1.76E+00	1.62E+00	1.35E+00	1.34E+00
FEP	kg P eq	2.67E-02	2.39E-02	2.14E-02	2.13E-02
MEP	kg N eq	2.00E-03	1.82E-03	1.98E-03	1.96E-03
FFP	kg oil eq	3.77E+01	3.05E+01	2.33E+01	2.30E+01
SOP	kg Cu eq	1.55E+00	1.41E+00	1.17E+00	1.17E+00
LOP	m ² a crop eq	1.54E+00	1.30E+00	1.00E+00	9.99E-01
WCP	m ³	3.30E+00	3.19E+00	2.82E+00	2.82E+00
FETP	kg 1,4-DCB	2.79E+00	2.56E+00	2.28E+00	2.27E+00
METP	kg 1,4-DCB	4.18E+00	3.81E+00	3.36E+00	3.35E+00
TETP	kg 1,4-DCB	7.30E+02	6.38E+02	5.27E+02	5.14E+02
HTPc	kg 1,4-DCB	3.78E+00	3.35E+00	2.88E+00	2.87E+00
HTPnc	kg 1,4-DCB	1.00E+02	9.31E+01	8.50E+01	8.46E+01
IRP	kBq Co-60 eq	4.09E+00	3.77E+00	3.19E+00	3.17E+00

Los resultados presentados en la Tabla 2.6 muestran reducciones en 17 categorías de impacto (PMFP, GWP, HOFp, EOFp, TAP, FEP, MEP, FFP, SOP, LOP, FETP, METP, TETP, HTPc, HTPnc e IRP) en todos los escenarios; y en general, el caso 3b presenta los mayores decrementos en todas las categorías, seguido por el caso 3a y el caso 2, respectivamente. GWP es probablemente la categoría más estudiada en la producción de cemento. Reportaron que, de acuerdo con los resultados presentados en la tabla anterior, la producción de 1 t de cemento da como resultado 714 kg CO₂ eq para el caso 1, 617 kg CO₂ eq para el caso 2, 480 kg CO₂ eq para el caso 3a, y 479 kg CO₂ eq para el caso 3b. Los hallazgos estuvieron dentro de lo encontrado en diferentes estudios que indicaron que cada t de cemento convencional emite en promedio de 600 a 1000 kg CO₂ eq. También, informaron que cuando la producción de cemento utiliza proporciones de clínker inferiores al 50% y mayor proporción de combustibles alternativos, se alcanzan valores inferiores a 500 kg CO₂ eq; y que los valores para los casos 1 y 2, en los cuales la relación de Clinker es respectivamente del 60,4% y 54,9% y tienen un menor grado de sustitución térmica, están por encima de los 600 kg CO₂eq. Mientras que los valores para los casos 3a y 3b están por debajo de 500 kg CO₂ eq, esos casos utilizan proporciones de clínker del 46% y tienen tasas de sustitución térmica más altas.

En el estudio, el proceso de clinkerización fue el principal contribuyente al GWP, HOFp y EOFp, sin embargo, Çankaya y Pekey [103], informaron que la mayor contribución al PMFP en la producción de cemento en Turquía se deriva del consumo de electricidad, y en contraste, encontraron que el PMFP está asociado con la clinkerización. Concluyen que, de 18 categorías de impacto analizadas; los resultados muestran reducciones en 17 categorías de impacto (PMFP, GWP, HOFp, EOFp, TAP, FEP, MEP, FFP, SOP, LOP, FETP, METP, TETP, HTPc, HTPnc e IRP), que van desde ningún cambio en el agotamiento del ozono (caso 2) hasta una reducción del 39% en la escasez de recursos fósiles (caso 3b).

Los efectos sobre el cambio climático disminuyeron un 14% en el caso 2 y un 33% en los casos 3a y 3b. Informaron que el proceso de clinkerización es el que más contribuye a los impactos atmosféricos, mientras que el consumo de materias primas a los impactos de toxicidad, y que, por el contrario, no existe un único proceso principal que contribuya a los impactos del agotamiento de los recursos. Los cambios en la producción de cemento conducen a reducciones de emisiones de carbono por encima de los niveles esperados y a reducciones en otras categorías de impacto ambiental [102].

En 2022, Tao et al [104] desarrollaron un nuevo tipo de material cementante utilizando residuos sólidos industriales como materia prima, consideraron la preparación y la evaluación ambiental, tomaron como representativa la escoria de titanio casi sin actividad y se reemplazó un pequeño contenido de cemento por residuos sólidos y materias primas industriales como polvo de escoria de

alto horno, caliza y yeso. Realizaron ensayos de resistencia a compresión del mortero, para verificar que cumplía con los requisitos de resistencia y el análisis del ciclo de vida para cuantificar la contaminación ambiental. La Figura 2.17 ilustra los resultados de resistencia a flexión y compresión de los grupos (mostrados en la Tabla 2.7) del mortero de cemento de desechos sólidos después de 3, 7 y 28 días.

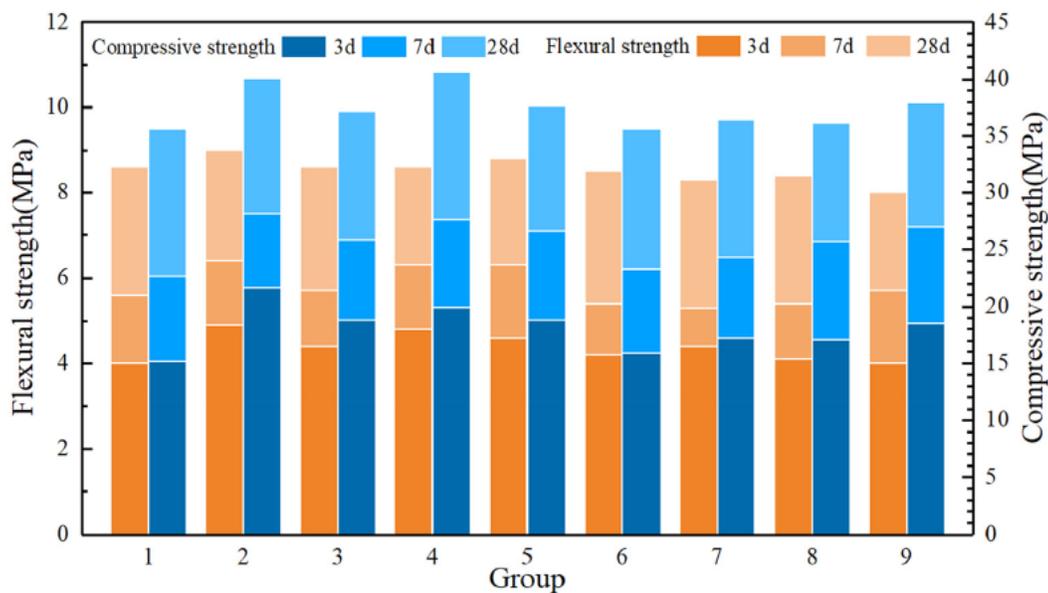


Figura 2.17 Resistencia a flexión y compresión de los grupos del mortero de cemento de desechos sólidos después de 3, 7 y 28 días [104]

Tabla 2.7 Esquema de prueba de cada grupo [104]

Group	Titanium slag (g)	GGBS (g)	Specific surface area (m ² /kg)	Gypsum (g)	Limestone (g)
1	135	135	400	11.25	11.25
2	90	112.5	520	11.25	11.25
3	135	90	520	11.25	11.25
4	90	135	460	11.25	11.25
5	112.5	135	520	11.25	11.25
6	135	112.5	460	11.25	11.25
7	112.5	112.5	400	11.25	11.25
8	112.5	90	460	11.25	11.25
9	90	90	400	11.25	11.25

Los resultados de los análisis de varianza y rango de los ensayos ortogonales revelaron que la fracción de residuos sólidos afectó principalmente a la resistencia a la compresión del mortero de cemento de desecho sólido, y su área de superficie específica influyó principalmente en la resistencia a la flexión. Después de curar durante 28 días, los valores de resistencia a la compresión ya la flexión del material cementante desarrollado fueron de 40,6 MPa y 8,6 MPa, respectivamente. Por otro lado, los resultados del indicador de cada categoría de los residuos sólidos de cemento y cemento convencional son mostrados en la Figura 2.18, e indicaron que el cemento de desecho sólido desarrollado tenía más ventajas ambientales que el cemento ordinario en 18 tipos de impacto ambiental y podría disminuir el impacto ambiental en un 16,1% en total.

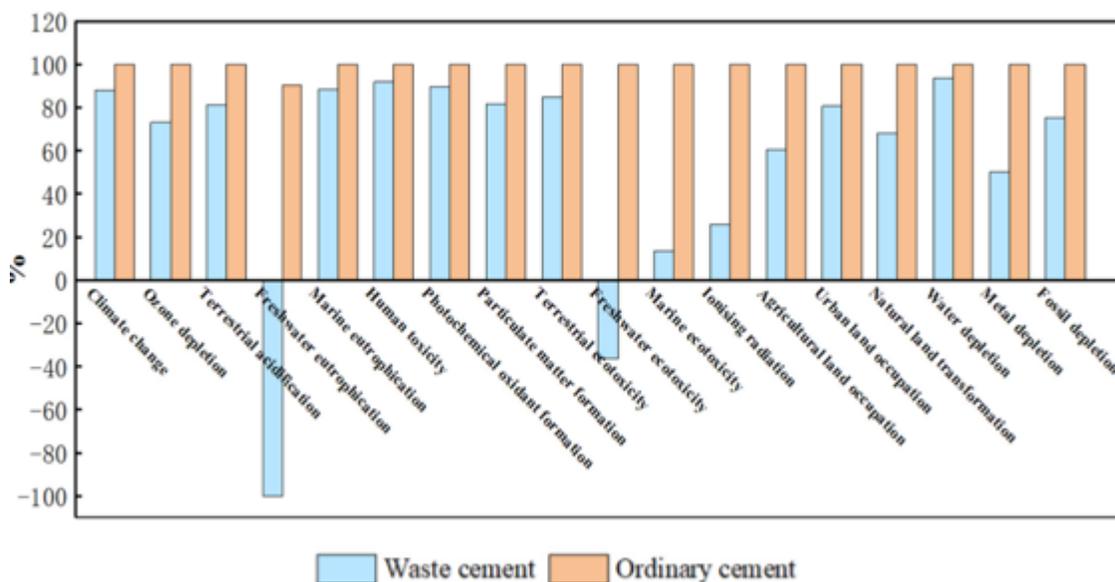


Figura 2.18 Resultados de caracterización de cemento de residuos y el cemento convencional [104]

El cemento de residuos sólidos logró grandes ganancias ambientales en la toxicidad humana, la transformación natural de la tierra, el agotamiento de los metales, el cambio climático y otras categorías de impacto ambiental. Además, la calcinación, el transporte y la extracción de materiales del clínker se identificaron como procesos críticos responsables de la toxicidad humana, la transformación natural del suelo y el agotamiento de los metales. A través de análisis de sensibilidad e incertidumbre, el desarrollo de los residuos sólidos de cemento demostró ser el método más efectivo para disminuir el impacto ambiental del cemento. Finalmente, Informaron que la sustitución de residuos sólidos como materia prima fue una de las formas más efectivas de mitigar el impacto

ambiental del cemento. Los métodos estadísticos también demostraron que el cemento de desecho sólido desarrollado trajo respeto al medio ambiente en comparación con el cemento ordinario [104].

En 2022, Revuelta [29] analizó los impactos ambientales generados por la producción de un nuevo cementante para ser usado en mampostería no estructural, realizando reemplazos parciales con residuos sólidos agroindustriales puzolánicos (cáscara de huevo y cascarilla de arroz), usando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta investigación identificó el aprovechamiento y reincorporación de estos residuos a un nuevo proceso productivo, como lo es la fabricación del cemento. El cemento fue reemplazado en un 40% por diferentes proporciones de cenizas de ambos residuos. Con el fin de identificar los impactos ambientales que se podrían generar en la producción de esta mezcla se realizó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Actualmente en Colombia se estima que la industria de la construcción entre 2018 y 2019 aumentó aproximadamente 7% las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente. En la Figura 2.19 presenta los resultados de la resistencia a la compresión para la mezcla propuesta y la mezcla control a 3, 7 y 28 días.

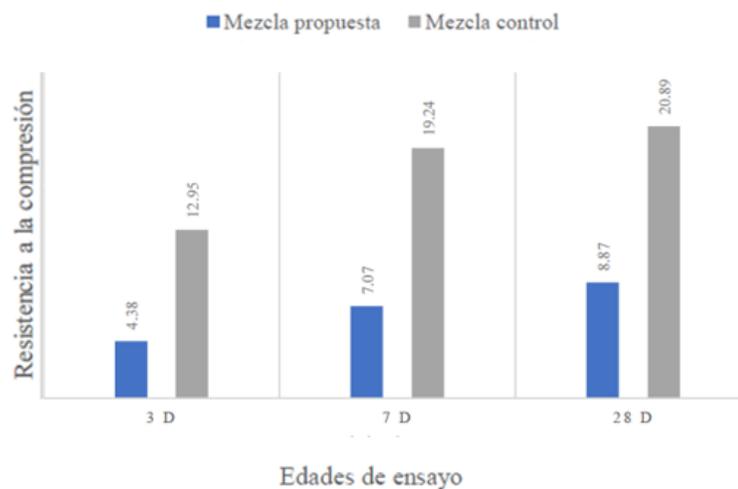


Figura 2.19 Resultados de resistencia a la compresión para la mezcla propuesta y mezcla control [29]

Los resultados mostraron que la mejor resistencia a la compresión fue alcanzada por la mezcla que estaba compuesta por 60% cemento portland y 40% residuos, en una proporción 50% CCH y 50% CCA, con un valor promedio de 8,87 MPa a 28 días de curado, informan que, pese a que los resultados obtenidos para la mezcla propuesta, muestra que no es recomendable utilizarla como cemento de uso general o estructural, si puede ser considerada como material cementante para mampostería, teniendo en cuenta que cumple con el valor mínimo exigido por la norma (NTC 4050) y tendría una baja absorción de agua. La Tabla 2.8 presenta los resultados del ACV del nuevo material cementante propuesto.

Tabla 2.8 Resultados ACV nuevo material cementante [29]

Categoría de Impacto	Unidad	Valor de Impacto
Cambio climático	kg CO ₂ -eq	640,35
Disminución de combustibles fósiles	kg oil-eq	173,52
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-eq	79,82
Disminución del agua	m ³	59,39
Radiación ionizante	kgU235-eq	30,97
Disminución de recursos metálicos	kgFe-eq	10,63
Ocupación de terreno urbano	m ² a	2,26
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB-eq	1,95
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB-eq	1,83
Acidificación terrestre	kg SO ₂ -eq	1,66
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	1,42
Formación de materia particulada	kg PM10-eq	0,70
Eutrofización de agua marina	kg N-eq	0,45
Eutrofización de agua dulce	kg P-eq	0,06
Ocupación de terreno agrícola	m ² a	0,03
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-eq	0,02
Transformación de terreno natural	m ²	0,005
Disminución de la capa de ozono	kg CFC-11-eq	8,4E-05

Los resultados mostraron que en general, se obtuvo que el principal impacto está relacionado con el cambio climático, el cual representa un 63,71% del total de los impactos obtenidos (GEI= 640,35 Kg CO₂-eq) seguido de la disminución de combustibles fósiles con un 17,26% y el tercer lugar lo ocupa la categoría de impacto relacionado con la toxicidad humana con un 7,94%; y si bien, hay un aporte en las categorías restantes, estos son considerablemente menores; por ejemplo: la ocupación de terreno agrícola, ecotoxicidad terrestre, transformación del terreno natural y disminución de la capa de ozono tienen un valor de impacto por debajo del 0,5. La Figura 2.20 presenta la comparación de los resultados de impactos generados por la mezcla propuesta y el cemento Portland. Con el fin de evaluar el comportamiento de ambos materiales cementantes.

Una vez analizadas las diferentes categorías de impacto para ambas mezclas, el autor concluye que el aprovechamiento de residuos como la cáscara de huevo y cascarilla de arroz y su incorporación a procesos productivos brinda una alternativa que permite la disminución de impactos ambientales globales asociados a la producción de cemento como el cambio climático, toxicidad humana, disminución de recursos metálicos entre otros. Así mismo, afirma que se reducirían los impactos derivados de la disposición de residuos en rellenos sanitarios, o incineración a cielo abierto como es el caso de la cascarilla de arroz. Muestra que el material cementante propuesto en esta investigación

disminuye aproximadamente un 30% de los impactos asociados al cambio climático respecto a la producción de cemento portland ordinario [29].

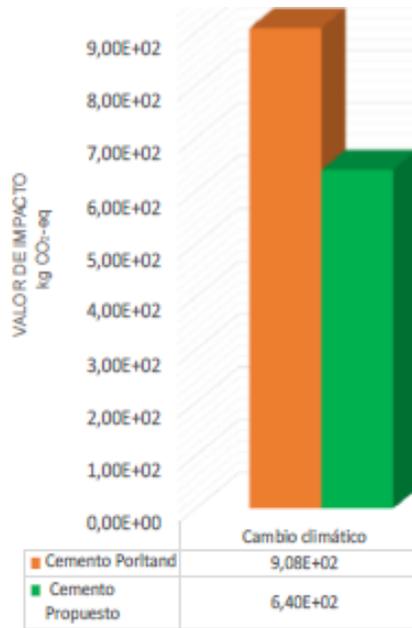


Figura 2.20 Comparativo de resultados cemento Portland Vs nuevo material cementante, asociado cambio climático [29]

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Desarrollar un material compuesto de matriz cerámica de óxido de magnesio, para aplicaciones en el sector de la construcción

3.2 Objetivos específicos

- Establecer una metodología para la obtención de un material cementicio a base de óxido de magnesio a partir de la evaluación de diferentes relaciones molares.
- Establecer experimentalmente las condiciones de procesamiento necesarias para la obtención de un material compuesto con una buena interfase fibra - matriz.
- Evaluar el efecto sobre las propiedades mecánicas y físicas de la incorporación de fibras vegetales en una matriz cementicia a base de óxido de magnesio; mediante la utilización de un diseño de experimentos a fin de obtener un composite con una buena interfase fibra-matriz, para la aplicación en la construcción.
- Analizar las cargas ambientales asociadas al proceso de fabricación de un material cementicio a base de óxido de magnesio, y compararlas con las del cemento Portland.

4. HOJA DE RUTA DE LA TESIS

La tesis se desarrolló en tres fases:

- **Fase I:** Establecimiento de metodología para obtención de un material cementicio a base de óxido de magnesio, a partir de evaluación de diferentes relaciones molares (objetivo específico 1).
- **Fase II:** Evaluación del efecto sobre las propiedades mecánicas y físicas de la incorporación de fibra vegetal en la matriz cementicia a base de óxido de magnesio (objetivos específicos 2 y 3).
- **Fase III:** Análisis de aspectos ambientales asociados al proceso de fabricación de un material cementicio a base de óxido de magnesio y del cemento Portland (objetivo específico 4).

5. FASE I - ESTABLECIMIENTO DE UNA METODOLOGIA PARA LA OBTENCION DE UN MATERIAL CEMENTICIO A BASE DE OXIDO DE MAGNESIO A PARTIR DE DIFERENTES RELACIONES MOLARES

Resumen

El objetivo de este capítulo fue establecer una metodología para la obtención de un material cementicio a base de óxido de magnesio a partir de la evaluación de diferentes relaciones molares. En esta investigación se utilizó óxido de magnesio puro e impuro, cloruro de magnesio hexahidratado y agua. El óxido de magnesio puro fue adquirido en Pressis Ltda (Medellín -Antioquia), el fabricante procesa su propio óxido de magnesio sintético de alta pureza ($MgO > 98.0\%$), asegurando propiedades y composición química. El óxido de magnesio impuro fue adquirido en Industrias emu s.a. en Itagüí – Antioquia, el cual lo identifican como magnesita, magnesia calcinada o magnesita calcinada. El cloruro de magnesio fue adquirido en Químicos JM en Medellín – Antioquia, el cloruro está hexahidratado ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$). El agua utilizada fue agua de grifo. Se usaron diferentes relaciones molares $MgO:MgCl_2$ (12,5:1, 14,8:1, 16,1:1, 18,8:1) y $H_2O:MgCl_2$ (12:1, 15:1, 18:1, 21:1) para preparar las pastas MOC; y luego de 7 días se analizó la resistencia a la compresión. De acuerdo a los resultados obtenidos y la consistencia de las pastas, se prepararon nuevas muestras utilizando las mismas relaciones molares $MgO:MgCl_2$ (12,5:1, 14,8:1, 16,1:1, 18,8:1) y manteniendo constante la relación molar $H_2O:MgCl_2$ (15:1). A las nuevas muestras se les analizaron propiedades como: la resistencia a la compresión, contenido de humedad, porcentaje de absorción de agua, se estudiaron las características de la morfología del material a escalas microscópicas y detalles de las formaciones estructurales y mineralógicas del material. Se comprobó la capacidad cementante del material y se encontró que la variación de las mezclas ejerce una alta influencia en las propiedades evaluadas, en especial, la mezcla preparada con una relación $MgO:MgCl_2$ 12,5:1, la cual presenta la mejor resistencia a la compresión (23,85 MPa), y el menor porcentaje de humedad (4,9%) y de absorción de humedad (10,35%). Asimismo, las observaciones microscópicas revelan la formación de morfologías minerales conocidas como: fases 3 y 5, propias de compuestos de óxido de magnesio. Tales fases fueron confirmadas por medio del análisis de los picos de difracción correspondientes. Finalmente, se resalta que se obtienen materiales con propiedades mecánicas importantes si se comparan con morteros de cemento Portland convencional, resultados importantes que podrían significar una disminución de emisiones de CO_2 para la industria de la construcción.

5.1 Materiales

Las materias primas usadas para preparar el material a base de óxido de magnesio fueron óxido de magnesio, cloruro de magnesio hexahidratado y agua. El óxido de magnesio puro fue adquirido en Pressis Ltda. (Medellín - Antioquia). El fabricante procesa su propio óxido de magnesio sintético de alta pureza ($\text{MgO} > 98,0\%$), asegurando propiedades y composición química. El óxido de magnesio impuro fue adquirido en Industrias emu s.a. (Itagüí – Antioquia), el cual lo identifican como magnesita, magnesita o magnesita calcinadas (pureza del 89,54%). El cloruro de magnesio hexahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) fue adquirido en Químicos JM (Medellín – Antioquia). El agua utilizada fue agua de grifo de la ciudad de Medellín.

5.2 Métodos

5.2.1 Preparación de las muestras

Las muestras se prepararon de acuerdo a lo reportado en la literatura, donde se evidenció que existen dos formas para la preparación de las pastas (ver Tabla 5.1): a) haciendo una mezcla sólida que consiste en mezclar el óxido de magnesio con el cloruro de magnesio y luego añadir el agua [61]; y b) haciendo una mezcla líquida que consiste en disolver el cloruro de magnesio en agua y luego añadir el óxido de magnesio [9], [10], [13], [25], [48], [50], [62], [64]. Para el desarrollo del presente trabajo, la forma empleada para la preparación fue haciendo primero la mezcla sólida, ya que ensayos preliminares permitieron determinar que el tiempo de fraguado era menor.

Tabla 5.1. Formas de preparar la mezcla

Relación molar		Forma	Referencia
MgO:MgCl ₂	H ₂ O:MgCl ₂		
10,8	14,6	Líquida	[48]
11 – 17 (13)	12 – 18 (12)	Líquida	[13]
6.5	13	Líquida	[64]
11	15	Líquida	[9]
5 mol MgO	11, 12, 13, 15, 18, 20	Líquida	[50]
2	5	Líquida	[10]
Partes por peso		Sólida	[61]
Partes por peso		Líquida	[62]
MgO - 20% y 40% solución de H ₂ O:MgCl ₂		Líquida	[25]

En la Tabla 5.2 se detallan las relaciones molares evaluadas en este trabajo, tanto para el MOC impuro como para el MOC puro.

Tabla 5.2 Relaciones molares para preparar las muestras

H₂O:MgCl₂ (↓)	MgO:MgCl₂ (↓)			
	12,5:1	14,8:1	16,1:1	18,8:1
12:1	MOC imp	MOC imp	MOC imp	MOC imp
	MOC puro	MOC puro	MOC puro	
15:1	MOC imp	MOC imp	MOC imp	MOC imp
18:1	MOC imp	MOC imp	MOC imp	MOC imp
21:1	MOC imp	MOC imp	MOC imp	MOC imp

Todos los materiales se prepararon mezclando el óxido de magnesio y el cloruro de magnesio, ambos en polvo, hasta homogenizar; luego se agregó el agua. Las mezclas fueron vertidas manualmente en moldes y luego fueron dejadas al aire libre por 24 horas. Se usaron moldes metálicos rectangulares de 4x4x16 cm para las pruebas de flexión. También se realizó un blanco con óxido de magnesio puro como se muestra en la Tabla 5.2, y otro con cemento Portland. El blanco de cemento Portland se realizó mezclando el cemento más agua hasta obtener la consistencia de la pasta. A los materiales resultantes de las relaciones molares analizadas, se les realizaron la resistencia a la compresión y a la flexión.

Luego de analizar los resultados obtenidos, se decidió seleccionar la relación molar que presentó la mayor resistencia a la compresión y preparar nuevamente probetas cilíndricas elaboradas en pvc de 4,5 mm de diámetro y 9 cm de alto para evaluarlas otra vez. Inicialmente se tenía planeado realizar el ensayo de compresión con las probetas rotas del ensayo a flexión, pero debido a que en este ensayo a flexión se aplica una carga a la probeta hasta romperla, y se produce un esfuerzo de tracción en la parte interna de la probeta y un esfuerzo de compresión en la parte externa; debido a esto, se decidió fabricar probetas cilíndricas. A las probetas cilíndricas se les realizaron los siguientes ensayos: i) compresión a los 7 días (ASTM C39) [105], ii) densidad ([74], iii) porcentaje de humedad (ASTM D1348) [106] y iv) porcentaje de absorción de agua (ASTM C1585) [107]. Para determinar las fases presentes y la morfología de los materiales obtenidos, se realizaron pruebas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM), respectivamente.

5.2.2 Caracterización de las muestras de óxido de magnesio

Composición química: Mediante Espectroscopia de energía dispersiva (EDS) se realizó la caracterización química.

Picnometría de helio. Se determinó la densidad del óxido de magnesio puro e impuro; para esto, se utilizó un picnómetro de Helio. El ensayo se realizó a una temperatura de aproximadamente 20 °C y como condición general, se llenó la celda portamuestras en un 80-90% [108].

Área superficial. El área superficial del óxido de magnesio se calculó por el método BET, el cual se basa en el cálculo del número de moléculas de adsorbato, en este caso de nitrógeno, adsorbidas en monocapa, es decir, el número de moléculas necesarias para cubrir la pared del sólido con una única capa. Las isotermas informan directamente el volumen adsorbido a una determinada presión y permiten también calcular el área superficial del sólido, el tamaño y forma de poro y su distribución, los calores de adsorción, entre otros criterios [109]. En la Tabla 5.3 se presentan las condiciones de desgasificación de las muestras para la fase de evacuación y para la fase de calentamiento; y en la Tabla 5.4 las condiciones del análisis de adsorción/desorción de nitrógeno; teniendo en cuenta la presión del gas y la temperatura.

Tabla 5.3 Condiciones de desgasificación

Fase de evacuación		Fase de calentamiento	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Temperatura de evacuación	90 °C	Velocidad de calentamiento	10 °C/min
Velocidad de calentamiento	10 °C/min	Temperatura	130 °C
Velocidad de evacuación	5.0 mmHg/s	Tiempo	420 min
Evacuación no-restrictiva desde:	5 µmHg	Presión	100 mmHg
Nivel de evacuación	10 µmHg		
Tiempo de evacuación	60 min		

Tabla 5.4 Condiciones de análisis de adsorción/desorción de N₂ a 77 K

Parámetro	Valor
Adsorbato	Nitrógeno
Evacuación no-restricta desde	5 mmHg
Objetivo de vacío	10 µmHg
Tiempo de evacuación	0,1 h
Dosis: Presión baja modo de dosis incremental	25 cm ³ /g STP
Tiempo de evacuación para la medición del espacio libre	0,5 h
Tiempo de equilibrio	30 s hasta 1 (P/P°)
Medición de la presión absoluta (P°)	180 min
Cálculo de la P _{sat} con un valor estimado de P°	640 mmHg
Gas de relleno al inicio y al finalizar el análisis	N ₂
Número de puntos adsorción hasta 0,35 (P/P°)	8
Número de puntos adsorción hasta 1,0 (P/P°)	10
Número de puntos desorción	22

5.2.3 Caracterización de los materiales

Resistencia a compresión. Para determinar la resistencia mecánica de los materiales se realizaron pruebas de compresión, de acuerdo en lo establecidos en la norma ASTM C39 [105]. Los ensayos se llevaron a cabo sobre probetas cilíndricas de 4,5 cm de diámetro y 9 cm de altura. Los ensayos se realizaron a los 7 días posteriores a la conformación de los materiales, y se usó una máquina Universal de ensayos, marca INSTRON, modelo 5582, con una celda de carga de 100 KN a una velocidad de 2 mm/min, a temperatura ambiente (25,7 °C) y una humedad relativa de 38%. De cada relación molar se ensayaron 3 probetas.

Resistencia a flexión: Basados en la norma ASTM C293 [110]. Se realizaron pruebas de resistencia a la flexión sobre probetas prismáticas de 4x4x16 cm. Los ensayos se realizaron a los 7 y 28 días posteriores a la conformación de los materiales. Se usó una máquina Universal de ensayos, marca Instron, modelo 5582, una celda de carga de 100 KN, a una velocidad de 2 mm/min, a temperatura ambiente (25,7 °C) y una humedad relativa de 38%. De cada corrida se ensayaron 6 probetas.

Módulo de elasticidad. Se determinó utilizando los valores de esfuerzo y la medición del desplazamiento del bastidor de la Máquina Universal, y se calculó como la pendiente de la zona elástica, como se muestra en la ecuación 5.1:

$$y = m * x \text{ ecuación (5.1)}$$

Donde y es el esfuerzo, x la deformación y m el módulo de elasticidad.

Porcentaje de humedad. Las muestras se pesaron y luego se secaron en un horno a una temperatura de 105 °C durante 24 h. Las muestras secas se pesaron para calcular el porcentaje de pérdida de peso, como se muestra en la ecuación 5.2. En concordancia con lo reportado en la norma ASTM D1348 [106].

$$\% \text{ de humedad} = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100 \text{ ecuación (5.2)}$$

Donde W_i es peso inicial de la muestra, y W_f es peso de la muestra después de secar al horno después de 24 h.

Porcentaje de absorción de agua. Con base en la norma ASTM C127 [111], las muestras se pesaron, y posteriormente se sumergieron en agua corriente por 24 h a temperatura ambiente. La absorción de agua se determinó usando la ecuación 5.3.

$$\% \text{ de absorción} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} * 100 \text{ ecuación (5.3)}$$

Donde W_1 es peso de la muestra después de secar al horno después de 24 h, y W_2 el peso de la muestra después de sumergida en agua por 24 h.

Densidad. Los valores de las densidades se obtuvieron como la media de tres probetas, calculada cada una de ellas como la masa (g) de la probeta, dividida por el volumen de la misma; de acuerdo a lo realizado en [74].

Difracción de rayos X (DRX). La identificación de las fases cristalinas formadas en los materiales se realizó mediante DRX. Los ensayos se realizaron en un Difractómetro de Rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empyeen 2012, con detector Pixel 3D y fuente de Cu ($\lambda=1,541874$) a 45kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: Reflexión Transmisión Spinner girando a 4 rpm. El paso fue de $0,05^\circ$ y un tiempo por paso de 52 s.

Microscopia electrónica de barrido (SEM): Las muestras fracturadas en el ensayo de compresión fueron recubiertas con oro antes de las observaciones. Se usó un microscopio electrónico de barrido marca JEOL (JCM - 6000 Plus). Se estudió la morfología de las muestras con diferentes relaciones molares y en algunas zonas mediante espectroscopia de dispersión de energía (EDS) la composición elemental de las diferentes zonas observadas. El ensayo se basó en la norma ASTM E986 [112].

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Composición química, Densidad y área superficial de las muestras de MgO

La composición química resultante del análisis elemental del MgO utilizado fue: Oxígeno (O) 40,88% y Magnesio (Mg) del 59,12%. En la ficha técnica del fabricante reportan que el Mg es el 54%

La composición química del cloruro de magnesio no se pudo obtener, debido a su carácter higroscópico, no permitió realizar el EDS; y no se realizó un esfuerzo adicional para obtenerla por otros métodos, debido a que revisando la literatura se encontró que para efectos de los resultados de las propiedades mecánicas está no influye, como fue demostrado en la investigación realizada por Avani et al (2021), quienes utilizaron dos tipos de cloruro de magnesio hexahidratado, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, uno con un 47 y el otro del 99% de pureza, evaluaron la resistencia a compresión a los 7 días de materiales fabricados con estos dos tipos de cloruro de magnesio; y reportaron que los resultados obtenidos son similares, concluyendo que la pureza del $MgCl_2$ no tiene influencia significativa en las propiedades mecánicas [113]. El Cloruro de magnesio utilizado tiene una pureza del 99%, según lo reportado por el fabricante.

En la Tabla 5.5 se muestran los valores de la densidad, el área superficial y el volumen total adsorbido de las muestras de óxido de magnesio. Se puede evidenciar que, la densidad del MgO puro es mayor que la del óxido de magnesio impuro. Se ha argumentado que las impurezas de este tipo de óxido pueden afectar considerablemente el valor de la densidad, debido a que producen cambios microestructurales en los arreglos cristalinos que incrementan el volumen ocupado y por lo tanto disminuyen la densidad [43].

Tabla 5.5 Valores de densidad del óxido de magnesio

Nombre	Densidad (g/cm ³)	S _{BET} (m ² /g)	V TOT (g/cm ³)
MgO puro	3,48	0,7	6,53
MgO impuro	2,78	3,3	30,10

Con relación al área superficial, se observa un comportamiento contrario, es decir, las muestras de óxido de magnesio impuro presentan los mayores valores. Sin embargo, estas áreas superficiales son bajas si se comparan con las obtenidas por otros investigadores [5, 17, 18]. La Figura 5.1 muestra las isothermas adsorciones/desorción de nitrógeno a 77 K de óxido de magnesio fino y granular.

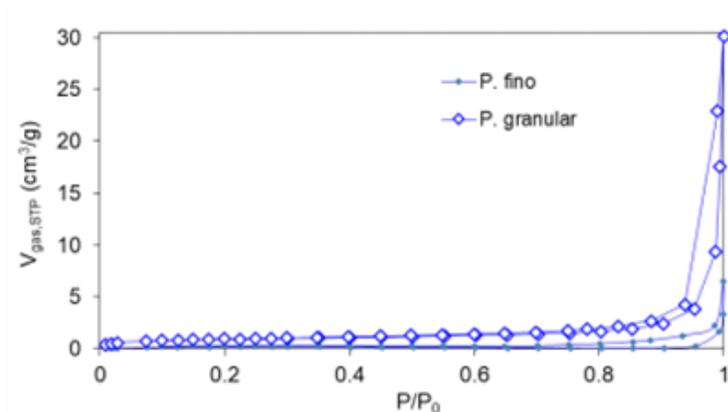


Figura 5.1 Isothermas de adsorción/desorción de nitrógeno a 77 K

5.3.2 Propiedades de los materiales obtenidos

La Tabla 5.6 muestra los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días de edad de las primeras muestras realizadas, mientras que la Tabla 5.7 presenta los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días de los blancos (MgO puro y el cemento Portland). Hubo algunos casos en que las muestras no se conformaron bien (quedaban muy secas o demasiado líquidas) por lo cual no se reportan valores de resistencia a la compresión, ni del módulo en la Tabla 5.6. Así, como también en la Tabla 5.7.

Tabla 5.6 Resultados a la compresión a los 7 días de los materiales a base de (MgO impuro)

H ₂ O:MgCl ₂ (↓)	MgO:MgCl ₂ (↓)			
	12,5:1	14,8:1	16,1:1	18,8:1
Resistencia máxima (MPa)				
12:1	11,69	6,92	4,57	4,57
15:1	21,9	14,54	8,38	8,38
18:1	14,3	14,4	11,08	9,45
21:1	N.A	N.A	N.A	5,77
Módulo de elasticidad (MPa)				
12:1	1.438,52	876,62	680,91	
15:1	2.095,40	1.680,81	1.352,3	526,72
18:1	1.144,51	1.257,30	1.089,52	1.000,09
21:1	N.A	N.A	N.A	362,7

* N.A: Estas probetas no se lograron conformar

Tabla 5.7 Resistencia a la compresión (MPa) a los 7 días de los materiales a base de MgO puro y de cemento Portland

H ₂ O:MgCl ₂ (↓)	MgO:MgCl ₂ (↓)			
	12,5:1	14,8:1	16,1:1	18,8:1
12:1	4,95	5,4	6,3	-
Cemento Portland		14,28		

En cuanto a la resistencia a la compresión se observó que varía de acuerdo con el tipo de óxido de magnesio utilizado. Los materiales elaborados con el óxido de magnesio puro mostraron menores valores de resistencia a la compresión (valor max. de 6,3 MPa) en comparación con el óxido de magnesio con impurezas (valor max. de 21,9 MPa) y con la pasta de cemento Portland (14,28 MPa). También, se evidencia que la resistencia del MOC elaborado con MgO impuro, es superior a la del cemento Portland. De acuerdo a los resultados obtenidos y debido a que para obtener el óxido de magnesio puro se requiere una temperatura de calcinación (1.400 – 2.000 °C) [114]; superior a la del cemento Portland, se decidió continuar solo trabajando con el óxido de magnesio impuro u óxido de magnesio reactivo, el cual requiere temperaturas de calcinación (700 – 1.000 °C) [44], temperaturas inferiores a las de los blancos.

Analizando los resultados del efecto de las relaciones molares MgO:MgCl₂ y H₂O:MgCl₂ en la resistencia a la compresión, se observó que a medida que la relación MgO:MgCl₂ disminuía, tanto la resistencia como el módulo aumentaban. De otra parte, en cuanto a la relación molar H₂O:MgCl₂, no se observó una tendencia clara, ya que en unos casos aumentaba y luego disminuía. Es importante

mencionar la importancia de la relación $H_2O:MgCl_2$ en la conformación del material, ya que como se evidencia en la Tabla 5.6, en la relación 21:1, no se lograron obtener todos los materiales, por exceso de agua. Además, ensayos preliminares mostraron que, relaciones molares por debajo de 12:1, tampoco permitían obtener estos materiales, por falta de agua.

De acuerdo a los resultados, las relaciones molares $MgO:MgCl_2$ (12,5:1) y $H_2O:MgCl_2$ (15:1), se obtuvieron los mayores valores, tanto de resistencia a la compresión como de módulo de elasticidad (2,1 GPa). Es por ello que considerando los resultados observados anteriormente, se definió esta relación como fija y variando la relación molar $MgO:MgCl_2$ (12,5:1, 14,8:1, 16,1:1 y 18,8:1), para obtener el nuevo material propuesto en esta investigación.

Las Figuras 5.2 y 5.3 muestran los resultados de los ensayos de resistencia a compresión a los 7 días y densidad; y absorción de agua y el contenido de humedad, respectivamente, de acuerdo con la relación molar evaluada.

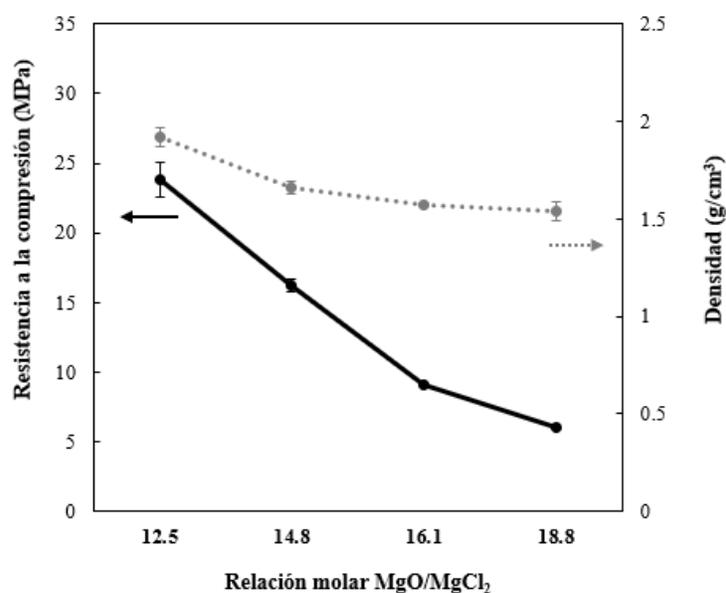


Figura 5.2 Izquierda: Resistencia a la compresión a los 7 días. Derecha: Densidad

En la Figura 5.2 se puede observar que con una relación molar $MgO:MgCl_2$ de 12,5:1 la resistencia a compresión fue de 23,85 MPa; la cual fue disminuyendo a medida que aumentaba dicha relación; para 14,8: fue de 16,18 MPa, para 16,1 fue de 9,14 MPa, y la menor resistencia se presenta para la mezcla $MgO:MgCl_2$ de 18,8:1 5,77 MPa. De otra parte, en lo referente a la densidad, se observa una leve diferencia entre las relaciones molares trabajadas, siendo mayor para aquellos con una relación 12,5:1

con un valor de $1,92 \text{ g/cm}^3$; y se puede afirmar que esto influye en los resultados de la resistencia a la compresión; como se pudo observar el MOC con relación molar 12.5:1 desarrolla mayor resistencia.

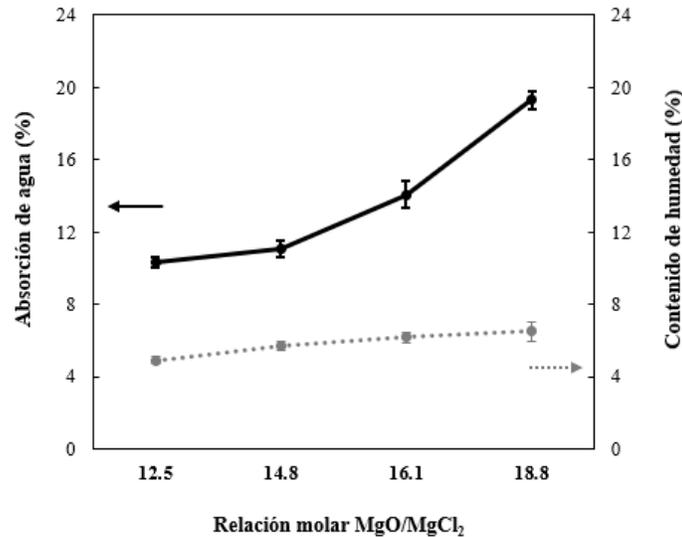


Figura 5.3 Izquierda: Absorción de agua. Derecha: Contenido de humedad

En cuanto al porcentaje de absorción de las diferentes mezclas, se puede observar en la Figura 5.3 un comportamiento contrario al que se observó en la resistencia a la compresión y a la densidad, donde la relación molar 18,8:1 presenta el mayor porcentaje de absorción (19,29%), y la relación 12,5:1 el valor más bajo (10,35%). De otra parte, se observa que, al aumentar la relación molar, aumenta el contenido de humedad, así, la relación molar 18,8:1, muestra el mayor porcentaje.

Los resultados mostrados en la Figura 5.3 guardan una estrecha coherencia con los resultados de la resistencia a la compresión y evidencian que los cambios que se presentan entre las diferentes relaciones molares tienen una influencia clara sobre la afinidad del material con el agua. Este comportamiento resulta de gran importancia para el desempeño de los materiales, ya que la exposición de estos al agua, tiende a disminuir la resistencia, lo cual coincide con lo reportado en [52]. Se puede inferir que, al sumergir las muestras en el agua, el óxido de magnesio (MgO) sin reaccionar entra en contacto con esta molécula (H_2O); como consecuencia, se da la descomposición de la fase 5, que es considerada la fase que proporciona las mejores propiedades mecánicas, y se forma brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).

En la Tabla 5.8 se resumen los resultados de los ensayos realizado a las nuevas muestras realizadas con las mismas relaciones molares MgO:MgCl₂ (12,5:1, 14,8:1, 16,1:1 y 18,8:1) y con la relación molar fija H₂O.MgCl₂ (15:1).

Tabla 5.8 Propiedades MOC seleccionados

MgO:MgCl ₂	18,8:1	16,1:1	14,8:1	12,5:1
Resistencia a la compresión a los 7 días (MPa)	5,77 ± 0,06	9,14 ± 0,08	16,18 ± 0,45	23,85 ± 1,24
Densidad (g/cm ³)	1,59 ± 0,05	1,57 ± 0,01	1,66 ± 0,03	1,92 ± 0,05
Absorción de agua (%)	19,29 ± 0,49	14,06 ± 0,73	11,07 ± 0,48	10,35 ± 0,28
Contenido de humedad (%)	6,5 ± 0,54	6,2 ± 0,29	5,7 ± 0,27	4,9 ± 0,22

En la Figura 5.4 se muestran los difractogramas. Se observa que en todos los MOC, los picos de mayor intensidad se presentan en los valores de 2theta de 42,5 correspondiente a difracciones típicas de compuestos de MgO y MgCO₃, y en 2 theta de 62,5 correspondiente a MgO. Según las intensidades y ángulos de difracción se puede afirmar que, para estas relaciones molares utilizadas, los compuestos de magnesio tienden a estructurarse formando la fase 5, también se observa la presencia de la fase Mg(OH)₂; y se aprecia la fase 3 en una menor proporción. Para todas las muestras predomina la fase 5. Los resultados indican que las mezclas evaluadas forman sólidos con estructuras policristalinas, variaciones propias de compuestos de magnesio (óxidos, carbonatos, hidróxidos, etc.) que coinciden con los hallazgos reportados en [13] [9] [25] [64] [115] [116] [117].

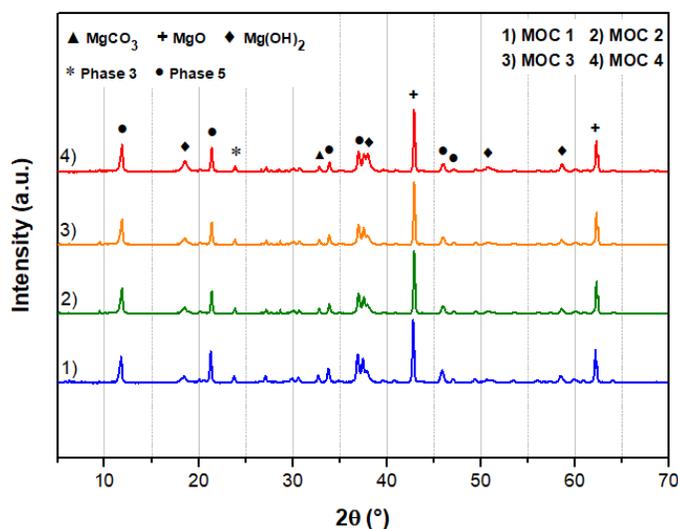


Figura 5.4 Difractogramas 1) MOC 1 = 12.5:1-15:1, 2) MOC 2= 14.8:1-15:1, 3) MOC 3 = 16.1:1-15:1, 4) MOC 4=18.8:1-15:1

Estos resultados presentan un comportamiento similar al reportado por otros autores [52] [115], donde se ha observado que, relaciones $\text{MgO}/\text{MgCl}_2 > 5$ y MgCl_2 de 6-15, favorecen la formación de fase 5, siendo esta el principal producto de reacción de los materiales, y responsable de las mejores propiedades mecánicas [52]. También se ha reportado que para obtener dominancia de cristales de fase 5 en una pasta MOC, la relación molar $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ debe estar entre 11-17 [118].

El análisis morfológico se presenta en la Figura 5.5 Se muestran las superficies de fractura de los MOC elaborados con las diferentes relaciones molares utilizadas; luego de ser sometidos a ensayos de resistencia a la compresión.

La Figura 5.5a) muestra los resultados de análisis SEM de la relación molar 12.5:1, presenta la imagen en un punto y una ampliación. Se evidencia una superficie porosa y las formas características de la fase 5 en forma de agujas o filamentos; acorde con lo reportado en [10, 11, 22, 18]. De otra parte, en la Figura 5.5 b) se presentan los resultados de análisis SEM de la relación molar 14.8:1; presenta la imagen en un punto y una ampliación; se evidencian las formas características de la fase 3 y 5 reportadas en [10, 11, 22, 18]. La fase 3 aparece en forma de cristales escamosos, mientras que la fase 5 aparece en forma de agujas. La Figura 5.5 c) muestra los resultados de análisis SEM de la relación molar 16.1:1; presenta la imagen en un punto y una ampliación, al igual que lo presentado en la relación molar 14.8, se evidencian las formas características de la fase 3 y 5 reportadas en [10, 11, 22, 18]. La fase 3 aparece en forma de cristales escamosos, mientras que la fase 5 aparece en forma de agujas. La Figura 5.5 d) los resultados de análisis SEM de la relación molar 18.8:1; presenta la imagen en un punto y una ampliación; se evidencian las formas características de la fase 3 y 5 reportadas en [10, 11, 22, 18]. La fase 3 aparece en forma de cristales escamosos, mientras que la fase 5 aparece en forma de agujas. Con las 4 relaciones molares utilizadas se evidencia la formación de fase 5; resultados consistentes con la composición de la fase cristalina detectada mediante DRX. Los resultados son concordantes con lo expuesto por Guo Y. et al [118]: para obtener dominancia de cristales de fase 5 en una pasta MOC, la relación molar $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ debe estar entre 11-17 y la relación molar $\text{H}_2\text{O}:\text{MgCl}_2$ entre 12-18.

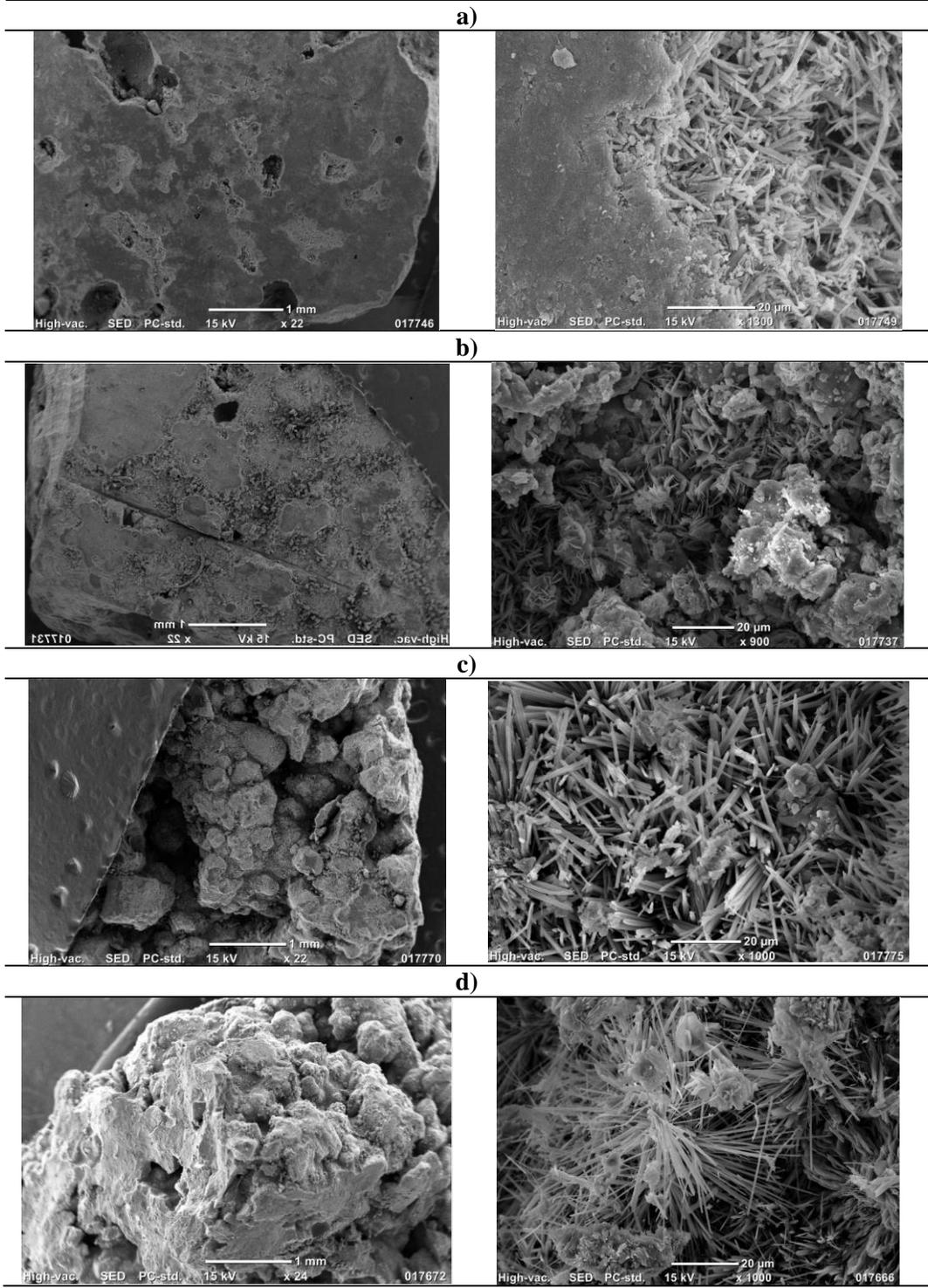


Figura 5.5 Imágenes SEM: a) 12.5:1 – 15:1, b) 14.8:1 – 15:1, c) 16.1:1 – 15:1, d) 18.8:1 – 15:1

Con el fin de corroborar la estructura y morfología de los materiales, se realizó un comparativo de los resultados del DRX y el SEM, el cual es presentado en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Análisis comparativo - Resultados DRX y SEM

Fases		Composición			Morfología		
MgO:MgCl ₂	DRX	SEM	Mineral DRX	Elemental EDS	Porosa	Agujas	Escamas
12.5:1	Fase 5, Mg(OH) ₂	Fase 5	MgO, MgCO ₃	C O	X	X	
14.8:1	Fase 3, fase 5, Mg(OH) ₂	Fase 3, fase 5	MgO, MgCO ₃	Na Mg- Al-	X	X	X
16.1:1	Fase 3, fase 5, Mg(OH) ₂	fase 5	MgO, MgCO ₃	Si- Cl-		X	
18.8:1	Fase 3, fase 5, Mg(OH) ₂	Fase 3, fase 5, Mg(OH) ₂	MgO, MgCO ₃	Ca- Fe		X	X

Para verificar los elementos constitutivos de los MOC, se tomó una de las muestras y se realizó el análisis elemental (EDS) por SEM. La Tabla 5.10 muestra los resultados del EDS tomado en los puntos 009-010 y 011 de la Figura 5.6, correspondiente a relación molar MgO:MgCl₂ - 18.8:1. Se observa que esta presenta elementos como carbono, oxígeno, magnesio, aluminio, cloro, calcio y pequeñas cantidades de hierro.

Tabla 5.10 Porcentaje en masa de elementos presentes en el MOC

	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Total
009	13,56	58,83	0,00	23,67	0,15	2,16	1,02	0,55	0,06	100,0
010	9,78	51,43	0,00	21,31	0,12	16,27	0,79	0,29	0,00	100,0
011	13,59	57,26	0,09	23,40	0,24	2,79	1,63	0,99	0,01	100,0

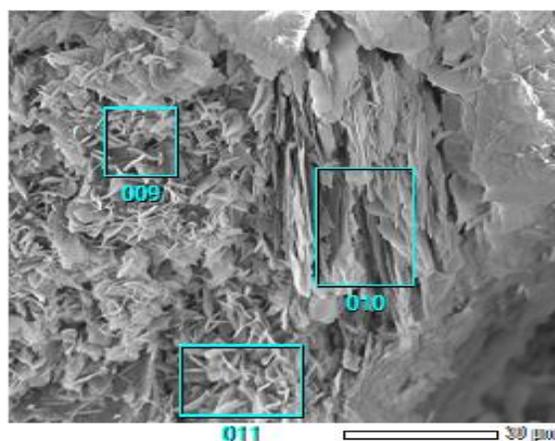


Figura 5.6 EDS 18.8:1 – 15:1

5.4 Conclusiones

En este estudio se consiguió obtener un material con características cementantes a base de óxido de magnesio al 89,54%, se logró comprobar la predominancia de la fase 5 en las cuatro relaciones molares analizadas. Se evidenció que la relación molar $MgO:MgCl_2$ tiene una alta influencia sobre las propiedades y que una relación 12,5:1, presenta la mejor resistencia a compresión después de 7 días de curado al aire, al tiempo que, presenta una menor humedad y capacidad de absorción de agua. Finalmente, se resalta que la investigación experimental realizada permite la obtención de materiales con propiedades mecánicas competitivas si se comparan con morteros de cemento Portland convencional.

6. EVALUACION DEL EFECTO DE LA INCORPORACION DE CASCARILLA DE ARROZ EN LA MATRIZ CEMENTICIA A BASE DE OXIDO DE MAGNESIO

Resumen

El objetivo de este capítulo fue evaluar el efecto de la incorporación de la cascarilla de arroz y el tratamiento con NaOH sobre propiedades mecánicas, en un material compuesto a base de cemento de oxiclورو de magnesio, y determinar las condiciones ideales para una buena interfase fibra-matriz. En este trabajo se analizó la posibilidad de utilizar la cascarilla de arroz sin y con tratamiento – mercerización-, como complemento en la preparación de diferentes materiales compuestos de cemento de oxiclورو de magnesio. Se utilizó un diseño de experimentos factorial 3k, teniendo como factores controlables el porcentaje de cascarilla de arroz y la concentración de hidróxido de sodio, y como variable respuesta la resistencia a la compresión del compuesto. También se probaron propiedades como la densidad y la resistencia a la flexión. Finalmente, se seleccionaron cuatro compuestos y fueron analizados mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Los resultados mostraron que las propiedades mecánicas del material mejoran cuando es reforzado con el 1,5% de cascarilla de arroz tratada al 5% de NaOH a los 28 días.

6.1 Materiales

Las materias primas usadas fueron óxido de magnesio, cloruro de magnesio hexahidratado, agua desionizada, cascarilla de arroz, hidróxido de sodio y ácido acético. El hidróxido de sodio fue utilizado en pellets al 98%, de la marca AppliChem Panreac, el ácido acético fue glacial HPLC grade. El óxido de magnesio fue adquirido en Industrias emu s.a. en Itagüí – Antioquia, el cual lo identifican como magnesita, magnesia calcinada o magnesita calcinada, con una finura que pasa a través del tamiz # 50. El cloruro de magnesio hexahidratado ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) fue adquirido en Antioqueña de químicos s.a.s, en Medellín – Antioquia. La cascarilla de arroz fue suministrada por la Universidad de los Andes, obtenida de la zona central de Colombia, departamento del Tolima.

6.2 Métodos

6.2.1 Mercerización de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz fue mezclada con una solución de NaOH en dos concentraciones diferente: 5 y 10%, en una relación 1:20 (g de cascarilla: ml de solución). Los niveles de concentración del tratamiento se eligieron de acuerdo a la revisión de la literatura y a ensayos preliminares reportados por investigadores. La suspensión se mantuvo en agitación mecánica durante 3 h. Pasado este tiempo se realizó la decantación de la mezcla, se filtró la cascarilla de arroz y se lavó con agua desionizada. La cascarilla lavada se enjuagó con una solución de ácido acético al 0,5%, en una relación 1:20 (g de cascarilla: ml de solución) hasta alcanzar un pH = 7. Finalmente, las fibras se secaron en un horno de convección forzada marca Memmert a 105 °C durante 2 h (Tappi T264).

6.2.2 Preparación de los materiales a base de óxido de magnesio reforzados con cascarilla de arroz

Los materiales se elaboraron de acuerdo con el orden experimental presentado en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Orden experimental para la elaboración del material compuesto

	Corrida									
	Control	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fibra (%)	0,0	1,5	3,0	4,5	1,5	3,0	4,5	1,5	3,0	4,5
Trat. (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0

Primero se realizó una mezcla sólida con óxido de magnesio y cloruro de magnesio a una relación molar MgO:MgCl₂ de 12.5:1 hasta homogenizar, luego se añadió agua a una relación molar H₂O:MgCl₂ de 15:1; [61]; se escogió esta relación molar por las razones expuestas en el capítulo anterior. Por último, se adicionó la cascarilla de arroz, con un tamaño de partícula que pasa malla 40 (425 µm) y es retenida en la malla 60 (250 µm). Se utilizó un diseño de experimentos factorial 3^k, teniendo como factores controlables el porcentaje de fibra y el porcentaje de tratamiento con NaOH; a tres niveles cada uno. Como variables de respuesta se tienen la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad; como se muestra en la Figura 6.1.

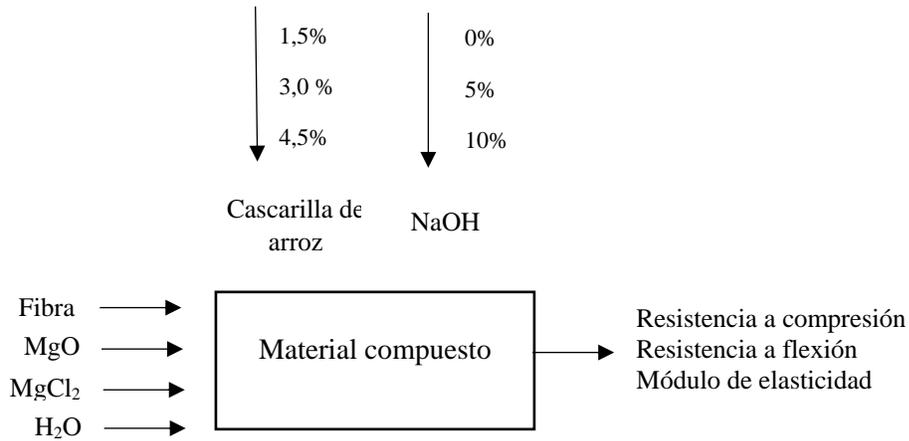


Figura 6.1 Diseño experimental elaboración del material compuesto

Los niveles de porcentajes de fibra se seleccionaron de acuerdo con ensayos preliminares realizados, inicialmente se probó con el 2,5; 5 y 10% (w/w), se descartaron el 5 y el 10% (w/w) por la mala conformación del material. Luego se prepararon materiales con el 2,9; 3,2 y 3,3% (w/w), y se obtuvieron mejores resultados, pero se decidió probar que sucedía con menores y mayores porcentajes, y fue así que se seleccionaron porcentajes del 1,5; 3 y 4,5 de cascarilla (w/w) para tener un mayor rango, y se observó un buen comportamiento durante el proceso de mezcla, por lo que se trabajó con este último porcentaje. Se utilizó el software *Statgraphics* para definir el orden experimental que se empleó para la elaboración de los diferentes materiales compuestos (ver Tabla 6.1).

Cada mezcla fue vertida manualmente en moldes cilíndricos de 4,5 cm de diámetro y 9 cm de altura, y en moldes de 4x4x16 cm. Las pastas fueron dejadas al aire libre, desencofradas a las 24 horas, y ensayadas mediante pruebas de flexión y compresión a los 7 y 28 días. Además, se evaluó su densidad, porcentaje de humedad y porcentaje de absorción. Para determinar las fases presentes y morfología de los materiales obtenidos, se realizaron pruebas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

6.2.3 Caracterización de la cascarilla de arroz y del material compuesto

Tamaño de partícula. Se siguió el ASAE Standard S319 [120]. Se realizó una pila de 8 tamices estándar de EE. UU; los números utilizados fueron: 4, 8, 12, 14, 20, 30, 60 y 100. Se colocaron 100 g de la muestra en el tamiz superior con una tapa y se montaron en un agitador mecánico durante 15 min. Se realizaron 3 repeticiones.

Contenido de humedad. Con el fin de determinar el contenido de humedad se siguió el procedimiento establecido en la ASTM D1348. 2 g de cascarilla de arroz de tamaño de partícula 425 μm (malla 40) y retenido en malla 60 (250 μm) se llevaron a un horno a 105 °C por 2 h. Pasado este tiempo se sacó del horno y se dejó enfriar en un desecador por 2 horas y luego se pesó. Se realizaron 12 repeticiones. Para el cálculo del contenido de humedad, se utilizó la ecuación (6.1).

$$\% \text{ de humedad} = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100 \text{ ecuación (6.1)}$$

Densidad partícula. La metodología seguida para determinar la densidad de partícula fue apoyada en el método del picnómetro. Para eliminar el espacio ocupado por los poros de la cascarilla de arroz, esta fue reducida a un tamaño entre 250 y 425 μm , luego fue introducida en un recipiente cilíndrico de volumen conocido y aplastada con un mortero para compactarla y así eliminar el aire atrapado entre poros, luego se enrasó y pesó. La densidad de partícula se calculó como el peso de la cascarilla de arroz dividido por el volumen del recipiente. Se realizaron 6 repeticiones.

Densidad aparente. Se siguió el método ASAE estándar S269.5 [121]. Inicialmente, se llenó hasta la tercera parte de un recipiente cilíndrico y se golpeó 10 veces para asentar el material antes de llenarlo; después se eliminó el exceso de material en la parte superior. Posteriormente se pesó la cantidad de material almacenado dentro del recipiente. Finalmente, se calculó la densidad aparente, mediante la división del peso sobre el volumen. En total se hicieron 6 repeticiones.

El análisis químico de la cascarilla de arroz se realizó de acuerdo con los procedimientos de las normas ASTM y los métodos establecidos por la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel (TAPPI), realizando algunas modificaciones. Específicamente, se determinó el contenido de ceniza, extractivos, lignina y celulosa. La cascarilla de arroz se molió hasta obtener un tamaño de partícula que pasara por malla 40 (425 μm) y fuera retenida en una malla 60 (250 μm).

Contenido de ceniza. Para determinar el contenido de cenizas se utilizó el método estándar ASTM E1755. Una muestra secada previamente a 105 °C se pesó en un crisol y se llevó a una mufla que se precalentó cuidadosamente a 250 °C. La temperatura se mantuvo constante durante 30 min y posteriormente se llevó a 575 °C \pm 25 °C, temperatura a la cual se dejó calcinar durante 4 h. La muestra calcinada se dejó enfriar a temperatura ambiente en un desecador. El porcentaje de cenizas se calculó con base en la relación entre el peso de la muestra después del proceso de calcinación y el peso seco original.

Contenido de extractivos. El ensayo de contenido de extractivos fue realizado de acuerdo con lo establecido en el método TAPPI T204, utilizado para la determinación de ceras, grasas y resinas

superficiales del tejido. Para realizar la extracción se utilizó un aparato Soxhlet durante 5 h con sifoneo aproximadamente cada 12,5 min. Para ello se colocaron en un dedal 6 g de cascarilla seca y se usó etanol-tolueno a una relación (1:2 v/v) como solventes [122] [123]. Pasadas las 5 h, se rotaevaporó la mezcla de solventes; luego se determinó el peso de la parte residual. El contenido de extractivos se calculó con base en el porcentaje del peso seco del extracto con respecto al peso seco de la cascarilla. Se realizaron 6 repeticiones.

Contenido de lignina. Se calculó el contenido de lignina utilizando el método TAPPI T222. 2 g de cascarilla de arroz seca y libre de extractos se trató con ácido sulfúrico al 72% durante 2 h, macerándola y agitándola con una varilla de vidrio para lograr disolución completa. Luego, el material se diluyó con agua desionizada para dar una mezcla con 3% de ácido sulfúrico; esta disolución se hirvió a reflujo para mantener el volumen constante durante 4 h. Posteriormente, el material coagulado se dejó enfriar y sedimentar, y la lignina se filtró, lavó con agua caliente, secó al horno a 105 °C y se pesó después de enfriar. El contenido de lignina se calculó con base el porcentaje de peso del sólido filtrado y el peso inicial de la muestra ensayada. Se realizaron 6 repeticiones.

Contenido de celulosa. El contenido de celulosa y hemicelulosa se midió siguiendo el método TAPPI T203. Para determinar el porcentaje de alfa-celulosa, se realizó extracción de 1,5 g de cascarilla de arroz libre de extractos en una solución de hidróxido de sodio al 17,5% a 25 °C. La alfa, beta y gamma celulosa se determinaron por oxidación con dicromato de potasio. La alfa-celulosa fue la fracción de pulpa resistente a la solución de hidróxido de sodio al 17,5%; la beta-celulosa fue la fracción soluble que volvió a precipitar al acidificar la solución; y gamma-celulosa fue la fracción restante de la solución. Durante la primera oxidación, se determinó la fracción de beta y gamma celulosa, la fracción disuelta y la alfa-celulosa fueron determinada como fracción no disuelta por diferencia entre el 100% de la muestra y la fracción disuelta. Después, en la segunda oxidación, se determinó la gamma-celulosa; y la beta-celulosa se determinó por la diferencia entre la primera y segunda oxidación. Se realizaron 3 repeticiones.

Morfología. La morfología de la superficie de la cascarilla de arroz se estudió mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Para el análisis, las muestras fueron previamente recubiertas con oro utilizando un aparato Denton Vacuum Desk IV; luego se observaron con el microscopio electrónico de barrido usando un equipo SEM JEOL (JCM - 6000 Plus). En algunas zonas de las muestras analizadas, se utilizó la técnica de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS); para identificar la composición elemental.

Difracción de rayos X. Se realizó un análisis de las muestras de cascarilla de arroz utilizando la técnica de difracción de rayos X. La identificación de las fases cristalinas formadas en los materiales

se realizó mediante DRX. Los ensayos se realizaron en un Difractómetro de Rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empyeon 2012, con detector Pixel 3D y fuente de Cu ($\lambda=1.541874$) a 45kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: Reflexión Transmisión Spinner. El paso fue de 0 y un tiempo por paso de 54 s.

Resistencia mecánica. Para determinar la resistencia mecánica de los materiales obtenidos se realizaron pruebas de resistencia a la flexión (probetas prismáticas de 4x4x16 cm) y a la compresión (probetas cilíndricas de 4,5 cm de diámetro por 9 cm de altura). Los ensayos se realizaron a los 7 y 28 días posteriores a la conformación de los materiales. Se usó una máquina Universal de ensayos - marca Instron, modelo 5582- una celda de carga de 100 KN, una velocidad de 2 mm/min, a temperatura ambiente (25,7 °C) y una humedad relativa de 38%. De cada corrida se ensayaron 6 probetas a compresión y seis a flexión.

6.2.4 Caracterización del material compuesto

Los ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, densidad, contenido de humedad, porcentaje de absorción de agua, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido, se realizaron de acuerdo con lo descrito en el numeral 5,32 (caracterización de los materiales).

6.3 Resultados y discusión

6.3.1 Análisis físico de la cascarilla de arroz

Tamaño de partícula. La distribución de tamaño de partícula puede ser observada en la Figura 6.2, donde se aprecia que la mayor parte de la cascarilla de arroz (42,95%) es recolectada en la malla 12 (1,68 mm). También muestra que, el 71,4% de la cascarilla de arroz tiene un diámetro superior a 0,85 mm, que corresponde a la malla 20. Se observa que la desviación estándar es alta para los porcentajes recolectados en las mallas 12, 14 y 20. Lo anterior, puede ser debido a que la cascarilla presentaba roturas ocasionadas durante el proceso de molienda. En general, la cascarilla presenta un tamaño de partícula mayor a los reportados por otros autores de 0,212 a 0,850 mm, ya que muy probablemente tuvo piezas rotas durante el proceso de molienda [123].

Contenido de humedad. La cascarilla de arroz utilizada tiene un porcentaje de humedad de $6,55 \pm 1,72$; el cual está dentro de los rangos reportados en la literatura (4,55 – 10,57%) [124]. Otros autores reportan entre el 8 – 15% [125]. La diferencia en los porcentajes reportados se puede atribuir al manejo y almacenamiento que se le ha dado a la cascarilla una vez que el grano de arroz ha sido extraído de la cascarilla. $6,55 \pm 1,72$ se puede considerar como un porcentaje de contenido de

humedad bajo, lo cual podría ser un indicador de una buena procesabilidad y reducción de productos porosos [123].

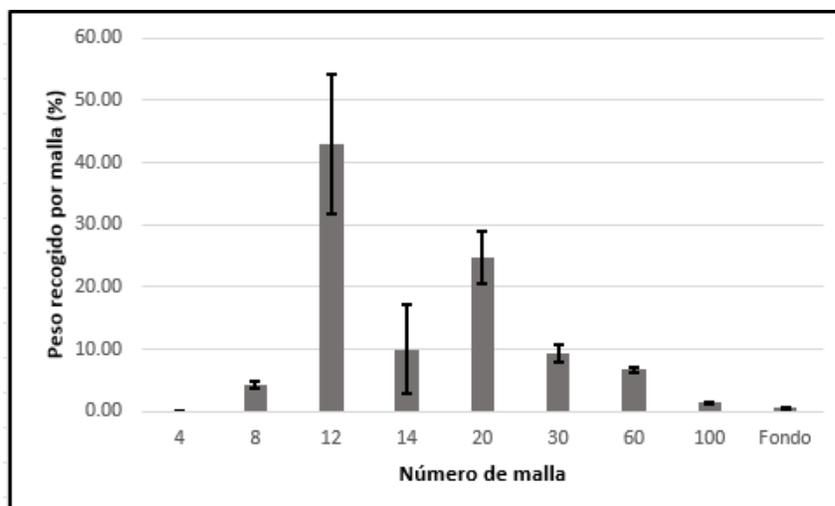


Figura 6.2. Distribución promedio de tamaño de partículas

Densidad de partícula. La densidad de partícula de la cascarilla de arroz fue de $476,03 \pm 0,55 \text{ kg/m}^3$; la cual se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura ($168,34$ a $616,62 \text{ kg/m}^3$) [126]. Esta densidad de partícula es baja comparada con la densidad de otras fibras y la de la fibra de vidrio, lo que podría ser un buen indicativo para ser usada como refuerzo de materiales para la construcción.

Densidad aparente. La densidad aparente fue de $144,40 \pm 2,17 \text{ kg/m}^3$; valor que se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura ($120,88$ – $579,18 \text{ kg/m}^3$) [126]. Esta densidad es considerada baja, lo que podría presentar un problema en procesos de almacenamiento y transporte si se requiere llevar a procesos industriales.

La Tabla 6.2 presenta el consolidado de los resultados del análisis físico de la cascarilla arroz.

Tabla 6.2 Análisis físico de la cascarilla de arroz analizada

Parámetro	Valor obtenido
Tamaño promedio de partícula (mm)	$1,68 \pm 0,31$
Contenido de humedad (%)	$6,55 \pm 1,72$
Densidad aparente (Kg/m^3)	$144,40 \pm 2,17$
Densidad de partícula (Kg/m^3)	$476,03 \pm 0,55$

Análisis morfológico de la cascarilla de arroz. La Figura 6.3 presenta las micrografías de la cascarilla de arroz. La Figura 6.3a muestra la superficie interna y externa de la cascarilla de arroz sin tratamiento, la Figura 6.3b de la cascarilla de arroz tratada al 5% de NaOH, y la Figura 6.3c de la cascarilla de arroz tratada al 10% de NaOH. La Figura 6.3a muestra la morfología típica de la cascarilla de arroz. Se observa que la superficie externa tiene forma globular con células epidérmicas dispuestas en surcos lineales; la superficie interna se observa más porosa, similar a lo reportado por otros estudios [127][128]. La forma general de la cascarilla de arroz es una estructura acicular. En las Figuras 6.3b y 6.3c se observan las superficies internas y externas más lisas.

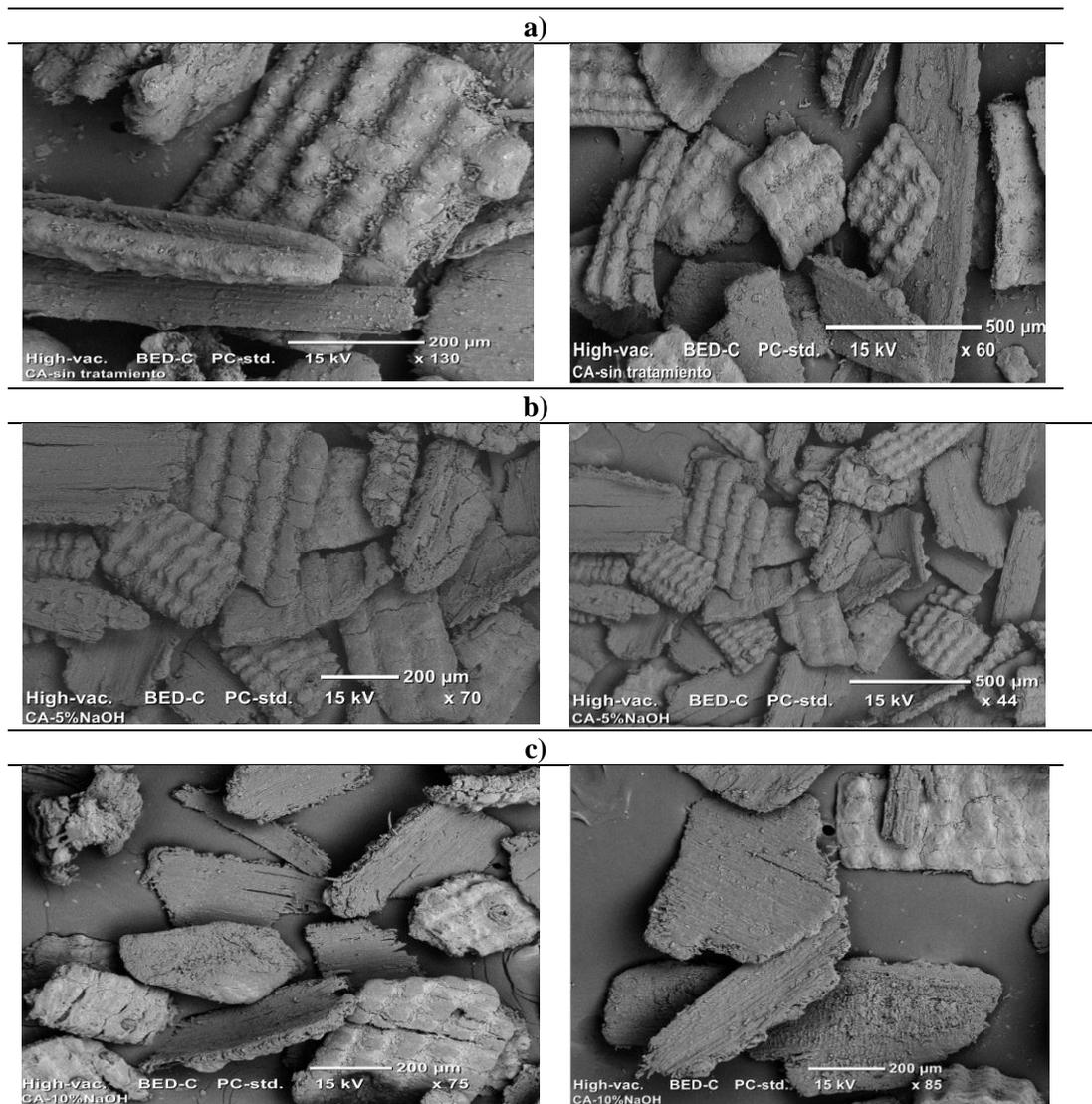


Figura 6.3 Imágenes SEM de la cascarilla de arroz a) sin tratamiento, b) al 5% de NaOH, c) al 10% NaOH.

6.3.2 Análisis químico de la cascarilla de arroz

La Tabla 6.3 presenta el consolidado de los resultados del análisis químico realizado a la cascarilla de arroz utilizada.

Tabla 6.3 Análisis químico de la cascarilla de arroz

Parámetro	Valor obtenido (%)
Contenido de cenizas	18,95 ± 0,32
Contenido de extractivos	2,98 ± 0,35
Contenido de lignina	26,03 ± 0,91
Contenido de celulosa ^a	52,04
Alfa celulosa	80,15 ± 1,48
Beta Celulosa	10,59 ± 1,46
Gamma celulosa	9,26 ± 0,21

^a Calculada como la diferencia del total de constituyentes

Contenido de ceniza. El contenido de cenizas es de 18,95 ± 0,32%. Este valor está en el rango del contenido de cenizas reportado por otros autores (16,92 – 24,6%) [125]. El contenido de ceniza se considera alto comparado con otras fibras naturales (1 – 8,3%) [129].

Contenido de extractivos. El contenido de extractivos de la cascarilla arroz analizada fue de 2,98 ± 0,35%. Aunque este valor puede ser considerado como alto, se encuentra en el rango de valores reportados por Ciannamea E. et al (2 - 5%) [130].

Contenido de lignina. El contenido de lignina fue de 26,03 ± 0,91 %; considerado como alto si se compara con otras fibras como yute, sisal, linaza, cáñamo, férula alcachofa, altea y arundo (3 – 17,2%) [129]; sin embargo, está por debajo de otras como aceite de palma, piasava, manicaria y coco [129]. El contenido de lignina encontrado está dentro del rango de valores reportados por Ludueña L. et al. (26 – 31%) [131].

Contenido de celulosa. El contenido de celulosa fue de 52,04%, lo que muestra que la cascarilla de arroz estudiada está constituida principalmente por celulosa. El contenido total de celulosa se expresa en términos de alfa (α), beta (β) y gamma (γ). Los valores obtenidos están dentro de los rangos reportados por otros autores [123]. La α -celulosa (80,15 ± 1,48%) indica el alto peso molecular de la celulosa, alta resistencia y rigidez. La β -celulosa (10,59 ± 1,46%) indica la celulosa degradada y la γ -celulosa (9,26 ± 0,21%) consiste principalmente en hemicelulosa. En general, la cascarilla de arroz contiene una cantidad considerable de α -celulosa que la hace adecuada para aplicaciones en materiales compuestos.

6.3.3 Análisis de las propiedades del material compuesto

La Figura 6.4 presenta los materiales compuestos elaborados como resultado del diseño de experimento factorial 3^2 , a los cuales se les analizaron propiedades físicas como la densidad, contenido de humedad, porcentaje de absorción de agua y también se analizaron mediante SEM.



Figura 6.4 Materiales compuestos elaborados

Densidad. La Figura 6.5 presenta los resultados de densidad de los diferentes materiales. A partir de los resultados, se observa que la densidad del blanco fue de $1,91 \text{ g/cm}^3$, resultado acorde con lo reportado por [66], quienes reportan para el MOC una densidad de $1,9 \text{ g/cm}^3$. Se evidencia que, todos los materiales exhibieron una disminución de la densidad al adicionar la cascarilla de arroz, y no se observa ningún efecto por parte del tratamiento.

Se presenta una relación inversa con los porcentajes de cascarilla de arroz, es decir, disminuye la densidad cuando aumenta el porcentaje de fibra, así, los materiales preparados con el 4,5% de cascarilla presentaron la menor densidad, con una disminución respecto al blanco del 33%. Estos resultados están acordes con los reportados por [66]. La densidad máxima y mínima de los composites elaborados fue de 1,69 (1,5% de fibra tratada al 5% NaOH) y $1,28 \text{ g/cm}^3$ (4,5% de fibra tratada al 10% NaOH), respectivamente.

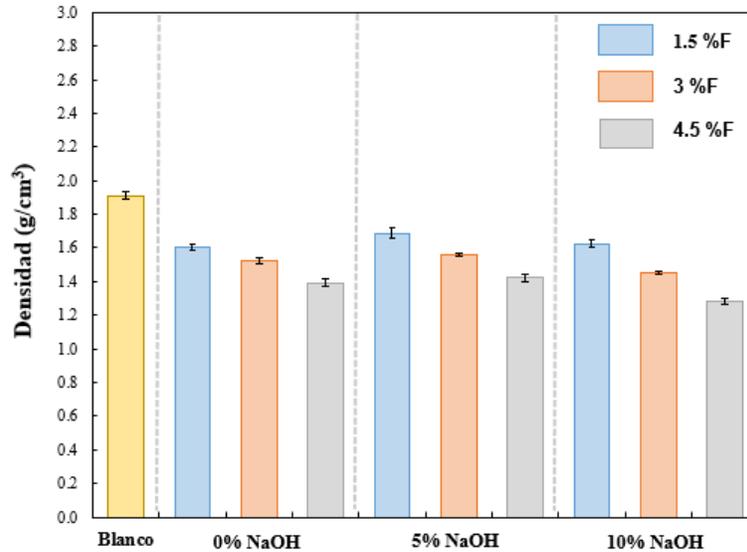


Figura 6.5 Densidad MOC-CA

Contenido de humedad y absorción de agua. La Figura 6.6 muestra el contenido de humedad, parte inferior, y el porcentaje de absorción de agua, parte superior. En cuanto al contenido de humedad, la figura muestra que el blanco presentó un contenido de humedad del 3,11%. El mayor contenido de humedad (4,76%) lo obtuvo el composite preparado con el 4,5% de cascarilla de arroz tratada al 5% de NaOH, y el composite con el 1,5% de fibra tratada al 10% de NaOH obtuvo el menor contenido de humedad (3,12%), con tan solo un incremento del 0,32 % con respecto al blanco. Este último resultado puede ser debido a la presencia de una menor cantidad de fibra tratada con el mayor porcentaje de NaOH.

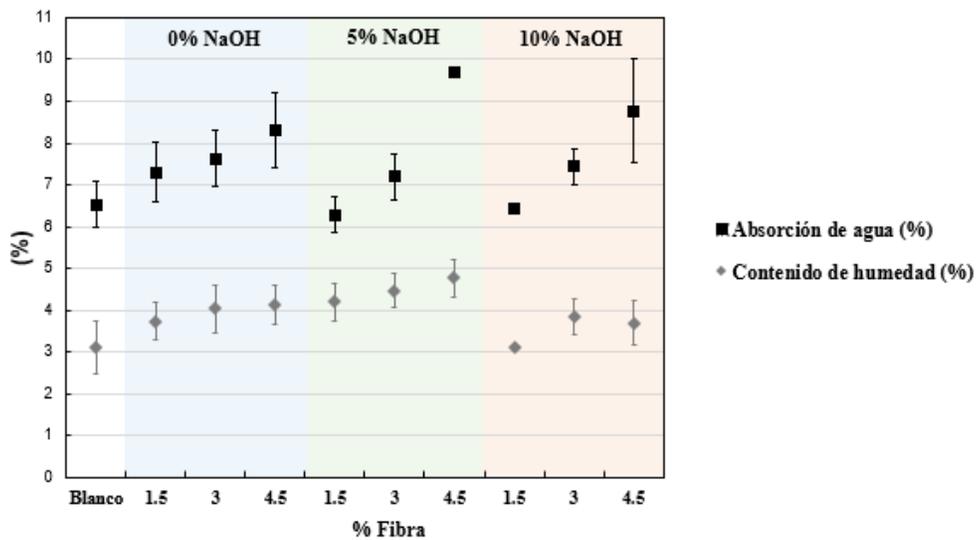


Figura 6.6 Porcentaje de absorción de agua (superior) y contenido de humedad (inferior)

Por lo anterior, se puede afirmar que la adición de fibra, sin tratar o tratada a concentraciones del 0 y 5% de NaOH, aumentan la humedad levemente en este tipo de materiales. Wang J. et al (2021) expresaron que cuando la paja de arroz se trata con un agente de acoplamiento, el contenido de grupos hidroxilo de la paja disminuye, y por lo tanto, absorbe menos agua [66]. Por lo anterior se podría decir que, para disminuir la absorción de agua de los composites elaborados, la cascarilla de arroz se podría tratar previamente con un agente de acoplamiento.

Por otro lado, en cuanto al porcentaje de absorción de agua, se observa que el blanco tuvo un porcentaje de absorción del 6,52%, y que, al adicionar cascarilla de arroz sin tratamiento, el porcentaje de absorción aumentó levemente, con un máximo al 4,5% de fibra correspondiente a un aumento del 27,45% con respecto al blanco. De otra parte, al adicionar el 1,5% de cascarilla de arroz tratada con 5 y 10% de NaOH se obtienen porcentajes de absorción del 6,28 y 6,43%, respectivamente; esto significó una disminución del porcentaje del 3,6% y 1,38% respectivamente, aproximadamente un 14% menos con respecto al composite con el 1,5% de fibra sin tratar. También, se encontró que porcentajes superiores al 1,5% de cascarilla de arroz con y sin tratamientos, aumentan la absorción de agua de los composites, principalmente a mayores porcentajes de fibra. Esto podría estar relacionado con el aumento en el contenido de cascarilla, la cual induce la formación de una mayor porosidad (resultados evidenciados en el SEM) que absorben más agua [81].

En diferentes estudios han reportado el porcentaje de absorción de agua de este tipo de materiales. En [8] reportan porcentajes del 12,4% al 18,5% en composites MOC-sílice de la cascarilla de arroz. En [66] mostraron resultados del 32,89% al 34,65% en composites MOC-paja de arroz con agentes de acople Kh-550, KH-560, KBM-603 y HY-201; y reportan que la disminución de la absorción de agua no fue significativa, porque la matriz y los fragmentos de paja de arroz absorbieron suficiente agua cuando los compuestos estuvieron sumergidos. En [81], presentaron resultados del 2,22% al 4,22% en tableros de cemento de oxiclورو de magnesio reforzados con fibra de madera, cenizas volantes pulverizadas (PFA) y cenizas de lodos de aguas residuales incineradas (ISSA); y concluyen que el aumento del contenido de fibra incrementó el porcentaje de absorción de agua de los tableros; expresan, además, que el máximo valor de 4,22% puede ser considerado aún bajo. En [7] obtuvieron resultados de absorción de agua en solo 180 min, del 0,2 al 0,8%, y afirman que con una adición adecuada de ceniza de la cáscara de arroz al MOC, se genera un gel que es beneficioso para mejorar la resistencia al agua. También, estudios como el realizado por Tatarczak y Fic [132], quienes demostraron que para reducir la absorción de agua del MOC se le pueden adicionar fibras de microsílice como las de polipropileno [132].

Resistencia a la compresión a los 7 días. En la Tabla 6.4 y 6.5 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión y módulo a los 7 días, respectivamente. De igual manera, en la Figura 6.7, los resultados de las propiedades mecánicas (resistencia y módulo) a los 7 días. En ambas gráficas se observan los resultados del material sin fibra (blanco) y de los materiales compuestos con diferentes porcentajes de fibra (1,5; 3,0 y 4,5%) y con varias concentraciones de tratamiento químico (0; 5 y 10% de NaOH).

Tabla 6.4 Resistencia a la compresión a los 7 días

	%fibra	%NaOH	R Comp 7 días (Mpa)	Desviación
Blanco	0	0	57,73	0,48
Corrida 1	1,5	0	52,51	4,00
Corrida 2	3	0	42,45	2,12
Corrida 3	4,5	0	36,62	3,63
Corrida 4	1,5	5	46,41	5,11
Corrida 5	3	5	35,57	1,10
Corrida 6	4,5	5	30,34	2,72
Corrida 7	1,5	10	43,15	5,06
Corrida 8	3	10	36,71	7,52
Corrida 9	4,5	10	20,07	1,17

Tabla 6.5 Módulo de elasticidad a los 7 días

	%fibra	%NaOH	Modulo 7 días (Gpa)	Desviación
Blanco	0	0	3,50	0,44
Corrida 1	1,5	0% NaOH	3,41	0,39
Corrida 2	3	0% NaOH	3,14	0,33
Corrida 3	4,5	0% NaOH	2,79	0,35
Corrida 4	1,5	5% NaOH	3,29	0,57
Corrida 5	3	5% NaOH	2,29	0,36
Corrida 6	4,5	5% NaOH	2,21	0,39
Corrida 7	1,5	10% NaOH	3,06	0,57
Corrida 8	3	10% NaOH	2,85	0,80
Corrida 9	4,5	10% NaOH	1,16	0,14

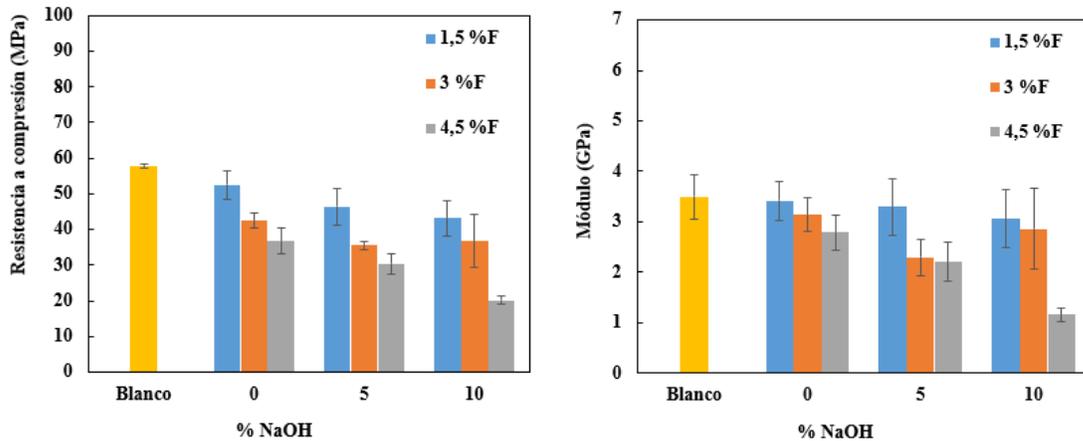


Figura 6.7 Resultados compresión a los 7 días. Izquierda: resistencia máxima. Derecha: módulo

A partir de los resultados de las Tablas 6.4 y 6.5, y de la Figura 6.7 se observa que el blanco tiene los máximos valores de resistencia a la compresión de $57,3 \pm 0,48$ MPa y un módulo de $3,50 \pm 0,44$ GPa. Al adicionar el 1,5% de fibra sin tratar, aunque se obtienen valores un poco menores, estadísticamente permanece igual tanto la resistencia como el módulo. De igual manera, el módulo al 1,5% de fibra y 5% de NaOH, y los materiales elaborados al 10% de NaOH con 1,5 y 3% de fibra tampoco muestra una diferencia estadística, respecto al blanco.

En general, se evidencia una reducción en los resultados obtenidos. Tanto el aumento en el porcentaje de fibra como en la severidad del tratamiento no favorecen la resistencia a la compresión ni su módulo de elasticidad. Esta diferencia es menos significativa entre los tratamientos. Los materiales con las mejores propiedades son los que tienen solo el 1,5% de fibra, lo cual puede ser debido a la mejor distribución de la fibra en la matriz, ya que porcentajes mayores podrían ocasionar aglomeración.

Análisis estadístico. Mediante el software Statgraphic, y de acuerdo con el diseño de experimentos factorial 3^2 se analizaron los resultados del comportamiento mecánico del material compuesto estudiado; teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

El análisis estadístico ANOVA para el diseño de experimento propuesto se presenta en la Tabla 6.6. En esta se descompone la variabilidad de la resistencia a compresión a los 7 días en contribuciones debidas a los dos factores (A: % de fibra y B: % de NaOH) y los valores-P prueban la significancia de cada uno de ellos. Puesto que los 2 valores de los factores son menores que 0,05; estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión a los 7 días, con un 95% de nivel de confianza. De la Razón-F se observa que el factor A tiene un efecto mucho más importante que el factor B. No existen interacciones entre los dos factores, pero de acuerdo con los resultados se evidencia que el blanco (0% de fibra y 0% de tratamiento) presenta la mayor resistencia

a la compresión en comparación con todas las combinaciones de fibra y tratamiento. Cuantificando la disminución con respecto al blanco (57,73 MPa), la resistencia a la compresión disminuye en un mínimo de 9% (52,51 MPa) con 1.5% de fibra sin tratar, y en un máximo de 65% (20,07 MPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10%.

Tabla 6.6 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a compresión 7 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	649,19	3	216,397	20,43	0,0059
B:NaOH	169,576	2	64,7879	8,00	0,0400
Residuos	42,3717	4	10,5929	-	-
Total corregido	1.060,02	9	-	-	-

Al reforzar el material con 1,5% de fibra se obtienen mejores resultados que con el 3,0 y 4,5%; lo que indica que a medida que aumenta el porcentaje, disminuye la resistencia a la compresión como se muestra en la Figura 6.7. De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se puede decir que, los materiales a base de óxido de magnesio disminuyen su resistencia a la compresión a los 7 días; tal como fue reportado por otros investigadores, quienes afirman que, cuando se les introduce material de refuerzo (cenizas volantes, sílice de la cascarilla de arroz, cascarilla de arroz, incluso fibra de vidrio tratada con EVA (Ethylene-Vinyl Acetate copolymer (EVA) latex), la resistencia a la compresión disminuye. Se puede concluir que se genera una débil adhesión interfacial, que se intensifica con el refuerzo; tal como es afirmado en [74].

También en otros estudios realizados con composites MOC con otros tipos de adiciones se obtuvo una disminución de la resistencia a compresión como por ejemplo, al adicionar KH_2PO_4 [133], PVAc [119], cenosferas (esferas huecas, inertes y livianas hechas principalmente de sílice y alúmina y llena de aire o gas inerte, que generalmente se produce como un subproducto de la combustión del carbón en las plantas de energía) utilizadas para disminuir la densidad y la conductividad térmica de los compuestos, también disminuye la resistencia a la compresión [134]. De igual manera, Chau et al [135] afirman que la incorporación de cenizas volantes al MOC, aunque mejora la resistencia al agua, también disminuye la resistencia a la compresión. Así mismo, Zhang et al [64], afirman que la resistencia a compresión del MOC disminuye cuando se adiciona ácido fosfórico, usado para mejorar la resistencia al agua.

En concordancia con lo reportado por Zgueb et al [119] y Khedari et al [136]; se puede afirmar que la disminución de la resistencia a la compresión se debe principalmente a la disminución de la

densidad. Esto se debe a que el aumento del contenido de fibra produce una baja en la densidad del material; no solo por la menor densidad de la fibra respecto al material, sino también porque la adición de esta introduce vacíos (poros) en el material. Por lo tanto, cuanto más denso el material, mayor es la resistencia a compresión.

En cuanto a los materiales a base de cemento Portland reforzados con cascarilla de arroz, Borrachero et al [74] afirman que cuando se introduce la cascarilla de arroz se produce una disminución de la resistencia a la compresión; debido, aparentemente, a que la adherencia de la pasta de cemento al árido ligero (cascarilla de arroz) no es demasiado buena y ello conlleva a una disminución en la resistencia del material. También encontraron en cuanto al tratamiento de la cascarilla de arroz que, una mayor concentración de NaOH no conduce a una mejora en las prestaciones mecánicas, ni a la reducción de la densidad. De otra parte, Revueltas [29] reporta que la resistencia a la compresión se ve afectada al realizar remplazos de porcentajes de cemento por ceniza de cáscara de huevo (CCH) y cáscara de arroz (CCA). Evidenció una disminución de la resistencia a la compresión de las mezclas analizadas; respecto a la mezcla control a las diferentes edades de curado manifestó que un reemplazo del 40% del cemento por CCA y CCH afecta directamente la resistencia a la compresión, por lo tanto, dicha mezcla no se recomienda para uso general o estructural [29].

La Tabla 6.7 descompone la variabilidad del módulo a los 7 días en contribuciones debidas a los factores. Puesto que ningún valor-P es menor que 0,05; ninguno de los factores tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el módulo de elasticidad a los 7 días con un 95% de nivel de confianza. No existen interacciones entre los dos factores.

Tabla 6.7 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad 7 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	2,27533	3	0,758444	2,83	0,1707
B:NaOH	0,942867	2	0,471433	1,76	0,2835
Residuos	1,07373	4	0,268433	-	-
Total corregido	4,8048	9	-	-	-

La resistencia a la compresión a los 7 días de materiales compuestos reforzados con cascarilla de arroz sin tratar y tratada con diferentes porcentajes de NaOH tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de fibra y el porcentaje de tratamiento. Estos resultados coinciden con Marmorato et al [65], quienes afirman que la Resistencia a compresión del MOC disminuye con la adición de sílice de la cascarilla de arroz. En [135] expresan que la resistencia a la compresión de los morteros MOC

disminuye con el aumento de la cantidad de cenizas volantes añadidas. Al incorporar cenizas volantes hasta un 30% en peso de MgO en los morteros de MOC, se mejora la trabajabilidad o fluidez, se retrasa el tiempo de fraguado y, lo que es más importante, se mejora la resistencia al agua, aunque la resistencia a la compresión final disminuye. Acorde con los resultados de los obtenidos en la presente investigación la cascarilla de arroz no produce efectos mecánicos de refuerzo en este tipo de materiales, cuando son evaluados a los 7 días.

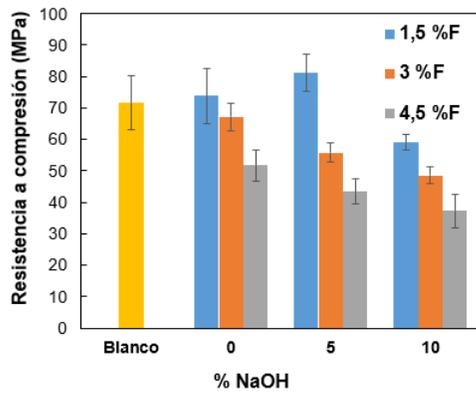
Resistencia a la compresión a los 28 días. En la Tabla 6.8 y 6.9 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión y módulo a los 28 días, respectivamente. Así mismo, se pueden apreciar en la Figura 6.8, los resultados de las propiedades mecánicas (resistencia y módulo) a los 28 días.

Tabla 6.8 Resistencia a la compresión a los 28 días

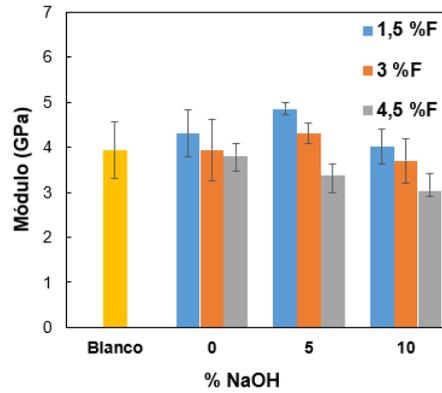
	%fibra	%NaOH	R Comp 28 días (Mpa)	Desviación
Blanco	0	0	71,63	8,693
Corrida 1	1,5	0% NaOH	73,85	8,812
Corrida 2	3	0% NaOH	67,14	4,494
Corrida 3	4,5	0% NaOH	51,68	4,971
Corrida 4	1,5	5% NaOH	81,17	5,965
Corrida 5	3	5% NaOH	55,77	2,981
Corrida 6	4,5	5% NaOH	43,46	4,119
Corrida 7	1,5	10% NaOH	58,94	2,470
Corrida 8	3	10% NaOH	48,61	2,846
Corrida 9	4,5	10% NaOH	37,24	5,212

Tabla 6.9 Módulo de elasticidad a los 28 días

	%fibra	%NaOH	Modulo 28 días (Gpa)	Desviación
Blanco	0	0	3,93	0,632
Corrida 1	1,5	0% NaOH	4,31	0,510
Corrida 2	3	0% NaOH	3,94	0,678
Corrida 3	4,5	0% NaOH	3,81	0,280
Corrida 4	1,5	5% NaOH	4,85	0,133
Corrida 5	3	5% NaOH	4,30	0,230
Corrida 6	4,5	5% NaOH	3,39	0,242
Corrida 7	1,5	10% NaOH	4,01	0,394
Corrida 8	3	10% NaOH	3,70	0,497
Corrida 9	4,5	10% NaOH	3,04	0,380



a) Resistencia a compresión



b) Módulo de elasticidad

Figura 6.8 Resistencia a la compresión a los 28 días

A partir de los resultados se observa que al reforzar los materiales con porcentajes de fibras 1,5 y 3,0%, al 0 y 5% de NaOH, las propiedades mecánicas aumentan con respecto al blanco, el cual tiene una resistencia a compresión de $71,63 \pm 8,69$ MPa y un módulo de elasticidad de $3,93 \pm 0,63$ GPa.

Se aprecia que los máximos valores para las propiedades mecánicas corresponden al composite preparado con 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH; con una resistencia a la compresión y un módulo de elasticidad de $81,17 \pm 5,97$ MPa y $4,85 \pm 0,13$ GPa, lo que corresponde a un incremento del 13% y 17%, respectivamente. Las otras combinaciones de fibra y tratamiento presentan una disminución de las propiedades comparadas con las del blanco.

La menor resistencia a la compresión y el menor módulo, se presentaron en los materiales elaborados con el 4,5% de fibra tratada al 10%, con valores de 37,24 MPa y 3,04 GPa, respectivamente. Se evidencia en general que, la resistencia a la compresión a los 28 días de materiales compuestos reforzados con cascarilla de arroz sin tratar y tratada con diferentes porcentajes de NaOH, tiende a disminuir al aumentar el porcentaje de fibra y el porcentaje de tratamiento. Pero en general presenta mejores resultados que los observados a los 7 días.

El módulo de elasticidad de los materiales compuestos reforzados con cascarilla de arroz sin tratar y tratada con diferentes porcentajes de NaOH, medido a los 28 días, es mayor con respecto al blanco, excepto en los composites elaborados con el 4,5% de fibra tratada al 5 y 10% de NaOH. se evidencia que el módulo tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de fibra. Aiken et al [137] afirman que el tipo de madera y la forma como se ha tratado previamente puede afectar las reacciones de hidratación del MOC y afectar negativamente la resistencia.

La Tabla 6.10 descompone la variabilidad de la resistencia a compresión a los 28 días en contribuciones debidas a los dos factores.

Tabla 6.10. Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a la compresión a los 28 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	1.150,97	3	383,655	12,39	0,0171
B:NaOH	412,347	2	206,173	6,66	0,0534
Residuos	123,899	4	30,9748	-	-
Total corregido	1.824,74	9	-	-	-

Se evidencia que solo el porcentaje de fibra tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a la compresión a los 28 días con un 95% de nivel de confianza. No existen interacciones entre los dos factores, pero de acuerdo con los resultados se observa un aumento del 13% en la resistencia a la compresión (81,17 MPa) con el 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH; con respecto al blanco (1,63 MPa) y la máxima disminución fue del 48% (37,24 MPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH. Con el 1,5% de fibra sin tratar se obtiene una resistencia a la compresión de $73,85 \pm 8,81$ MPa; un 3% superior a la del blanco.

La Tabla 6.11 descompone la variabilidad del módulo de elasticidad a los 28 días en contribuciones debidas a dos factores (A: % de fibra y B: % de NaOH), solo el porcentaje de fibra tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el módulo de elasticidad a los 28 días con un 95% de nivel de confianza. Sin interacciones entre los dos factores.

Tabla 6.11 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad compresión a los 28 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	1,44916	3	0,483055	7,16	0,0437
B:NaOH	0,572289	2	0,286144	4,24	0,1026
Residuos	0,269778	4	0,0674444	-	-
Total corregido	2,28516	9	-	-	-

Se evidenció que, el máximo porcentaje de aumento del módulo de elasticidad con respecto al blanco fue del 23% (4,85 GPa) con el 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH, y la máxima disminución fue del 23% (3,04 GPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH. El efecto fortalecedor de la fibra

fue evidente, y la mejora máxima se logró cuando se utilizó el contenido óptimo de fibra (1,5%). La disminución de la resistencia al aumentar el contenido de fibra se explica sobre la base de una compactación ineficiente y menor densidad del material compuesto. En compuestos reforzados con fibra corta, ésta limita el ancho de grieta, se desliza de la matriz y la falla ocurre [81].

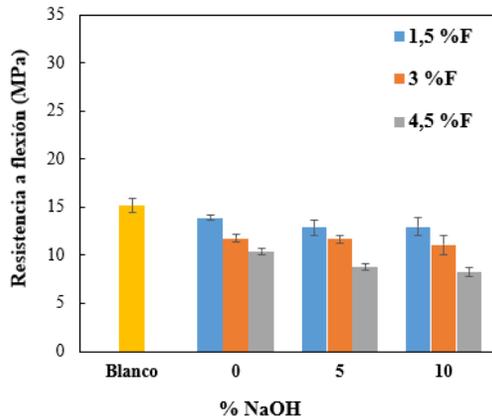
Resistencia a la flexión a los 7 días. La tabla 6.12 y 6.13 presentan los resultados a flexión a los 7 días; de igual manera, la Figura 6.9 muestra los resultados de la resistencia a flexión y módulo a los 7 días. En ambas gráficas se presentan los resultados del MOC (Blanco) y de los materiales compuestos con diferentes porcentajes de refuerzo (1,5; 3 y 4,5 %) y concentraciones de tratamiento químico (5 y 10% NaOH).

Tabla 6.12 Resistencia a la flexión a los 7 días

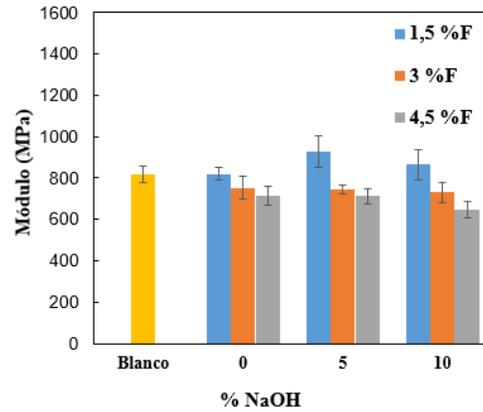
	%fibra	%NaOH	R Flexión7 días (Mpa)	Desviación
Blanco	0	0	15,16	0,74
Corrida 1	1,5	0% NaOH	13,90	0,27
Corrida 2	3	0% NaOH	11,75	0,39
Corrida 3	4,5	0% NaOH	10,42	0,32
Corrida 4	1,5	5% NaOH	12,89	0,81
Corrida 5	3	5% NaOH	11,69	0,39
Corrida 6	4,5	5% NaOH	8,83	0,35
Corrida 7	1,5	10% NaOH	12,96	0,89
Corrida 8	3	10% NaOH	11,07	0,97
Corrida 9	4,5	10% NaOH	8,27	0,49

Tabla 6.13 Módulo a los 7 días

	%fibra	%NaOH	Mod F 7 días (Mpa)	Desviación
Blanco	0	0	816,37	40,75
Corrida 1	1,5	0% NaOH	819,08	30,17
Corrida 2	3	0% NaOH	753,00	55,62
Corrida 3	4,5	0% NaOH	712,58	46,39
Corrida 4	1,5	5% NaOH	926,51	77,84
Corrida 5	3	5% NaOH	745,07	19,57
Corrida 6	4,5	5% NaOH	712,61	36,12
Corrida 7	1,5	10% NaOH	864,41	74,65
Corrida 8	3	10% NaOH	729,15	46,66
Corrida 9	4,5	10% NaOH	644,68	39,23



a) Resistencia a flexión



b) Módulo de elasticidad

Figura 6.9 Resultados flexión a los 7 días

A partir de los resultados se observa que la resistencia a flexión de los materiales con adición de cascarilla, evaluados a los 7 días, disminuye con respecto al blanco, que tiene una resistencia de 15,16 MPa. El material que presenta la máxima disminución es el composite elaborado con 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH, correspondiente al 45% (8,27 MPa). En general, se observa un mayor efecto del porcentaje de fibra, y la afectación de la concentración del tratamiento no es evidente.

Sin embargo, se evidencia un aumento del módulo de elasticidad cuando el porcentaje de fibra es 1,5% con un porcentaje de NaOH de 5 y 10% respecto al blanco, que presentó un módulo de 816,3 MPa. El máximo aumento fue del 13% (926,51 MPa), el cual ocurrió con el 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH. Se aprecia que con igual porcentaje de tratamiento y variando el porcentaje de fibra, el módulo disminuye a medida que aumenta el porcentaje de fibra. Acorde con los resultados obtenidos en la presente investigación, a los 7 días disminuye la resistencia a flexión, pero aumenta el módulo de elasticidad para dos de los materiales elaborados.

La Tabla 6.14 muestra que solo el porcentaje de fibra tiene efecto estadísticamente significativo en la resistencia a la flexión, con un 95% de nivel de confianza. Sin interacciones entre los dos factores. Se aprecia que la resistencia a flexión a los 7 días presenta la mayor disminución con respecto al blanco (15,16 MPa,) hasta un 45% (8,27 MPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH.

Tabla 6.14 . Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a la flexión a los 7 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	32,471	3	10,8237	47,95	0,0014
B:NaOH	2,4816	2	1,24358	5,51	0,0709
Residuos	0,902926	4	0,225732	-	-
Total corregido	41,8247	9	-	-	-

La tabla 6.15 descompone la variabilidad módulo de elasticidad a los 7 días en contribuciones debidas a dos factores (A: % de fibra y B: % de NaOH).

Tabla 6.15. Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad flexión 7 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	53.702,7	3	17.900,9	13,06	0,0156
B:NaOH	3.707,48	2	1.853,74	1,35	0,3558
Residuos	5.480,64	4	1.370,16	-	-
Total corregido	62.790,6	9	-	-	-

Se observa en el módulo que, solo el porcentaje de fibra tiene un efecto estadísticamente significativo con un 95% de nivel de confianza y sin interacciones entre los dos factores. No obstante, se evidencia un leve aumento del módulo de elasticidad cuando el porcentaje de fibra es 1,5% con un porcentaje de tratamiento con NaOH de 5 y 10%. El blanco presentó un valor de 816,3 MPa, mientras que este valor aumentó un 13% (926,51 MPa) con la adición del 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH. Se aprecia que con igual porcentaje de tratamiento y variando el porcentaje de fibra, el módulo disminuye a medida que aumenta el porcentaje de fibra.

Resistencia a la flexión a los 28 días. Las Tablas 6.16 y 6.17 presentan los resultados a flexión a los 28 días (resistencia y módulo). Así mismo, la Figura 6.10 muestra los resultados de las propiedades mecánicas a los 28 días, resistencia a flexión y módulo, respectivamente.

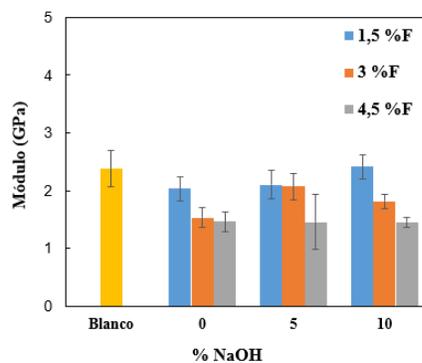
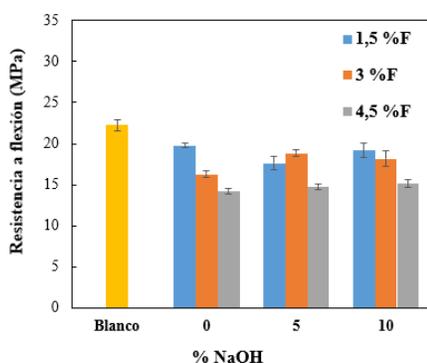
A partir de los resultados se observa que la resistencia a la flexión disminuye con respecto al blanco, y el módulo aumenta levemente (1,3%) con el 1,5 % de fibra tratada al 10%. El blanco presenta una resistencia a la flexión de 22,24 MPa, y la máxima disminución es del 36%, la cual ocurre en composites preparados con el 4,5% de fibra sin tratamiento (14,24 MPa). Acorde con los resultados obtenidos en la presente investigación, a los 28 días disminuyen tanto la resistencia a flexión como el módulo de elasticidad de los materiales obtenidos.

Tabla 6.16 Resistencia a la flexión a los 28 días

	%fibra	%NaOH	R F 28 días (Mpa)	Desviación
Blanco	0	0	22,24	0,37
Corrida 1	1,5	0% NaOH	19,76	0,37
Corrida 2	3,0	0% NaOH	16,28	1,22
Corrida 3	4,5	0% NaOH	14,24	0,31
Corrida 4	1,5	5% NaOH	17,62	2,25
Corrida 5	3,0	5% NaOH	18,85	0,48
Corrida 6	4,5	5% NaOH	14,78	1,48
Corrida 7	1,5	10% NaOH	19,20	0,85
Corrida 8	3,0	10% NaOH	18,16	1,03
Corrida 9	4,5	10% NaOH	15,12	0,70

Tabla 6.17 Módulo a los 28 días

	%fibra	%NaOH	Módulo F 28 días (GPa)	Desviación
Blanco	0	0	2,38	0,31
Corrida 1	1,5	0% NaOH	2,03	0,20
Corrida 2	3,0	0% NaOH	1,53	0,17
Corrida 3	4,5	0% NaOH	1,46	0,17
Corrida 4	1,5	5% NaOH	2,10	0,25
Corrida 5	3,0	5% NaOH	2,07	0,22
Corrida 6	4,5	5% NaOH	1,46	0,47
Corrida 7	1,5	10% NaOH	2,41	0,21
Corrida 8	3,0	10% NaOH	1,81	0,13
Corrida 9	4,5	10% NaOH	1,45	0,08



a) Resistencia a flexión

b) Módulo de elasticidad

Figura 6.10 Resultados flexión a los 28 días

La tabla 6.18 descompone la variabilidad de la resistencia a flexión a los 28 días en contribuciones debidas a dos factores (A: % de fibra y B: % de NaOH).

Tabla 6.18 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta resistencia a la flexión a los 28 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	50,2061	3	16,7354	11,2843	0,0182
B:NaOH	0,813728	2	0,406864	0,29	0,7619
Residuos	5,58775	4	1,39694	-	-
Total corregido	57,7341	9	-	-	-

Se observa que solo el porcentaje de fibra tiene efecto estadísticamente significativo con un 95% de nivel de confianza, sin interacciones entre los dos factores. De acuerdo con los resultados presentados, se observa que la resistencia a flexión a los 28 días disminuye con respecto al blanco y el módulo aumenta en 1,3% con el 1,5 % de fibra tratada al 10%. El blanco presenta una resistencia a flexión de 22,24 MPa y la máxima disminución es del 36% (14,23 MPa), la cual ocurre en composites preparados con el 4,5% de fibra sin tratamiento.

La Tabla 6.19 descompone la variabilidad del módulo de elasticidad a los 28 días en contribuciones debidas a dos factores (A: % de fibra y B: % de NaOH).

Tabla 6.19 Análisis estadístico ANOVA variable de respuesta módulo de elasticidad flexión a los 28 días

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales	-	-	-	-	-
A:Fibra	1,1591E6	3	386368	11,15	0,0206
B:NaOH	88.681,3	2	44.340,7	1,28	0,3720
Residuos	138.641	4	34.660,3	-	-
Total corregido	1,30093E6	9	-	-	-

Se observa que solo el porcentaje de fibra tiene efecto estadísticamente significativo con un 95% de nivel de confianza. No existen interacciones entre los dos factores, pero de acuerdo con los resultados presentados en la Figura 6.10 b), el módulo de elasticidad solo aumenta con respecto al blanco (2.378,88 MPa) en un 1% (2.410,74 MPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH.

Contrario a los resultados obtenidos a flexión, en [81] investigaron los aspectos mecánicos, de durabilidad y ambientales de tableros de cemento oxiclورو de magnesio con residuos de madera y adición de materiales cementicios suplementarios como cenizas volantes pulverizadas (PFA) y

cenizas de lodos incineradas (ISSA), encontraron que la incorporación de materiales cementicios suplementarios podría mejorar significativamente la resistencia al agua del MOC. También informaron que obtuvieron resultados de resistencia a flexión de los tableros (aumentados) de 11,4 a 18,9 MPa; resultados que consideraron óptimos para cumplir los requisitos mínimos de resistencia a flexión para tableros, que según la norma internacional ISO 8335-1987 es de 9 MPa.

En [66] fabricaron composites de cemento oxiclورو de magnesio, paja modificada y agentes de acoplamiento. Informaron que los agentes de acoplamiento redujeron la hidrofilia de la paja y la absorción de agua, y mejoraron el rendimiento de los composites; los cuales alcanzaron valores máximos de resistencias a la compresión y flexión de 12,93 MPa y 4,78 MPa, respectivamente. En [8] estudiaron el efecto de la sílice de la cascarilla de arroz sobre la microestructura y propiedades mecánicas del fibrocemento de oxiclورو de magnesio (MOFC) y reportan que la sílice de la cascarilla de arroz tiene una contribución efectiva en el comportamiento a flexión del MOFC como relleno y puzolana; y de esa forma, permite mejores propiedades mecánicas.

Wang et al [138] afirman que en compuestos MOC reforzados con fibra de vidrio tratada con aditivo EVA Latex (Ethylene-Vinyl Acetate copolymer) la resistencia a flexión inicial disminuye (aunque si mejora la resistencia al agua). De igual forma, He et al [81] reportan que el contenido de fibra (fibra de madera de pino macizo, de tamaño menor a 5 mm) afecta la resistencia a la flexión de los compuestos MOC-madera, y solo se logra un efecto fortalecedor cuando se utiliza el contenido óptimo de fibra; la disminución de la resistencia a flexión con un alto contenido de fibra, es explicada por los autores sobre la base de una compactación ineficiente y la menor densidad del compuesto.

En cuanto a los materiales a base de cemento Portland reforzados con cascarilla de arroz, Borrachero et al [74] afirman que cuando se introduce la cascarilla de arroz se produce una disminución de la resistencia a flexión debido, aparentemente, a que la adherencia de la pasta de cemento al árido ligero (cascarilla de arroz) no es demasiado buena y ello conlleva a una disminución en la resistencia del material.

Difracción de rayos X - DRX. En la Figura 6.11 se observan los difractogramas de muestras tomadas de las superficies fracturadas resultantes de los ensayos mecánicos. Las muestras se seleccionaron de acuerdo con las corridas que presentaron los mejores resultados a flexión y compresión y de esa manera se seleccionaron: corrida 1 (1,5% fibra y 0% NaOH), corrida 2 (3% fibra y 0% NaOH), corrida 4 (1,5% fibra y 5% NaOH), corrida 5 (3% fibra y 5% NaOH), corrida 7 (1,5% fibra y 10% NaOH) y el blanco (0% fibra y 0% NaOH).

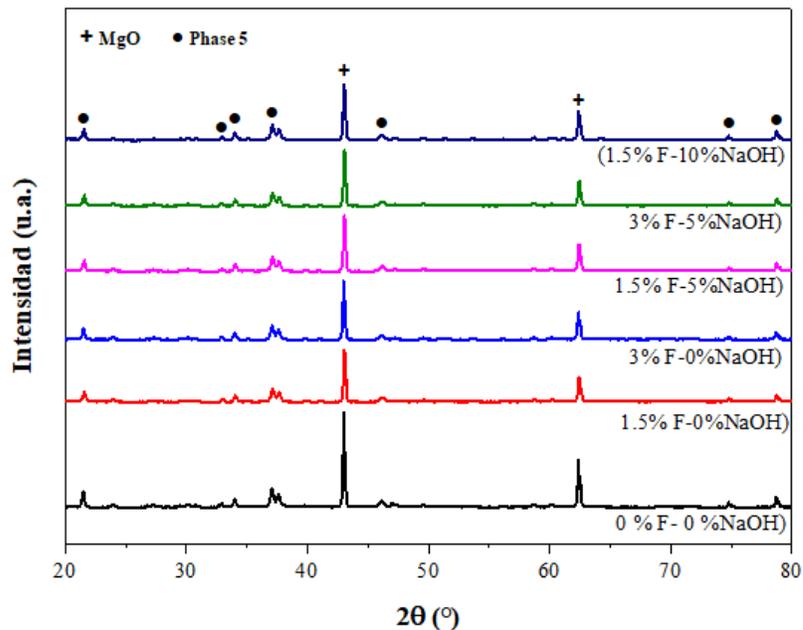
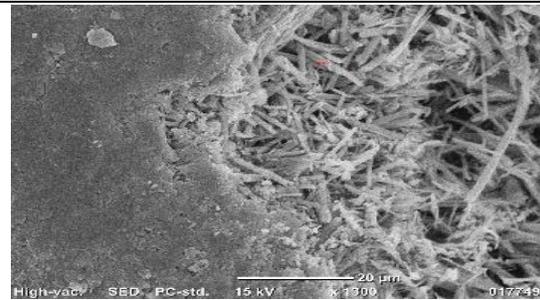
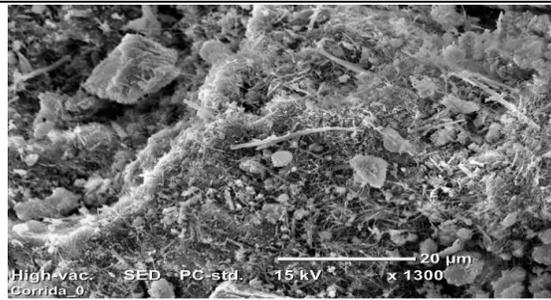


Figura 6.11 DRX material compuesto MOC-CA: corrida 0=0 % F-0 % NaOH, corrida 1, corrida 2, corrida 4, corrida 5, corrida 7

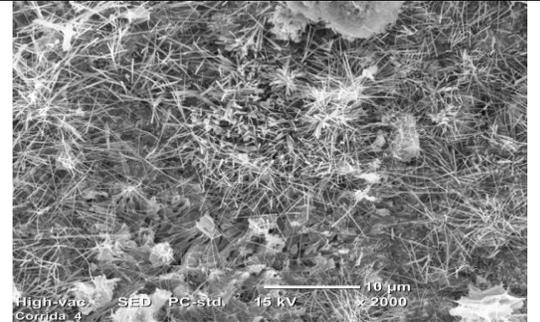
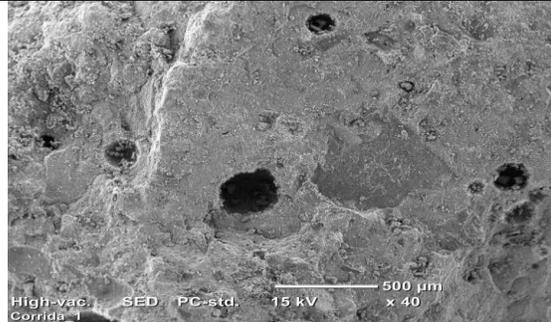
Una vez analizados los difractogramas de los materiales seleccionados, no se apreciaron diferencias significativas con los diferentes porcentajes de fibra y tratamiento. Todos los difractogramas evidencian la presencia de fase 5 y MgO sin reaccionar, siendo más evidentes en el material sin reforzar. Estos resultados están acorde con lo presentado por Tan et al. [139], donde exponen que cuando la relación molar MgO/MgCl₂ es igual o superior a cinco, los productos de hidratación son la fase 5·1·8 (fase 5) y Mg(OH)₂; cuando la relación molar MgO/MgCl₂ es igual a cinco, se forma solo la fase 5·1·8.; cuando es cuatro, los productos de hidratación son las fases 5·1·8 y 3·1·8 (fase 3); y cuando la relación molar MgO/MgCl₂ es inferior a cuatro, se forma solo la fase 3·1·8. También afirman que la relación MgO/MgCl₂ debe ser superior a seis y la relación H₂O/MgCl₂ adecuada debe estar entre 14 y 19; para lograr la mayor formación de fase 5.

Análisis morfológico – Microscopia electrónica de barrido SEM. La Figura 6.12 muestra las micrografías de las muestras tomadas de superficies fracturadas resultantes de los ensayos mecánicos. Se observa en general que, todas las muestras presentan una estructura correspondiente a la fase 5. Esta fase muestra diferentes formas: agujas, hilos, filamentos o laminas similares a unas agujas. Estos resultados corroboran los resultados del DRX, con una presencia significativa de una fase 5, aunque todos los materiales no presentan igual respuesta ante las pruebas mecánicas.

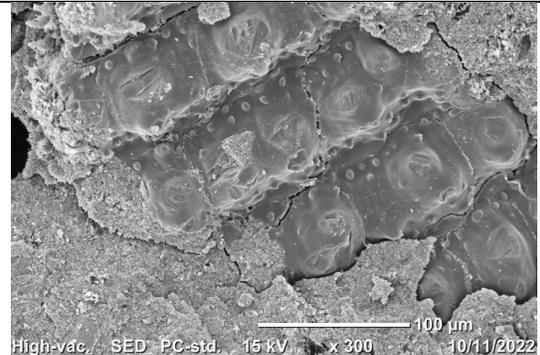
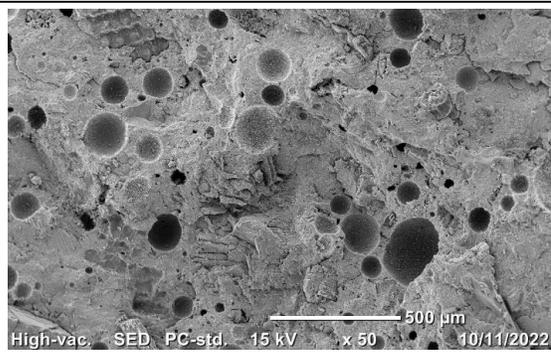
0%fibra – 0% NaOH



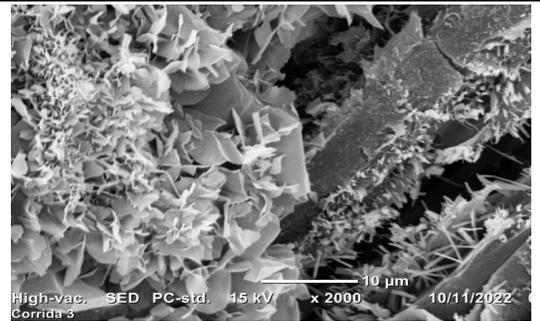
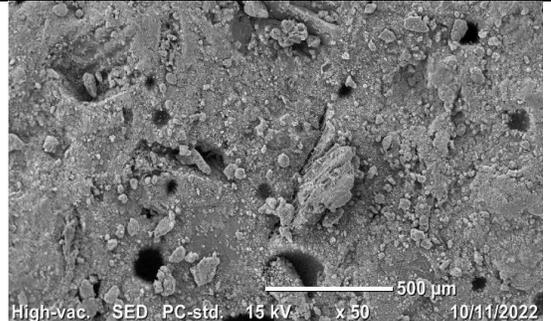
1,5%fibra – 0% NaOH



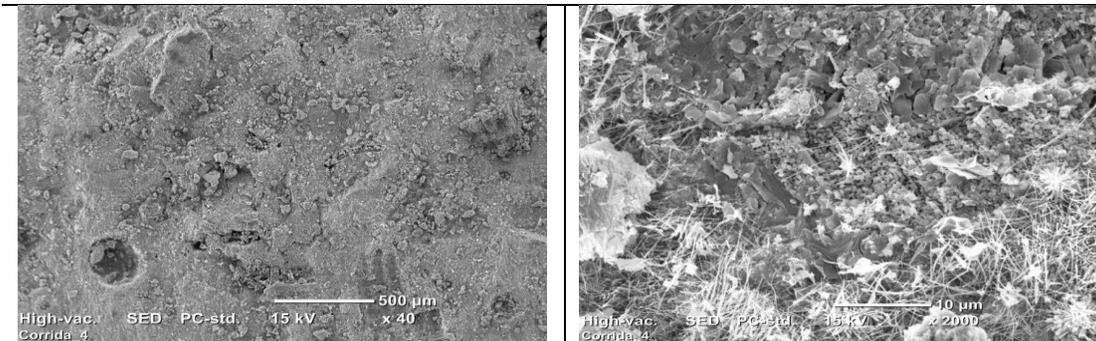
3 %fibra – 0% NaOH



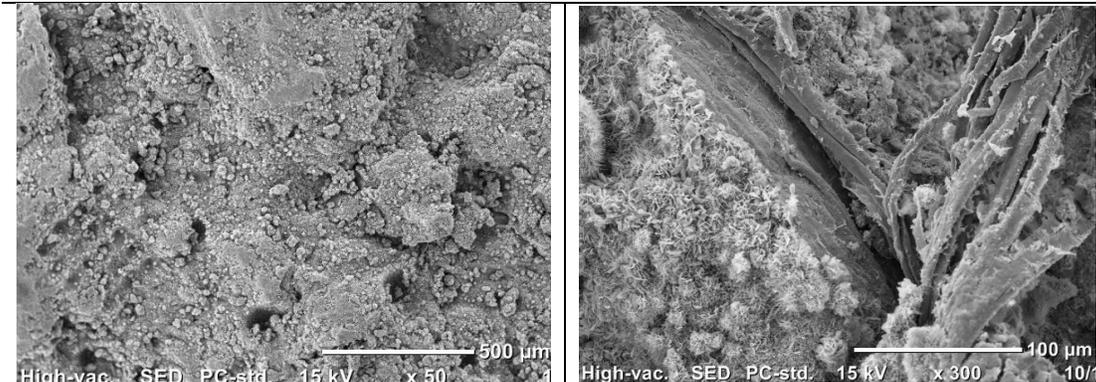
4,5 %fibra – 0% NaOH



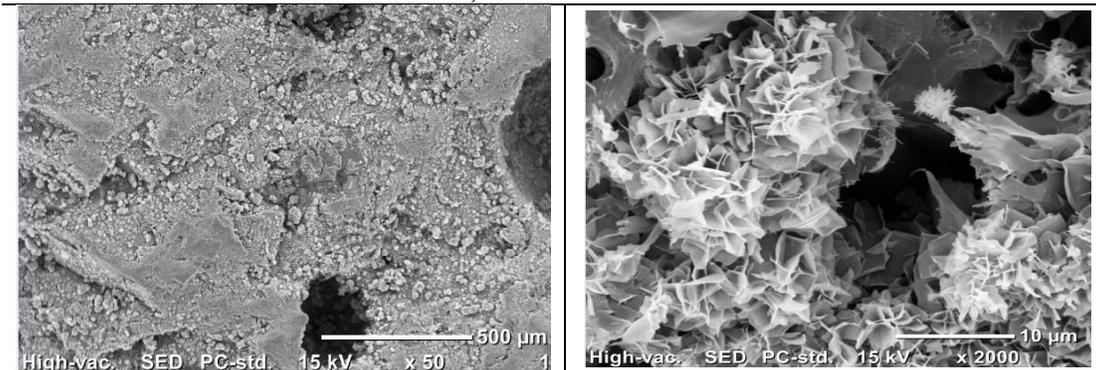
1,5 %fibra – 5% NaOH



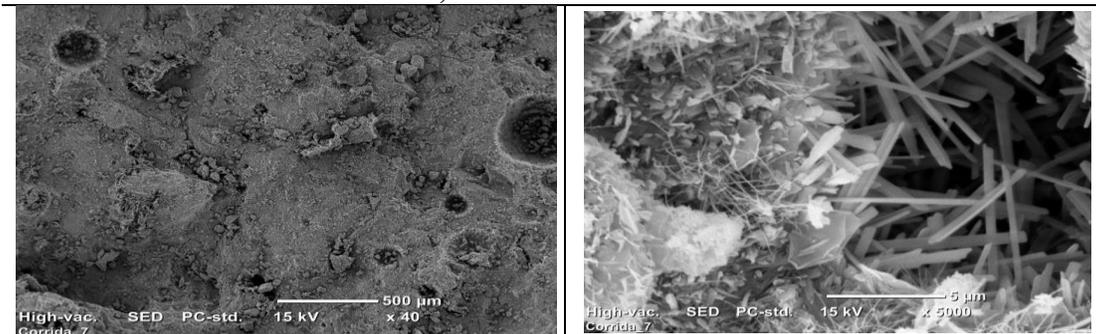
3 %fibra – 5% NaOH



4,5 %fibra – 5% NaOH



1,5 %fibra – 10% NaOH



3 %fibra – 10% NaOH

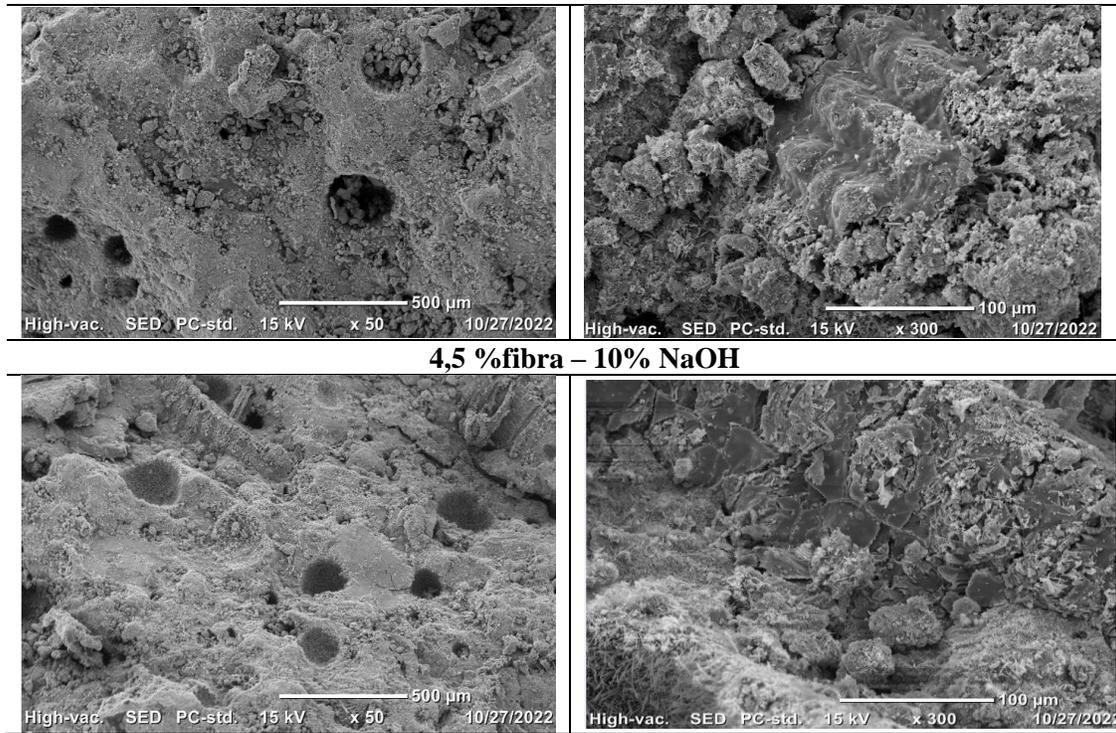


Figura 6.12 Micrografías SEM de muestras tomadas de superficies fracturadas

La Figura 6.12, 0% fibra y 0% NaOH, muestra una morfología con estructuras cristalinas propias de la fase 5, similares a agujas. Estos resultados son coincidentes con [9] [14][65]. De otra parte, en la Figura 6.12, 1,5% fibra y 0% NaOH, se observa una estructura porosa, con agujas bien definidas, entrelazadas; lo que contribuye a la resistencia mecánica, tal como es afirmado en [137]; sin embargo, expresan que la cantidad de fibra u otros rellenos hacen que la impregnación no sea tan sencilla como lo sería para los MOC puros. La imagen de los composites elaborados con 3% de fibra y 0% NaOH muestra una estructura porosa en la panorámica y en la ampliación no se evidencian las agujas o cristales de fase 5. En general las imágenes de todas las corridas muestran una estructura porosa, sin embargo en la imagen de los composites elaborados con 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH, se observa menos porosa, lo que podría ser un indicativo de que al utilizar una determinada cantidad de cascarilla, se puede refinar la estructura de poros del MOC y reducir su porosidad, tal como es afirmado por Nie et al [7]. También, se puede decir que en todas las imágenes magnificadas de los composites elaborados con 1,5% de fibra, independientemente del porcentaje de tratamiento, se aprecian los cristales en forma de agujas o bigotes, correspondientes a la fase 5; esta fase es la más deseable; tal como lo afirman Zhang et al [64], debido a que proporciona la resistencia mecánica.

Análisis interfacial. En los composites elaborados en esta investigación el análisis de la interfase fibra- matriz fue realizado de manera cualitativa, mediante microscopia electrónica de barrido. Inicialmente se realizó análisis interfacial a los materiales con mejores resultados en los ensayos resistencia a flexión y resistencia a compresión. De esa manera se realizó primero a los materiales 1) 1,5% fibra y 0% NaOH, 2) 1,5% fibra y 5% NaOH), y 3) 1,5% fibra y 10% NaOH. La Figura 6.13 muestra las micrográficas de los composites fabricados con el 1,5 de fibra sin tratamiento, tratada al 5% de NaOH y tratada al 10% de NaOH, los cuales presentaron las mejores propiedades mecánicas. En las tres figuras se observan la matriz, la interfase y fibra.

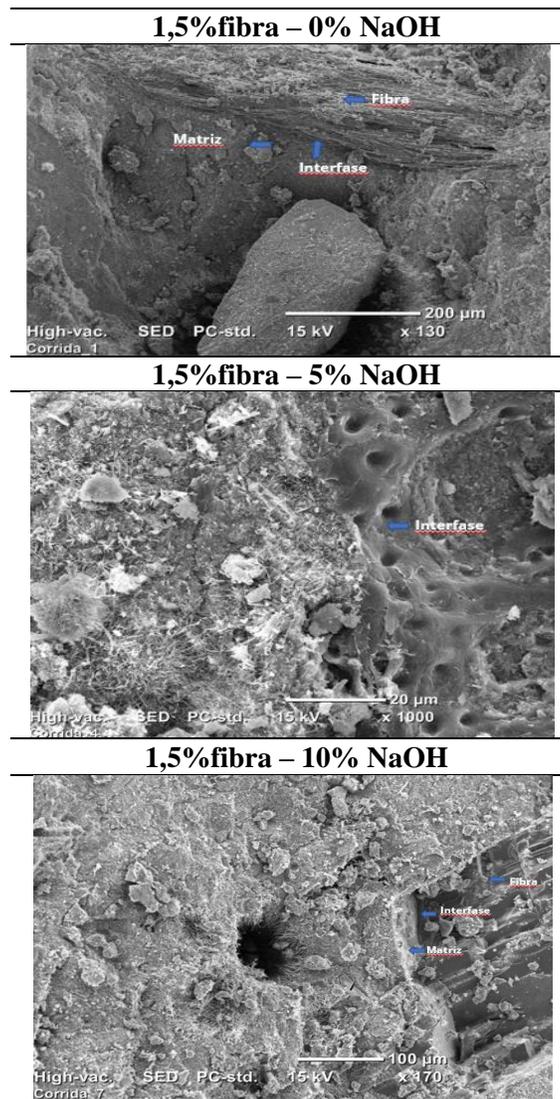
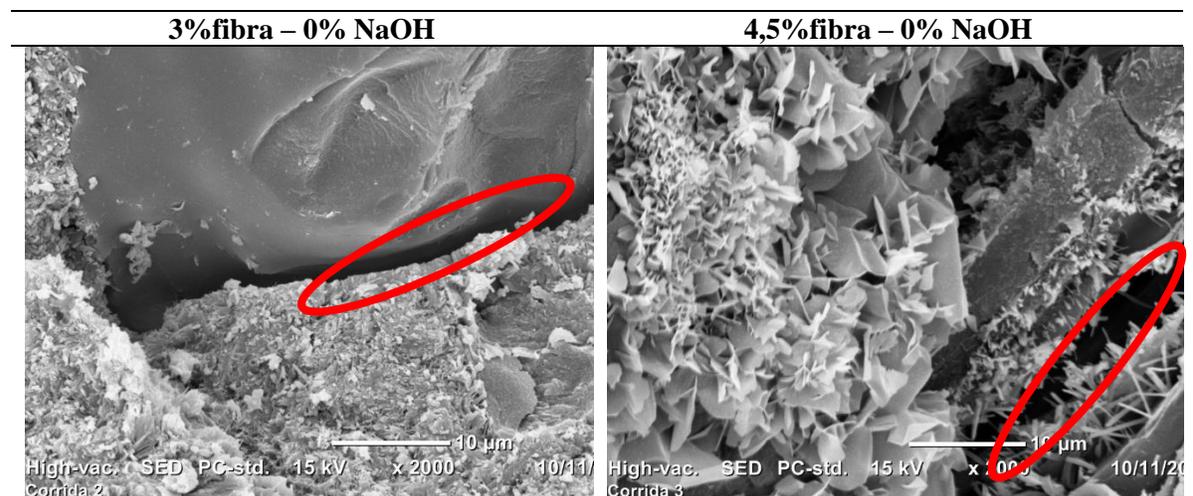


Figura 6.13 Análisis interfacial - Composites con 1,5% de fibra. a) 0% de tratamiento, b) 5% de tratamiento, c) 10% de tratamiento

En la Figura 6.13, se observa que la matriz del material 1,5% fibra – 0% NaOH, está superpuesta, no se podría afirmar que está unida o que existe una buena interfase. De otra parte, en el material con el 1,5% fibra – 5% NaOH, no se evidencia espacios entre la fibra y la matriz, se observa que hubo mayor adhesión, lo que se comprobó con los buenos resultados de las pruebas mecánicas. Cuando se adicionó cascarilla tratada al 5% de NaOH, una gran cantidad de matriz se adhirió a la cascarilla, y se observa que la interfase fibra-matriz es más difícil de distinguir; lo que indicaba que las fracturas eran de la fibra en lugar de daños en la interfaz [66]. En este caso, la cascarilla desempeñó el papel de reforzante en el composite, mejorando sus propiedades mecánicas. Se puede afirmar que al agregar el 1,5% de fibra en los composites se presenta una mejor distribución de las fibras en la matriz, en comparación con porcentajes mayores. Con la cascarilla tratada al 10% de NaOH, se evidenció también que no hay mala adhesión de la matriz sobre la cascarilla, ya que no se observa espacio entre la fibra y la matriz.

El composite con 1,5% de fibra tratada con 5% NaOH, muestra una buena adhesión fibra-matriz. Los resultados mostraron que con esta dosificación, y según lo reportado por otros autores, se reduce la hidrofilia de la cascarilla de arroz y la absorción de agua, y se mejoró el comportamiento mecánico del compuesto [66]. También se puede afirmar que la cascarilla se adhirió más estrechamente a la matriz, creando los mejores resultados de la interfase [74].

En la Figura 6.14 se presenta el análisis interfacial de las demás corridas. Se evidencia que no hubo una buena adherencia entre la fibra y la matriz, en todas las imágenes; se observan grandes espacios entre estas dos, lo que podría ser consecuencia de aglomeración de la cascarilla, debido a una distribución no uniforme dentro de la matriz y una baja mojabilidad, lo cual puede ocurrir por tener porcentajes altos en comparación a los composites observados en los materiales con 1,5% de cascarilla.



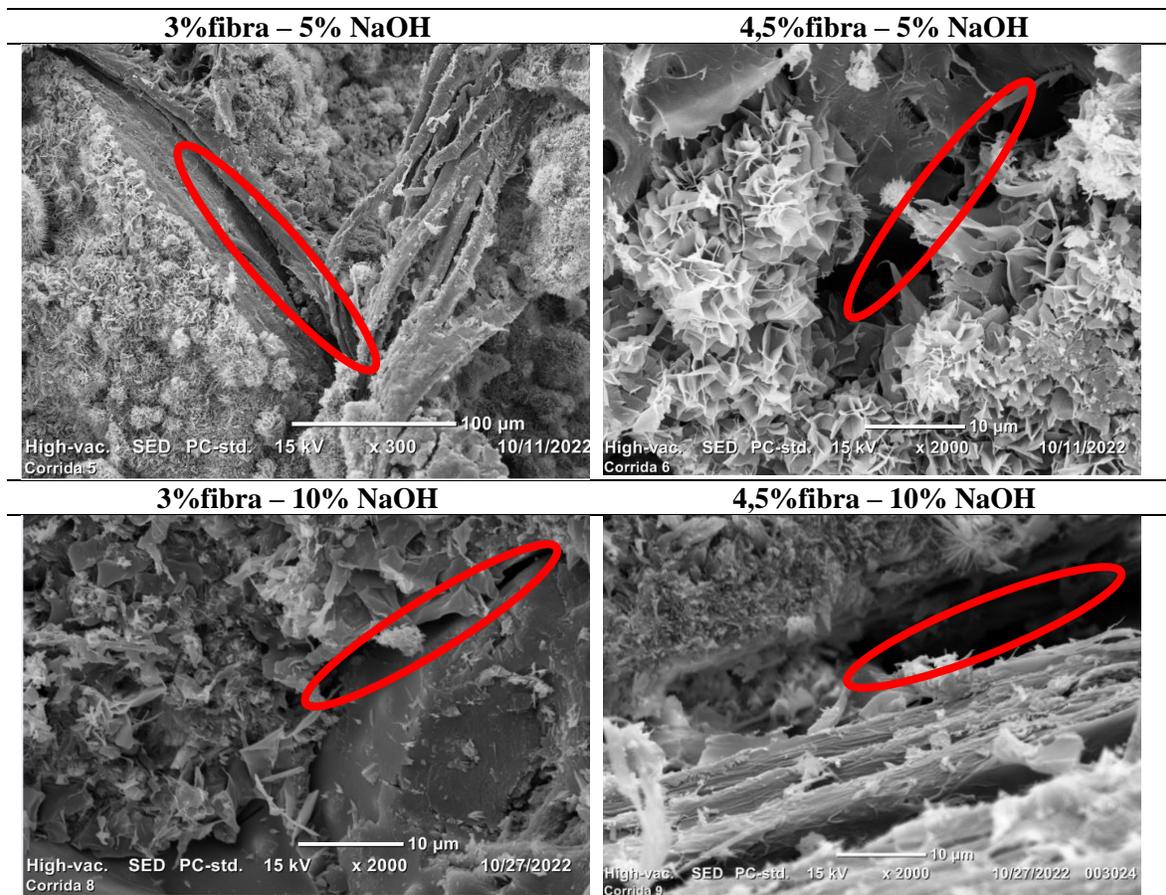


Figura 6.14 SEM (análisis interfacial) corridas 2, 3,5, 6, 8 y 9

Estos resultados están relacionados con lo observado en las propiedades mecánicas de estos composites, donde se observó que la cascarilla de arroz mejoró las propiedades mecánicas a los 28 días (resistencia a compresión y módulo), cuando los porcentajes de fibra y tratamiento con NaOH fueron 1,5 y 5% respectivamente. Se observa que al adicionar porcentajes de cascarilla de arroz del 3 y 4,5%, las propiedades mecánicas tienden a disminuir, debido a la aglomeración de fibra y la mala adherencia entre la fibra y la matriz, como se observa en la Figura 6.14, lo cual está acorde con lo reportado por autores, quienes afirman que cuando la adherencia de la pasta a la cascarilla de arroz no es demasiado buena, conlleva a una disminución en la resistencia a la compresión [74].

En el caso de materiales compuestos de matriz cerámica reforzados con cascarilla de arroz (sin y con tratamiento alcalino), se han reportado valores de resistencia a la compresión 2,63 MPa y a la flexión de 1,37 MPa, resultados estos inferiores a los materiales originales sin cascarilla de arroz, los cuales mostraron valores de 5,38 MPa y 2,24 MPa de resistencia a la compresión y flexión, respectivamente. Por lo anterior, informaron que, aparentemente, la adherencia de la pasta de cemento al árido ligero (cáscara) no es demasiado buena, y ello conlleva una disminución de la resistencia mecánica a la compresión y a flexión [74].

Con respecto al porcentaje de tratamiento, se observa que los composites con cascarilla de arroz tratada al 5% de NaOH, muestran una mejor interfase, por lo que se puede afirmar que este tratamiento mejora la compatibilidad interfacial con la matriz; y se podría afirmar que redujeron la hidrofilia de la cascarilla y la absorción de agua, y ayudó a la mejora de las propiedades mecánicas. Wang J et al [66] llegaron a una conclusión similar logrando mejorar la hidrofilia de la paja y reduciendo su absorción de agua. Otros autores afirman que mejora la compacidad de la matriz, lo que mejora las propiedades mecánicas [7].

6.4 Conclusiones

- El análisis estadístico ANOVA muestra que, el porcentaje de fibra tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable de respuesta resistencia a compresión a los 28 días. Los resultados muestran un aumento del 13% (81,17 MPa) con el 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH. Con respecto al blanco (71,63 MPa); la máxima disminución fue del 48% (37,24 MPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH. Con el 1,5% de fibra sin tratar se obtiene una resistencia a compresión de $73,85 \pm 8,81$ MPa; esta es un 3% superior a la del blanco. Lo que evidencia que la cascarilla de arroz mejora las propiedades mecánicas a los 28 días (resistencia a compresión y módulo), cuando los porcentajes de fibra y tratamiento con NaOH son 1,5% y 5%, respectivamente.
- El blanco (0% de fibra y 0% de tratamiento) presenta la mayor resistencia a compresión que todas combinaciones de fibra y tratamiento, los materiales a base de óxido de magnesio disminuyen su resistencia a la compresión a los 7 días cuando se les introduce material de refuerzo (cenizas volantes, sílice de la cascarilla de arroz, cascarilla de arroz, incluso fibra de vidrio tratada con EVA (Ethylene-Vinyl Acetate copolymer (EVA) latex)). Se puede concluir que se genera una débil adhesión interfacial, que se intensifica con el refuerzo.
- La resistencia a flexión a los 7 días disminuye con respecto al blanco (15,16 MPa) hasta en un 45% (8,27 MPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH. Se evidencia un aumento del módulo de elasticidad cuando el porcentaje de fibra es 1,5% independiente del porcentaje de tratamiento con NaOH. El blanco presentó un valor de 816,3 MPa. El máximo aumento fue del 13% (926,51 MPa) el cual ocurrió con el 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH. Se aprecia que con igual porcentaje de tratamiento y variando el porcentaje de fibra, el módulo disminuye a medida que aumenta el porcentaje de fibra.

- La resistencia a flexión a los 28 días disminuye con respecto al blanco y el módulo aumenta con el 1,5 % de fibra tratada al 10%. El blanco presenta una resistencia a flexión de 22,24 MPa y la máxima disminución es del 36% (14,23 MPa) la cual ocurre en composites preparados con el 4.5% de fibra sin tratamiento, el módulo de elasticidad solo aumenta con respecto al blanco (2378,88 MPa) en un 1% (2410,74) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH.
- En términos generales, para porcentajes mayores de 1,5% de fibra sin tratar o tratada con NaOH, no se observa ningún efecto importante en las propiedades mecánicas ni en la morfología de los materiales, por lo que se determina que el porcentaje ideal de fibra es 1,5% tratada al 5% de NaOH.
- El mejor material compuesto conseguido, derivado de los diferentes tratamientos planteados en el diseño de experimentos factorial 3^2 , es el composite con el 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH.
- Acorde con los resultados de los obtenidos en la presente investigación, la cascarilla de arroz mejora las propiedades mecánicas a los 28 días (resistencia y módulo), si se maneja un porcentaje de fibra del 1,5% y un tratamiento con NaOH al 5%.
- Las condiciones de procesamiento necesarias para la obtención de un material compuesto, MOC-CA, con una buena interfase fibra– matriz son: Matriz MOC con 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH, fabricados a temperatura ambiente.

7. ANALISIS ASPECTOS AMBIENTALES ASOCIADOS AL PROCESO DE FABRICACION DE UN MATERIAL CEMENTICIO A BASE DE OXIDO DE MAGNESIO

Resumen

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una de las metodologías de gestión ambiental más recomendadas y utilizadas. Ofrece un enfoque holístico que asegura la amplitud necesaria para una evaluación ambiental, así como la reproducibilidad, ya que es una metodología internacional estandarizada. El objetivo de este capítulo fue analizar las cargas ambientales del proceso de fabricación del cemento oxiclорuro de magnesio y compararlas con las del cemento Portland u otros semejantes reportados en la literatura a nivel global, revisando los análisis de ciclo de vida de estos materiales para identificar materiales cementantes utilizados, categorías de impactos o cargas ambientales analizadas y estrategias para disminuir los impactos; para así proponer desafíos o retos para la industria de la construcción o para la industria del cemento. Se recopiló información de publicaciones sobre el desempeño ambiental de la fabricación y uso de productos de cemento de los últimos 10 años (2012-2022). Se revisaron bases de datos como Scopus, Science Direct, Springer Link, Google scholar y Web of science. En la revisión se examinó los ACV, teniendo en cuenta las categorías de impactos tal como estaban documentadas en la literatura. Los análisis muestran que la categoría de impacto ambiental más evaluada a nivel mundial es el potencial de calentamiento global (GWP). Al analizar las categorías de impactos ambientales generados en la producción del cemento Portland y el cemento oxiclорuro de magnesio, se encontró que la producción del CP provoca más impactos y esto se debe a la cantidad de energía que se requiere durante la producción (1450 °C), mientras que para la producción del MgO, que es el principal componente del MOC, se requieren temperaturas más bajas (600 – 1000 °C); además, el óxido de magnesio no sólo se puede tener por calcinación, se puede obtener también por vía húmeda (a través de la Salmuera). Entre las alternativas para lograr un desarrollo sostenible se tiene la selección de tecnologías que permitan mejorar el comportamiento ambiental de la producción de cemento; las cuales deben ajustarse a una eficiencia energética, asociada con la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono y el uso de combustibles alternativos, así como también la sustitución del carbón por gas natural; otra alternativa es la reducción del uso del clinker, el cual se puede asociar con el uso de materiales cementicios alternativos y cementos mezclados.

7.1 Metodología

Se utilizó el método de investigación cualitativa, y la técnica de recolección de información fue el análisis documental; con el fin de identificar similitudes y diferencias entre autores, categorías de impactos o cargas ambientales, estrategias para controlarlas y desafíos o retos. La revisión se centró en estudiar los análisis de ciclo de vida de materiales, incluyendo el MOC, CP y otros materiales cementantes. Se revisaron bases de datos como *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Google Scholar* y *Web of Science*. la ecuación de búsqueda contenía palabras claves como: LCA MAGNESIUM OXICLORYDE CEMENT, LCA PORTLAND CEMENT, LCA OR LIFE CYCLE ASSESSMENT AND (PORTLAND CEMENT OR MOC OR SCM).

La revisión examinó los ACV, teniendo en cuenta las categorías de impactos, principalmente el potencial de calentamiento global (GWP) y otras como potencial de acidificación (AP), potencial de eutrofización (EP), potencial de toxicidad humana (HTP), agotamiento de recursos abióticos (ADP E) y agotamiento de la capa de ozono (ODP), entre otros. Se recopiló información de publicaciones sobre el desempeño ambiental del uso de MOC, CP y otros materiales cementantes de los últimos 10 años (2012-2022); esto debido a que, aunque fue en 2006 que la Comisión Europea publica la primera versión de la Base de Datos Europea de Referencia de Ciclo de Vida (European Reference Life Cycle Database – ELCD) y la La ISO actualiza las normas ISO 14040 y 14044 para el ACV, solo hasta el 2010 la Comisión Europea a través de la plataforma europea para el análisis de ciclo vida, publica el Manual de Referencia Internacional del Sistema de Información para el Ciclo de Vida (*Internacional Reference Life Cycle Data System – ILCD*), para dar soporte a buenas prácticas en los análisis del ciclo de vida y sus aplicaciones en empresas y gobiernos. Se examinaron los ACV y los resultados se presentan mediante la evolución histórica y teniendo en cuenta las categorías de impacto evaluadas en la literatura revisada. El análisis de los documentos seleccionados se realizó mediante revisión del contenido.

7.2 Resultados y discusión

La Figura 7.1 muestra el número de artículos seleccionados sobre la evaluación ambiental de materiales cementantes, por año de publicación; luego de la revisión en las bases de datos, mencionadas anteriormente. Como se puede observar existe un número reducido de artículos que contienen información ambiental sobre análisis de ciclo de vida de materiales cementantes o a base de cemento. Se presentan documentos publicados en los últimos 10 años, de lo cual, la tendencia muestra la etapa inicial 2012, donde se encontró la menor cantidad de artículos, y el 2022 con mayor número; se observa que este tema de investigación va en aumento en los últimos años.

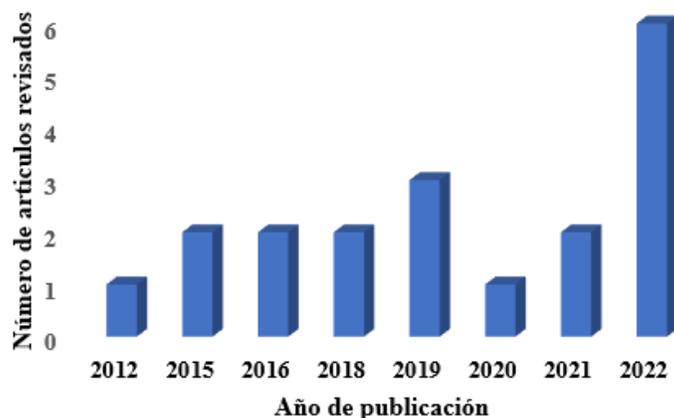


Figura 7.1 Número de artículos seleccionados sobre la evaluación ambiental de materiales cementantes, por año de publicación

Aunque se seleccionó un número reducido de artículos (19) que contienen información ambiental sobre análisis de ciclo de vida de materiales cementantes o a base de cemento en los últimos 10 años, fue para el 2022 donde se encontró el mayor número, lo que muestra que, actualmente el tema de investigación va en aumento. Se examinaron los ACV y los resultados se presentan mediante la evolución histórica y teniendo en cuenta las categorías de impacto evaluadas en la literatura revisada. El análisis de los documentos seleccionados se realizó mediante revisión del contenido.

La comparación y análisis de los resultados de los impactos ambientales de los materiales cementantes y las posibles mejoras para disminuirlos se resumen en la Tabla 7.1. De acuerdo con los resultados, los materiales cementantes más evaluados fueron, en orden descendente: 1) el cemento Portland (CP) 17 artículos [21] [94] [27] [95] [97] [99] [98] [90] [81] [99] [28] [5] [30] [102] [104] [29] [100]; 2) cemento oxiclóruo de magnesio (MOC) 6 [97] [99] [98] [81] [99] [30]; 3) puzolanas 4 [94] [90] [99] [29] [140], 4) óxido de magnesio 3 [44] [27][100], 5) yeso 1[99] y 6) otros 3 [21] [99] [104].

Por otro lado, de acuerdo con la metodología establecida para identificar los impactos ambientales asociados a la elaboración de materiales cementantes, se evidenció que el GWP (potencial de calentamiento global) fue el más evaluado (19 artículos), ya que es uno de los impactos más importantes en la agenda ambiental global [101], seguido de otros como: el potencial de toxicidad humana (HTP), potencial de acidificación AP, disminución de la capa de ozono (ODP), potencial de eutrofización (EP) y disminución de elementos abióticos (ADP E), entre otros, los cuales son presentados en la Figura 7.2.

Tabla 7.1 Resumen de impactos ambientales de materiales cementantes disponibles en la literatura revisada

Autor (es)	Materiales comparados	Categoría de impacto	Mejor material comparados ambientalmente
Valderrama et al. (2012)	CP- Clínker	GWP EP AP	L6: Reducción de GWP 5% AP 15% EP 17% HTP 11% ADP E 11% ADP F 14%
	L6: Nuevo sistema de hornos que utiliza menor combustible fósil y tiene menor emisión a la atmosfera	ODP ADP E ADP F POCP FAETP HTP	
Li J. et al. (2015)	S1: Magnesita fundida (FM)	GWP	S4: redujo el GPW en un 48%
	S2:MgO	EP	
	S3: alternativo	AP	
	S4: aprovecha el Calor liberado y el CO2	ODP ADP E ADP F POCP FAETP HTP TETP MAETP	
Carolina Martínez (2015)	CP Geopolimeros (con puzolanas: cenizas volcánicas)	GWP	Disminución de los gases de efecto invernadero
Ruan S. y Uncler C. (2016)	CP MgO reactivo	GWP EP AP ODP ADP E ADP F HTP TETP	rMgO: ventajas ambientales CP en todas las categorías de daño e impacto
Salas D et al. (2016)	CP	GWP EP AP ODP ADP E HTP	
Sinka M. et al. (2018)	Concreto celular Bloques cerámicos Filled Wood frame Magnesio-cáñamo	GWP	Páneles de magnesio-cáñamo: emiten solo 12,7 kg/CO ₂ eq, que es 5 a 6 veces menor que los de hormigon celular o de los blóques cerámicos
Sinka M. et al. (2018)	MPC:cemento de fosfato de Mg MOC FHL: aglomerante de cal formulado experimentalmente	GWP EP AP ODP ADP E POCP	MOC: menor impacto ambiental en la mayoría de las categorías

Autor (es)	Materiales comparados	Categoría de impacto	Mejor material comparados ambientalmente
	HL: aglomerante de cal hidráulica comercial	FAETP HTP TETP MAETP	
Kastiukas G. (2019)	CP MOC -ruta seca MOC -ruta humedad	GWP EP AP ODP ADP F POCP HTP TETP	MOC- ruta seca: superó a la muestra de CP en términos de impacto ambiental general, reflejado en un puntaje único 45,2% más bajo
Vázquez-Rowe I et al. (2019)	CP1: CP CP2: CP+puzolana CP3: CP+escoria de alto horno	GWP	CP + adición: menor impacto en GWP
He P. et al. (2019)	C0: MOC S0: MOC+ISSA S25: MOC+ISSA+madera PW: madera contrachapada PB: tablero de partículas	GWP HTP	GEI de S25: MOC+ISSA+madera, 71% más bajas que PW y comparables con PB. HTP fue 58% menor que PB
Bumanis. G et al. (2020)	CP MOC Yeso Geopolímeros con cenizas volantes Almidón	GWP	MOC: impacto 5 a 6 veces menor que el de los materiales utilizados tradicionalmente (CP)
Zhang R. et al. (2021)	CP rMgO CP-rMgO	GWP	CP-rMgO: GWP más bajo que los morteros con 100 % de CP o 100% de rMgO
Ige O. et al. (2021)	CP	GWP EP AP ODP ADP E ADP F POCP FAETP HTP TETP MAETP	
Mishra U. et al. (2022)	CP	GWP	
Aslani A. y Hachem-Vermette C. (2022)	CP MgO S1: MOC S2: CP Tilt-up S3: CP ICF S4: Madera - SIP S5: Madera - Stud	GWP AP POCP FAETP HTP TETP MAETP	MOC: menor GWP; 36% menos que Tilt y 78% menos que ICF (CP)
Tinoco M. et al. (2022)	3DCP: hormigón imprimible producido con CP	GWP EP AP	La impresión 3D permite la construcción de estructuras más complejas y multifuncionales,

Autor (es)	Materiales comparados	Categoría de impacto	Mejor material comparados ambientalmente
	Construcción convencional	ODP ADP F POCP FAETP HTP	lo que tiende a beneficiar su desempeño ambiental en comparación con los métodos de construcción convencionales
Palermo G. et al. (2022)	Caso 1: negocios habituales	GWP EP	Caso 3b: GWP disminuyó en un 33%
	caso 2: mitigación de carbono para 2030	AP ODP ADP E ADP F POCP	
	Caso 3a: escenario bajo en carbono (con madera)	FAETP	
	Caso 3b: escenario bajo en carbono (con residuos de madera)	HTP TETP MAETP	
Tao M. et al. (2022)	CP	GWP EP AP ODP ADP E ADP F POCP FAETP	Cemento de residuos sólidos: El impacto del cemento de desecho sólido en cada tipo ambiental fue menor que el del cemento ordinario, e incluso demostró las ganancias ambientales en la eutrofización y ecotoxicidad del agua dulce. El impacto ambiental global se redujo en un 16,1%
	Cemento de residuos sólidos	HTP TETP MAETP	
Revuelta M. (2022)	CP	GWP EP AP ODP ADP E ADP F POCP FAETP	Nuevo material cementante (CCA - CCH): disminuye 30% de los impactos asociados al cambio climático respecto a la producción de CP
	Nuevo material cementante (CCA - CCH)	HTP TETP MAETP WCP IRP PMFP LOP SOP	

Al comparar algunas de las categorías de impactos con sus potenciales efectos, algunos autores afirman que las emisiones de CO₂ contribuyen principalmente a los efectos de calentamiento global del cemento (GWP), variando entre el 98,8% y el 100% de las emisiones totales, mientras que las emisiones de SO₂ y NO_x son la principal causa de la eutrofización [28].

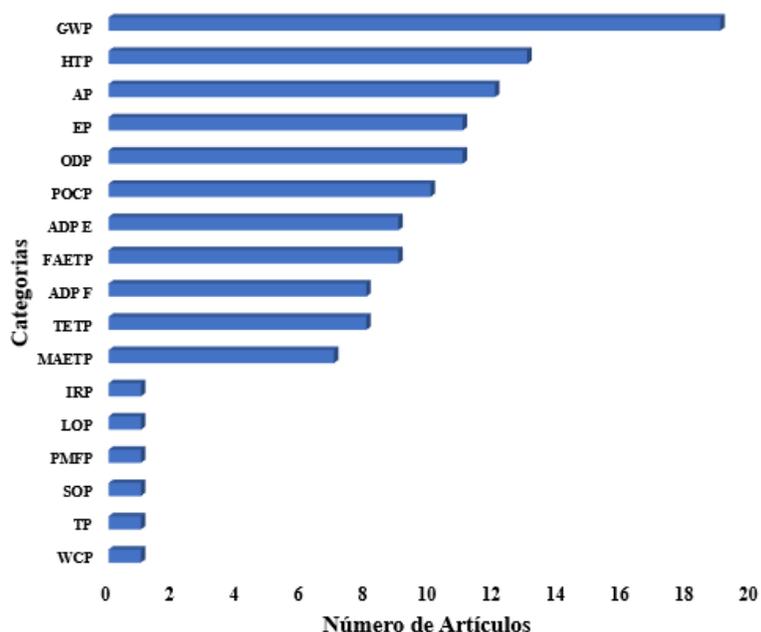


Figura 7.2 Categorías de impactos evaluadas en los ACV de los artículos revisados

7.2.1. Análisis de impactos ambientales del MOC

Al analizar los resultados de la evaluación de los impactos ambientales en los materiales cementantes revisados en este estudio, se encontró que el cemento Portland tiene mayor peso, impacto, en la categoría potencial de calentamiento global (GWP) [94][44][29][104][102][30][99][90][98][97][81], en comparación con los materiales analizados; mientras que el MOC presenta un impacto menor que todos, en cuanto al potencial de calentamiento global [96][97][98][81][5][97][30][99][81][81], en comparación con los materiales analizados. En la Tabla 7.2 se presenta el comparativo de los resultados del GWP (Kg CO₂-eq) entre el CP y el MOC.

Tabla 7.2 Potencial de calentamiento global de materiales cementantes – GWP

Autor (es)	Cemento Portland (CP)	Cemento Oxiclورو de magnesio (MOC)	Otro tipo de material	Referencia
Valderrama et al (2012)		-	Reducción de GWP 5% con respecto al CP	[21]
Li J et al (2015)	-	Redujo GWP en un 48% aprovechando el calor liberado	-	[44]
Carolina Martinez (2015)		-	Disminución de los gases efecto invernadero con el	[94]

Autor (es)	Cemento Portland (CP)	Cemento Oxiclорuro de magnesio (MOC)	Otro tipo de material	Referencia
			uso de cenizas volcánicas	
Ruan S y Uncler C (2016)		Ventajas ambientales en todas las categorías ambientales comparado con CP		[27]
Sinka M et al. (2018)		12,7 Kg/CO ₂ eq, 5 a 6 veces menor que los materiales utilizados tradicionalmente		[96]
Sinka M et al. (2018)	-	50 kg CO ₂ eq	150 kg CO ₂ eq	[97]
Vazquez-Rowe I et al. (2019)	746 g CO ₂ eq	-	559 g CO ₂ eq	[90]
He P et al. (2019)	1,78/Kg de tablero	0,51 kg de tablero		[81]
Kastiukas G. (2019)	100%	45,2% más bajo que CP		[98]
Bumanis G et al. (2020)	100%	71%		[99]
Zhang R et al. (2021)	100%		50% menos que CP	[100]
Ige O et al (2021)	265 -779 kg CO ₂ eq	-	-	[28]
Mishra U et al. (2022)			Para 2050 disminución del 37% de las emisiones globales utilizando SCM	[5]
Aslani A y Hadem-Vermet (2022)	100%	35%		[30]
Tinoco M. et al (2022)		-	300-900 kg CO ₂ eq/m ³	[102]
Palermo G. et al. (2022)	714 kg CO ₂ eq		479 kg CO ₂ eq	[102]
Tao M et al. (2022)	100%		82%	[104]
Revuelta M. (2022)	908 kg CO ₂ eq		640,35 kg CO ₂ eq	[29]

Los resultados de la Tabla 7.2 evidencian que el MOC tiene valores inferiores en la categoría potencial de calentamiento global (GWP) comparado con el cemento Portland (CP); lo cual se confirma con estudios de materiales a base de óxido de magnesio que han demostrado que son buenos

candidatos para reducir las emisiones de CO₂, ya que estos pueden secuestrar el CO₂ cuando se exponen al aire, como lo confirman otras investigaciones [25] [30].

La Tabla 7.3 muestra los resultados de otras categorías comparadas en las investigaciones encontradas. Vale la pena resaltar que, de las investigaciones revisadas, solo dos comparan directamente el CP y el MOC; así como también solo una analiza en el MOC otras categorías de impacto diferentes a GWP; esto se puede considerar como un indicativo que evidencia todo el trabajo que se podría realizar con este tema.

Tabla 7.3 Comparativo de categorías de impacto CP-MOC

Categoría de impacto	Cemento Portland (CP)	Cemento Oxiclورو de magnesio (MOC)	Referencia
GWP	100%	45,2% más bajo 71%	[98] [99]
ADP E (KgSb-eq)	0,9	0,25	
EP (KgPO ₄ -eq)	1,4	0,1	
ODP (KgCFC-eq)	1,60E-05	5,00E-06	[97]
AP (KgSO ₂ -eq)	1,6	0,35	
HTP (Kg)	70	19	

Los resultados muestran que, el MOC presenta un menor impacto comparado con el CP en todas las categorías analizadas, lo cual puede estar relacionado con el uso de menores temperaturas para la calcinación, la posibilidad de secuestrar CO₂, la capacidad de carbonatar completamente o absorber CO₂ en forma de carbonatos estables durante el curado y ganar resistencia durante el fraguado; así, cuando se considera la capacidad de carbonatación de los cementos de MgO, sus emisiones netas de CO₂ son aproximadamente 73% menores que las del cemento Portland [27].

Al analizar las categorías de impactos ambientales generados en la producción del cemento Portland y el cemento oxiclورو de magnesio, se puede afirmar que la producción del CP provoca más impactos ambientales comparado con el cemento oxiclورو de magnesio, esto se debe a la cantidad de energía que se requiere durante la producción, por ejemplo, se requiere una temperatura de aproximadamente 1450 °C, mientras que para la producción del MgO que es el principal componente del MOC, se requieren temperaturas de 600 – 900 °C; además, el óxido de magnesio no sólo se puede obtener por calcinación, se puede obtener también por vía húmeda (salmuera), considerada prometedora para un futuro del sector de la construcción descarbonizado, debido a que está reportado que no se libera CO₂ químicamente durante su fabricación. Además, el uso de combustibles alternativos podría mejorar aún más la sostenibilidad general de la producción de cementos de óxido de magnesio [27].

También se ha reportado por otros autores que el MOC comparado con el CP, presenta una baja huella de carbón y secuestro de CO₂, por lo que sus aplicaciones pueden mitigar los problemas ambientales de altas emisiones de CO₂, y el alto consumo energético causado por la industria cementera tradicional [141]. De otra parte, cuando se compara los impactos ambientales del MOC frente a los de otros materiales cementicios, por ejemplo, el yeso, el geopolímero y el almidón, los resultados indican que estos pueden ser buenas alternativas a los aglutinantes a base de cal y magnesio, pero vale la pena señalar que no se consideran propiedades como la resistencia. El yeso tiene un impacto significativamente menor (lo que está asociado con la baja temperatura de cocción y el proceso de tecnología de producción sencillo) [99].

7.2.2. Análisis de alternativas para la disminución de los impactos

En la Figura 7.3 se presentan las principales alternativas identificadas en la literatura para mejorar el comportamiento ambiental de la producción de cementos, dentro de las cuales están: la eficiencia energética [94][21][44][95][28], la reducción de combustible fósiles, el uso de combustibles alternativos [44][27][95][28][5][142], la sustitución del clínker [95][28][142][143], utilizar materiales cementicios suplementarios [5][29], usar materiales alternativos como yeso y almidón [95], y producir cementos mezclados (por ejemplo adición de puzolanas) [94] [90]. En la Tabla 7.4 se muestran las ventajas de utilizar las alternativas identificadas.

Se estima que con el uso de combustibles alternativos se ahorraría un 12% del total de emisiones de CO₂ para el año 2050 [5]. También, se propone como alternativa aprovechar el calor y el CO₂ liberado durante la producción del cemento [142] [44], con el cual se puede obtener reducción del GWP en un 48% [44]; también definido como CCS (captura y almacenamiento de carbono).

Otras alternativas son: utilizar cenizas volcánicas, las cuales son consideradas como una puzolana natural de tipo volcánico que puede ser empleada en la fabricación de cementos, morteros y concretos. También se pueden usar como precursor para la producción de cementos de activación alcalina y como materia prima en el proceso de síntesis de geopolímeros [94], hornos con menor combustible fósil ya que generan menor emisión a la atmósfera y permiten reducir el GPW en un 5% [21]; así como también aprovechar el calor liberado y el CO₂ [44].

Los CP mezclados con puzolana natural y con ceniza de alto horno presentaron un GWP menor en comparación con el CP [90]. Además, en la investigación de Zhan R, et al 2021, proponen la utilización de un cemento 50% CP y 50% rMgO en la preparación del mortero, ya que estos tienen un GWP más bajo que los morteros 100% CP o 100% rMgO [100]. También se propuso el uso de

concreto de MOC-cáñamo, el cual tuvo una emisión de solo 12,7 kg/CO₂ eq (GWP), siendo de 5 a 6 veces menor que las del hormigón [96].

Otra alternativa es utilizar óxido de magnesio obtenido de la calcinación de la magnesita, ya que al comparar la producción de CP con la del MOC con MgO de la ruta seca, este último superó al CP en términos de impactos, reflejado en un 45,2% menor; así mismo, la producción del rMgO tiene ventajas ambientales frente a CP, en todas las categorías de impactos [98].

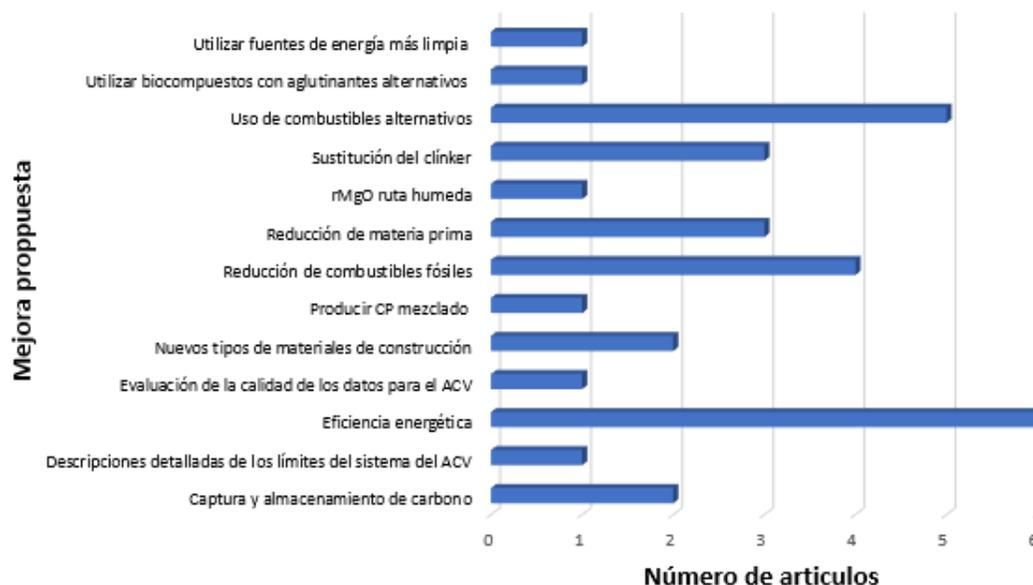


Figura 7.3 Alternativas para mejorar el comportamiento ambiental de la producción de cemento

Tabla 7.4 Ventajas de las alternativas identificadas para disminuir los impactos ambientales

Alternativa para disminuir los impactos	Ventajas	Referencia
Uso de combustibles alternativos	Ahorro en un 12% del total de emisiones de CO ₂	[5]
Aprovechar el calor y el CO ₂ liberado durante la producción del cemento o también definido como CCS (captura y almacenamiento de carbono).	Reducción del GWP en un 48%	[142] [44]
Hornos con menor combustible fósil	Generan menor emisión a la atmósfera y permiten reducir el GPW en un 5%	[21]
Los CP mezclados (por ejemplo, con puzolana natural y con ceniza de alto horno)	Presentan un GWP menor en comparación con el CP	[90] [94]
Utilización de un cemento 50% CP y 50% rMgO	Tiene un GWP más bajo que los morteros 100% CP o 100% rMgO	[100]
Usar de concreto de MOC-cáñamo,	Tiene una emisión de solo 12,7 kg/CO ₂ eq (GWP) siendo de 5 a 6 veces menor que las del hormigón de CP	[96]

Alternativa para disminuir los impactos	Ventajas	Referencia
Utilizar óxido de magnesio obtenido de la calcinación de la magnesita.	Al comparar la producción de CP con la del MOC con MgO de la ruta seca, este último supera al CP en términos de impactos, reflejado en un 45,2% menor, así mismo, la producción del rMgO tiene ventajas ambientales frente a CP, en todas las categorías de impactos	[98]
Eficiencia energética: Nuevo sistema de hornos de última generación (más eficientes, menos emisiones). Uso de biocombustibles. Reducción de la cantidad de combustible necesaria para producir la misma cantidad de clínker	Menor cantidad de combustible fósil y menor emisión a la atmosfera por Kg de clínker producido. Conservación de los recursos naturales, minimización de los impactos ambientales locales, regionales y globales Disminución del consumo de energía Reducción de emisiones hasta en un 11% Producción más sostenible y beneficios económicos: ahorro de energía del 21%, una reducción del 8% en las emisiones de CO ₂ y una reducción del 13% en la contaminación del aire	[94] [21] [44] [95] [28][144]
Reducción de combustible fósiles por el uso de combustibles alternativos (residuos de biomasa agrícolas y no agrícolas, desechos derivados del petróleo, desechos diversos y desechos químicos y peligrosos)	Reducciones desde un 21% en GWP y hasta un 49% en EP	[44] [27] [95] [28] [5] [142]
Sustitución del clínker por SCM (por ejemplo, cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice, ceniza de la cáscara de arroz, metcaolín)	Menos consumo de energía Reducción de los impactos ambientales	[95] [28] [142] [143] [5] [29]

En la producción del cemento Portland, se pueden utilizar mejores tecnologías, que permitan la eficiencia energética y el uso de combustibles a partir de residuos; así como también la sustitución del clínker por materiales cementicios suplementarios y residuos; con lo que se podrían disminuir los impactos ambientales ocasionados durante el proceso de producción. Y para la producción de cementos en general se podrían utilizar fuentes de energías limpias como por ejemplo el gas, y aprovechar los residuos de la industria agrícola para combustibles.

7.2.3. Desafíos

Para el 2034 se podrían reducir las emisiones de CO₂, relacionadas con la industria del cemento en 15 millones de toneladas, mediante la adición de materiales sustitutos como los materiales cementicios suplementarios y mediante la captura y almacenamiento de la energía térmica [142].

En 2050, utilizando tecnologías de última generación como la AHP, la cual ayuda a priorizar las opciones de mitigación del cambio ambiental, y la DEMATEL que las conecta; la eficiencia

energética térmica supondrá el 3% del almacenamiento total de emisiones de CO₂. Para 2050, al reducir la cantidad de cemento utilizado y reemplazarlo con materiales cementicios suplementarios (SCM) como polvo de desecho de granito, ceniza de la cáscara de arroz, harina de sílice, entre otros, el costo total de reducir las emisiones de CO₂, se reducirán en un 37%, la tasa global de cemento se reducirá y la cantidad de calcina en forma de SCM en el cemento aumentará significativamente [5].

Tomatis et al. [145], proponen una nueva tecnología consistente en un sistema solar completo que proporciona toda la energía térmica requerida que, dependiendo de la insolación en diferentes partes del planeta, este sistema podría absorber hasta el 26% de la producción mundial actual de cemento. Esto minimizaría el impacto del cambio climático entre un 15 y un 40% [145].

Yousuf et al [146], informaron que los sistemas de bajo contenido de cemento a menudo conocidos como hormigón de bajo contenido de cemento (LCC), son uno de los métodos más efectivos en la industria de la construcción, y aunque los modelos de empaquetamiento de partículas (PPM: modelo para el diseño LCC) hacen que la construcción del sistema LCC sea compleja, tienen consecuencias ambientales menores [146].

La tecnología de impresión 3D de hormigón (3DCP) ha emergido como una alternativa para automatizar los procesos de construcción, permitiendo la impresión rápida de estructuras a escala real, mientras se reduce el tiempo de construcción y la generación de residuos. Además, en este sistema, el uso de moldes de madera para la colada de hormigón es innecesario, y las actividades manuales se reducen considerablemente. Según un informe de Markets and Markets 3DCP, con este sistema se puede reducir hasta un 60% de la producción de residuos, entre un 50% y 70% del tiempo de construcción, y entre un 50% y 80% de los costes laborales. Otro estudio, de Tobi et al., demostró que 3DCP puede reducir los costos de construcción hasta en un 35% en comparación con la construcción convencional. Ha sido ampliamente estudiada como una innovación prometedora por muchas empresas y grupos de investigación en todo el mundo. Sin embargo, se deben abordar muchos desafíos antes de que 3DCP se pueda aplicar a gran escala. Algunos autores también muestran que los residuos de construcción y demolición (RCD) se pueden utilizar como áridos y rellenos para producir hormigones más sostenibles para la impresión 3D [101].

Desafíos de los MOC: La preparación del sistema MOC con alta resistencia al agua, ya que permitiría reemplazar el sistema CP que tiene alta emisión de carbono [7] [147], y la simbiosis industrial, por ejemplo, las sinergias entre la industria siderúrgica y cementera [95], ya que se unen esfuerzos y se disminuirían los costos. La captura y almacenamiento de carbono (CCS) tiene un alto potencial de mejora; sin embargo, presenta barreras técnicas y económicas para su implementación;

se debe apuntar a investigar para disminuir las barreras técnicas y realizar convenios con los entes gubernamentales para disminuir las barreras económicas en la aplicación de esta tecnología.

Otro desafío es la construcción sustentable, para disminuir los efectos del cambio climático con construcciones bajas en carbono; de allí la importancia de generar una industria alrededor del óxido de magnesio y el cloruro de magnesio obtenidos del agua del mar, ya que estos son los componentes del cemento oxiclорuro de magnesio del cual ya se dijo y comprobó que tiene algunas propiedades superiores al cemento Portland.

7.3. Conclusiones

Luego de analizar las cargas ambientales del proceso de fabricación del cemento oxiclорuro de magnesio y compararlas con las del cemento Portland, y otros semejantes reportados en la literatura a nivel global, se concluye lo siguiente:

- El análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso de producción y fabricación de materiales cementantes, es fundamental para enfrentar los impactos ambientales generados y así, ayudar al logro de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030.
- La categoría de impacto ambiental más evaluada a nivel mundial es el potencial de calentamiento global (GWP), ya que es uno de los impactos más importantes en la agenda ambiental global, seguido de otros como: el potencial de toxicidad humana (HTP), potencial de acidificación (AP), disminución de la capa de ozono (ODP), potencial de eutrofización (EP) y disminución de elementos abióticos (ADP E), entre otros.
- Las alternativas para lograr un desarrollo sostenible se deben centrar en tecnologías que permitan mejorar el comportamiento ambiental de la producción de cemento; las cuales pueden ajustarse a una eficiencia energética, asociada con la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, y el uso de combustibles alternativos, así como también la sustitución del carbón por gas natural. La otra alternativa es la reducción del clínker, el cual se puede asociar con el uso de materiales cementicios alternativo y cementos mezclados.
- Se deben realizar investigaciones sobre ACV en asocio con el gobierno, con el fin de obtener apoyo financiero y la implementación de los resultados obtenidos en los ACV.

8. CONCLUSIONES

- Se comprobó la capacidad cementante del material y se encontró que la variación de las mezclas ejerce una alta influencia en las propiedades evaluadas, en especial, la mezcla preparada con una relación $\text{MgO}:\text{MgCl}_2$ 12,5:1, la cual presenta la mejor resistencia a la compresión (23,85 MPa), y el menor porcentaje de humedad y de absorción de agua. Se obtuvieron materiales con propiedades mecánicas importantes si se comparan con morteros de cemento Portland convencional, resultados importantes que podrían significar una disminución de emisiones de CO_2 para la industria de la construcción.
- Al adicionar la cascarilla de arroz se produjo una mejora las propiedades mecánicas a los 28 días, resistencia y módulo. El mejor material compuesto obtenido, derivado de los diferentes tratamientos propuestos en el diseño de experimentos factorial 3^2 fue el compuesto con 1,5% de fibra tratada con 5% de hidróxido de sodio.
- El análisis estadístico ANOVA muestra que, el porcentaje de fibra tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable de respuesta resistencia a compresión a los 28 días. Los resultados muestran un aumento del 13% (81,17 MPa) con el 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH; con respecto al blanco (71,63 MPa), la máxima disminución fue del 48% (37,24 MPa) con el 4,5% de fibra tratada al 10% de NaOH. Con el 1,5% de fibra sin tratar se obtiene una resistencia a compresión de $73,85 \pm 8,81$ MPa; un 3% superior a la del blanco. Lo que evidencia que la cascarilla de arroz mejora las propiedades mecánicas a los 28 días (resistencia a compresión y módulo), cuando los porcentajes de fibra y tratamiento con NaOH son 1,5 y 5% respectivamente.
- Las condiciones de procesamiento necesarias para la obtención de un material compuesto, MOC-CA, con una buena interfase fibra– matriz son: Matriz MOC con 1,5% de fibra tratada al 5% de NaOH, fabricados a temperatura ambiente.
- La categoría de impacto ambiental más evaluada a nivel mundial es el potencial de calentamiento global (GWP), ya que es uno de los impactos más importantes en la agenda ambiental global, seguido de otros como: el potencial de toxicidad humana, potencial de acidificación, disminución de la capa de ozono, potencial de eutrofización y disminución de elementos abióticos, entre otros.
- Al analizar las categorías de impactos ambientales generados en la producción del cemento Portland y el cemento oxiclорuro de magnesio, se encontró que la producción del CP provoca más impactos y esto se debe a la cantidad de energía que se requiere durante la producción (1450 °C), mientras que para la producción del MgO, que es el principal componente del MOC,

se requieren temperaturas más bajas (600 – 1000 °C); además, el óxido de magnesio no sólo se puede tener por calcinación, se puede obtener también por vía húmeda (a través de la salmuera).

- Entre las alternativas para lograr un desarrollo sostenible se identifican la selección de tecnologías que permitan mejorar el comportamiento ambiental de la producción de cemento; las cuales deben ajustarse a una eficiencia energética, asociada con la implementación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono y el uso de combustibles alternativos, uso de materiales cementicios suplementarios, así como también la sustitución del carbón por gas natural; otra alternativa es la reducción del uso del clínker, el cual se puede asociar con el uso de materiales cementicios alternativo y cementos mezclados.
- El uso del MOC, ayuda a la desmaterialización, ya que para la fabricación del mortero MOC, no se requiere arena y los materiales u obras realizados con este, no necesita agua para el proceso de curado, debido a que estos se pueden curar al aire o temperatura ambiente; esto ayudaría a reducir los impactos ambientales y por ende el calentamiento global.

9. RECOMENDACIONES

- Reducir el consumo de recursos naturales, sintetizar el MgO a partir del agua de mar, como residuo del proceso de desalinización o salmuera.
- Realizar más investigaciones para mejorar el rendimiento y la producción de los materiales a base de MgO, para poder expandir su uso y así ayudar a reducir la contaminación y lograr un desarrollo ambientalmente sostenible.
- Con esta investigación, no se busca remplazar totalmente al cemento Portland, debido al nivel de optimización del proceso de producción de este, la disponibilidad de las materias primas que se necesitan para su producción y la confianza que ya este tiene en el mercado, pero, si se trata de la exploración de una alternativa para mitigar las emisiones de CO₂ y así ayudar a disminuir el cambio climático.

10. TRABAJOS FUTUROS

- Obtención de óxido de magnesio y cloruro de magnesio a partir del agua del mar en Colombia, como residuo del proceso de desalinización del agua del mar, para uso potable.
- Realizar pruebas en obra para analizar el comportamiento de la mezcla MOC-CA, en condiciones reales.
- Análisis de ciclo de vida para evaluación de proyectos de infraestructura.
- Producción y uso de MgO para materiales de construcción sostenibles en términos de reducción de energía y emisiones de CO₂.
- Estudio de la interfase MOC-Fibra vegetal, ensayando varios tratamientos a las fibras y agente de acople, con el objetivo de obtener una buena interfase. Estudio de degradación de la fibra en la matriz.
- Estudio de pruebas en obra de la mezcla MOC-CA, para analizar el comportamiento en condiciones reales y condiciones medioambientales agresivas.
- Desarrollo de un material compuesto reforzado con-Fibras de microsílice, como las de propileno, verificación de la disminución de absorción de agua.
- Análisis de ciclo de vida para evaluación de proyectos de infraestructura.
- Sinergias con otras industrias, como por ejemplo la industria agrícola, para el aprovechamiento de residuos como materiales cementicios suplementarios y para producir energía y combustible.

REFERENCIAS

- [1] D. Gámez, «Análisis del ciclo de vida en la construcción: evaluación de las etapas incorporadas de elementos de la vivienda y de su entorno urbano», Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España. Tesis de Doctorado TDX (Tesis Dr. en Xarxa), p. 131, 2019, [Online]. Available: <http://www.tesisenred.net/handle/10803/669308>, 2019.
- [2] A. Maier y D. Manea, «Perspective of using magnesium oxychloride cement (moc) and wood as a composite building material: A bibliometric literature review», *Materials (Basel)*. vol. 15, no. 1772, pp 1-18, 2022. doi: 10.3390/ma15051772.
- [3] ONU, «Conferencia sobre el cambio climático, COP26». 2021.
- [4] I. Shah, S. Miller, D. Jiang, y R. Myers, «Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO2 emissions by up to 1.3 gigatons», *Nat. Commun.*, vol. 13, n.o 1, pp. 1-11, 2022. doi: 10.1038/s41467-022-33289-7.
- [5] U. Mishra, S. Sarsaiya, y A. Gupta, «A systematic review on the impact of cement industries on the natural environment», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n.o 13, pp. 18440-18451, 2022. doi: 10.1007/s11356-022-18672-7.
- [6] H. Ludwig y W. Zhang, «Research review of cement clinker chemistry», *Cem. Concr. Res.*, vol. 78, pp. 24-37, 2015. doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.018.
- [7] Y. Nie, J. Lu, Z. Liu, D. Meng, Z. He, y J. Shi, «Mechanical, water resistance and environmental benefits of magnesium oxychloride cement incorporating rice husk ash», *Sci. Total Environ.*, vol. 849, n.o April, p. 157871, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157871.
- [8] C. Marmorato, A. Garry, E. Freitas, C. Bertoldo, y G. Siqueira, «Effects of Rice Husk Silica on microstructure and mechanical properties of Magnesium-oxychloride Fiber Cement (MOF)», *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, pp. 1-12, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118022.
- [9] C. Hu, B. Xu, H. Ma, B. Chen, y Z. Li, «Micromechanical investigation of magnesium oxychloride cement paste», *Constr. Build. Mater.*, vol. 105, pp. 496-502, 2016.
- [10] M. Tapia, «Comportamiento a alta temperatura de paneles de cemento de magnesio», Universidad Politécnica de Cataluña. España. Tesis de maestría., 2015.
- [11] R. Lavandero y E. Gonzalez, «Propuesta de fabricación en Cuba de materiales de construcción no tradicionales, con énfasis en la producción de cementos especiales», 2011, pp. 1-10. [Online]. Available: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011_Lavandero_GEO3-O13.pdf.
- [12] F. Jin, «Magnesium oxychloride cement», en *Magnesia Cements*, Elsevier, 2020, pp. 29-74.
- [13] Z. Li y C. Chau, «Influence of molar ratios on properties of magnesium oxychloride cement», *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, n.o 6, pp. 866-870, 2007. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.03.015.
- [14] J. Jurišová, P. Fellner, y L. Pach, «Characteristics of Sorel cement prepared from impure materials», *Acta Chim. Slovaca*, vol. 8, n.o 2, pp. 87-90, 2015. doi: 10.1515/acs-2015-0015.
- [15] V. Jittin, A. Bahurudeen, y S. Ajinkya, «Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products», *J. Clean. Prod.*, vol. 263, pp. 1-27, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121578.

- [16] C. Juárez, «Concretos base cemento Portland reforzado con fibras naturales (Agave Lechuguilla), como materiales para construcción en México», Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Tesis de doctorado, 2002.
- [17] M. Lucena, A. Suarez, y I. Zamudio, «Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronáuticas», *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 1, n.o 3, pp. 1107-1114, 2009.
- [18] L. Wang, L. Chen, J. Provis, D. W. Tsang, y C. Sun, «Accelerated carbonation of reactive MgO and Portland cement blends under flowing CO₂ gas», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 106, pp. 1-14, 2020. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103489.
- [19] F. Puertas, J. Torres, y C. Varga, «Procedimiento para la fabricación de cementos alcalinos a partir de residuos vítreos urbanos e industriales», *ES 2 394 979 A1*, 2013.
- [20] F. Puertas y M. Torres, «Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers», *Rev. Ing. Construcción RIC*, vol. 32, no. 2, pp. 5-12, 2017.
- [21] C. Valderrama, R. Granados, J. L. Cortina, C. M. Gasol, M. Guillem, y A. Josa, «Implementation of best available techniques in cement manufacturing: A life-cycle assessment study», *J. Clean. Prod.*, vol. 25, pp. 60-67, 2012. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.11.055
- [22] T. Gonçalves, R. Silva, J. Brito, J. Fern, y A. Esquinas, «Hydration of Reactive MgO as Partial Cement Replacement and Its Influence on the Macroperformance of Cementitious Mortars», *Av. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2019, pp. 1-12, 2019. doi: 10.1155/2019/9271507.
- [23] C. Correia, S. Francisco, H. Savastano, y V. Moacyr, «Utilization of vegetal fibers for production of reinforced cementitious materials», *RILEM Tech. Lett.*, vol. 2017, no 2, pp. 145-154, 2018.
- [24] J. Acordi et al., «New waste-based supplementary cementitious materials: Mortars and concrete formulations», *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, pp. 1-12, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117877
- [25] C. Marmorato y A. De Oliveira, «Chemical phases and microstructural analysis of pastes based on magnesia cement», *Constr. Build. Mater.*, vol. 188, pp. 615-620, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.083.
- [26] Datosmacro.com, «Colombia sube sus emisiones de CO₂», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/colombia>.
- [27] S. Ruan y C. Unluer, «Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production», *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 258-273, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.071.
- [28] O. Ige, O. Olanrewaju, K. Duffy, y C. Obiora, «A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production», *J. Clean. Prod.*, vol. 324, pp. 1-12, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129213.
- [29] M. Revuelta, «Análisis de Ciclo de Vida de Nuevo Material Cementante Realizando Reemplazos Parciales con Dos Tipos de Residuos Agroindustriales Puzolánicos», Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Tesis Maestría, 2022.

- [30] A. Aslani y C. Hachem-Vermette, «Contrasting the environmental impact of conventional walls and magnesium oxychloride walls», *Constr. Build. Mater.*, vol. 321, pp. 1-12, 2022. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126373.
- [31] K. Hansen, T. Nielsen, B. Grelk, y C. Rode, «Conferencia Internacional RILEM sobre Materiales, Sistemas y Estructuras en Ingeniería Civil Segmento de la Conferencia sobre Humedad en Materiales y Estructuras del 22 al 24 de agosto de 2016, Universidad Técnica de Dinamarca, Lyngby, Dinamarca», *La humedad puede causar daños a los tableros de óxido de magnesio en las fachadas en nuevos edificios daneses*, 2016.
- [32] H. Qiao, Q. Cheng, W. Jinlei, S. Yingying, J. Wang, y Y. Shi, «The application review of magnesium oxychloride cement», *J. Chem. Pharm. Res.*, vol. 6, n.o 5, pp. 180-185, 2014.
- [33] A. Llerena, «Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales: Evaluación previa del comportamiento de un panel de cemento blanco con adición de meta-caolín reforzado con un textil no-tejido de fibras largas de lino y cáñamo», *Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Tesis de Maestría*, 2014.
- [34] L. Mercedes, «Análisis del comportamiento frente acciones cíclicas de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos de matriz inorgánica y tejidos de fibras vegetales», *Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Tesis de Doctorado*, 2019.
- [35] D. Chavarría, «Evaluación de la sustitución de fibras sintéticas por fibras vegetales en vigas huecas sometidas a cargas de cubierta», *Universidad EIA, Medellín. Colombia. Trabajo de grado*, 2016.
- [36] Y. Vargas y L. Perez, «Use of agroindustrial waste in improving the quality of the environment», *Rev. Fac. Ciencias Básicas*, vol. V, no. 1, pp. 59-72, 2018.
- [37] M. Mazzeo, L. León, L. Mejía, L. Guerrero, y J. Botero, «Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano em el departamento de Caldas», *Rev. Educ. en Ing.*, no. 9, pp. 128-139, 2010.
- [38] J. Cataño, K. Guzman, y M. Perpiñan, «Efecto de la incorporación de cascarilla de arroz sobre las propiedades mecánicas de concretos y bloques de suelo cemento. Una Revisión Sistemática», *Trabajo de grado. Universidad Cooperativa de Colombia. Medellín. 2021.* <http://hdl.handle.net/20.500.12494/32902>
- [39] J. Page, F. Khadraoui, M. Gomina, y M. Boutouil, «Enhancement of the long-term mechanical performance of flax fiber-reinforced cementitious composites by using alternative binders», *J. Build. Eng.*, vol. 40, pp. 1-11, 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102323.
- [40] S. Quintero y L. González, «Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto», *Ing. y Desarrollo*, vol. 20, pp. 134-150, 2006.
- [41] J. Osorio, F. Varón y J. Herrera, «Mechanical behavior of the concrete reinforced with sugar cane bagasse fibers», *Dyna*, vol 74, no. 153 pp. 69-79, 2007.
- [42] Unined Nations, «¿Qué es el acuerdo de París?», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>. [Accedido: 25-feb-2021].

- [43] E. Alvarado, «Producción de polvos de óxido de magnesio a partir de diferentes precursores», Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Tesis de doctorado, 1998.
- [44] J. Li, Y. Zhang, S. Shao, y S. Zhang, «Comparative life cycle assessment of conventional and new fused magnesia production», *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 170-179, 2015. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.043.
- [45] C. Chang et al., «Effect of Calcination Temperature on Mechanical Properties of Magnesium Oxychloride Cement», *Materials (Basel)*, vol. 15, n.o 2, 2022. doi: 10.3390/ma15020607.
- [46] B. Matkovic et al., «Reaction Products in Magnesium Oxychloride Cement Pastes. System MgO-MgCl₂-H₂O», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 60, n.o 11, pp. 504-507, 1977. [Online]. Available: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1977.tb14093.x>.
- [47] L. Urowongse y C. Sorrell, «The System MgO-MgCl₂-H₂O at 23 °C», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 63, n.o 9-10, pp. 501-504, 1980. doi: 10.1111/j.1151-2916.1980.tb10752.x.
- [48] B. Xu, H. Ma, C. Hu, S. Yang, y Z. Li, «Influence of curing regimes on mechanical properties of magnesium oxychloride cement-based composites», *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 613-619, 2016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.205.
- [49] M. Gravit, O. Zybina, A. Vaititkii, y A. Kopytova, «Problems of Magnesium Oxide Wallboard Usage in Construction», *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 692, pp. 1093-1101, 2018. doi:10.1007/978-3-319-70987-1_118.
- [50] Q. Ye, W. Wang, W. Zhang, J. Li, y H. Chen, «Tuning the phase structure and mechanical performance of magnesium oxychloride cements by curing temperature and H₂O / MgCl₂ ratio», *Constr. Build. Mater.*, vol. 179, pp. 413-419, 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.257.
- [51] Y. Guo, Y. Zhang, K. Soe, y M. Pulham, «Recent development in magnesium oxychloride cement», *Struct. Concr.*, vol. 19, no. 5, pp. 1290-1300, 2018. doi: 10.1002/suco.201800077.
- [52] Z.Y. Qu, F. Wang, P. Liu, Q.L. Yu, y H.J. H. Brouwers, «Super-hydrophobic magnesium oxychloride cement (MOC): from structural control to self-cleaning property evaluation», *Mater. Struct. Constr.*, vol. 53, n.o 2, pp. 1-10, 2020. doi: 10.1617/s11527-020-01462-3.
- [53] J. Dávila et al., *Nuevos materiales: Aplicaciones estructurales e industriales*, Primera edición. Ecuador, 2011.
- [54] A. Moral, «Mejora de la interfaz de materiales compuestos Cu-C para la evacuación térmica por medio de elementos carburigenos», Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. España, Trabajo de grado, 2016.
- [55] L. Granda, «Evaluación de las propiedades de materiales compuestos fabricados a partir de fibras semiquímicas de *Leucaena collinsii* y polipropileno», Universitat de Girona, Cataluña. España. Tesis de Doctorado, 2016.
- [56] G. Ruano, F. Bellomo, G. López, A. Bertuzzi, L. Nallim, y S. Oller, «Mechanical behaviour of cementitious composites reinforced with bagasse and hemp fibers», *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, pp. 1-9, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117856.

- [57] L. Mercedes, L. Gil, y E. Bernat, «Comportamiento mecánico de compuestos de matriz cementicia y tejidos de fibras vegetales», HAC2018 V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales. pp. 465-474, 2018. doi: 10.4995/hac2018.2018.5501.
- [58] B. Paricaguan, «Contribución al estudio del comportamiento mecánico y fisicoquímico del concreto reforzado con fibras naturales de coco y bagazo de caña de azúcar para su uso en construcción», Universidad de Carabobo, Venezuela. Tesis de Doctorado, 2015.
- [59] S. Arango, «Fluencia a flexión del hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) en estado fisurado», Universidad Politécnica de Valencia, España. Tesis de Doctorado, 2010.
- [60] K. Lau, P. Hung, M. Zhu, y D. Hui, «Properties of natural fibre composites for structural engineering applications», *Compos. Part B*, vol. 136, pp. 222-233, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.038.
- [61] G. Pereiro y F. Guitan, «Procedimiento de obtención de materiales porosos aglomerados con cementos de periclasa», WO2006/035091 A1, 2006.
- [62] M. Feigin y T. Sing, «Magnesium oxide-based construction board», US7998547B2, 2011.
- [63] K. Trout, «Extruded cross-banded magnesium oxide construction board and method of making same», US 2010 / 0077939 A1, 2010.
- [64] X. Zhang, S. Ge, H. Wang, y R. Chen, «Effect of 5-phase seed crystal on the mechanical properties and microstructure of magnesium oxychloride cement», *Constr. Build. Mater.*, vol. 150, pp. 409-417, 2017. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.211.
- [65] C. Marmorato, N. Cheung, G. Misale, A. Kellen, y A. Peruzzi, «Improvement of water resistance in magnesia cements with renewable source silica», *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, pp. 1-12, 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121650.
- [66] J. Wang, S. Wang, Y. Zuo, J. Xiao, y Y. Wu, «Construction of compatible interface of straw/magnesium oxychloride lightweight composites by coupling agents», *Constr. Build. Mater.*, vol. 281, pp. 122600, 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122600.
- [67] R. Ozuna, «Aplicación de fibras vegetales de no tejido como refuerzo en morteros de cal para la restauración de edificios históricos», Universidad Politécnica de Cataluña, España. Tesis de maestría, 2018.
- [68] C. Sawsen, K. Fouzia, B. Mohamed, y G. Moussa, «Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite», *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 229-235, 2015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091.
- [69] H. Savastano, P. Warden, y R. Coutts, «Microstructure and mechanical properties of waste fibre – cement composites», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 583-592, 2005. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.009.
- [70] W. Zhu y B. Tobias, «Air-Cured Banana-Fibre-Reinforced Cement Composites», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 16, pp. 3-8, 1994.
- [71] J. Osorio, F. Varón, y J. Herrera, «Mechanical behavior of the concrete reinforced with sugar cane bagasse fibers», *Dyna*, vol. 74, no. 153, pp. 69-79, 2007.

- [72] F. Pacheco-Torgal y S. Jalali, «Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 2, pp. 575-581, 2011. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.07.024.
- [73] G. Tonoli, S. Santos, H. Savastano, S. Delvasto, R. Mejía, y M. Lopez, «Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 2, pp. 225-232, 2011. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.013.
- [74] T. Serrano, M. Borrachero, J. Monzó, y J. Payá, «Morteros aligerados con cascarilla de arroz: Diseño de mezclas y evaluación de propiedades», *Dyna*, vol. 79, no. 175, pp. 128-136, 2012.
- [75] S. F. Santos, G. H. D. Tonoli, J. E. B. Mejia, J. Fiorelli, y H. Savastano, «Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: A review of strategies to improve durability», *Mater. Constr.*, vol. 65, n.o 317, pp. 1-20, 2015. doi: 10.3989/mc.2015.05514.
- [76] B. Ayobami y C. Dai, «Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars», *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, pp. 118041, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118041.
- [77] A. Dhawan, N. Gupta, R. Goyal, y K. K. Saxena, «Proceedings Evaluation of mechanical properties of concrete manufactured with fly ash, bagasse ash and banana fibre», *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 17-22, 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.006.
- [78] R. Saravanan, T. Malyadri, M. S. S. Rao, y N. Sunkara, «Synthesize and Characterization of Maleic acid Treated Banana Fiber Composites», *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 5382-5387, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.565.
- [79] A. Elbehiry, O. Elnawawy, M. Kassem, A. Zaher, N. Uddin, y M. Mostafa, «Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, pp. 1-13, 2020. doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00361.
- [80] A. Beraldo, «Compuesto biomasa vegetal y cemento», *Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción*, Universitat Politècnica de València, Ed. 2016, pp. 301-326.
- [81] P. He, M. U. Hossain, C. S. Poon, y D. C. W. Tsang, «Mechanical, durability and environmental aspects of magnesium oxychloride cement boards incorporating waste wood», *J. Clean. Prod.*, vol. 207, pp. 391-399, 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.015.
- [82] J. Ponce et al., «Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes», *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, vol. 2, pp. 1-8, 2021. doi: 10.1016/j.carpta.2021.100061.
- [83] R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, y F. Caputo, «Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites», *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 210-217, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.09.030
- [84] N. Prem Kumar, M. Chellapandian, N. Arunachelam, y P. Vincent, «Effect of mercerization on the chemical characteristics of plant-based natural fibers», *Mater. Today Proc.*, vol 68, pp. 1201-1207, 2022. doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.319.

- [85] M. R. Sanjay, S. Siengchin, J. Parameswaranpillai, M. Jawaid, C. I. Pruncu, y A. Khan, «A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization», *Carbohydr. Polym.*, vol. 207, pp. 108-121, 2019. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.11.083.
- [86] B.A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, y A. Alaskar, «Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: A critical review», *J. Clean. Prod.*, vol. 312, pp. 1-18, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127734.
- [87] M. Antón, «Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo», Universitat Politècnica de Catalunya, España. Tesis de Doctorado, 2004.
- [88] A. Lozano, «Análisis del ciclo de vida como instrumento de desarrollo de la ecología industrial: aplicación al proceso de impresión de un periódico», Universidad de las Palmas de la Gran Canaria, España. Tesis de Doctorado, 2014.
- [89] ICONTEC, NTC-ISO14040. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Colombia, 2007, pp. 1-24.
- [90] I. Vázquez-Rowe, K. Ziegler-Rodriguez, J. Laso, I. Quispe, R. Aldaco, y R. Kahhat, «Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 142, pp. 283-292, 2019. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.12.017.
- [91] J. Franco, L. Ordoñez, I. Herrera, y J. Torres, «Análisis de Ciclo de Vida para la producción de biodiesel derivado de palma de aceite, caso colombiano», *Publicaciones e Investig.*, vol. 13, n.o 1, pp. 11-24, 2019. doi: 10.22490/25394088.3262.
- pp. 1-26[92] P. Gutiérrez y L. Benavente, «El impacto ambiental del análisis del ciclo de vida en la industria», *Desafíos para el Ingeniero Industrial: Competencias Ambientales*, Primera edición. 2021, pp. 51-92.
- [93] F. Leiva, «Producción sostenible del compostaje para el champiñón de La Rioja a través del análisis del ciclo de vida», Universidad de la Rioja. España. Tesis de Doctorado, 2014.
- [94] C. Martínez, «Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland», Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Maestría, 2015.
- [95] D. A. Salas, A. D. Ramirez, C. R. Rodríguez, D. M. Petroche, A. J. Boero, y J. Duque-Rivera, «Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review», *J. Clean. Prod.*, vol. 113, pp. 114-122, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.078.
- [96] M. Sinka, A. Korjakins, D. Bajare, Z. Zimele, y G. Sahmenko, «Bio-based construction panels for low carbon development», *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 220-226, 2018. doi: 10.1016/j.egypro.2018.07.063.
- [97] M. Sinka, P. Van den Heede, N. De Belie, D. Bajare, G. Sahmenko, y A. Korjakins, «Comparative life cycle assessment of magnesium binders as an alternative for hemp concrete», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 133, pp. 288-299, 2018. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.024.

- [98] G. Kastiukas, S. Ruan, C. Unluer, S. Liang, y X. Zhou, «Environmental assessment of magnesium oxychloride cement samples: A case study in Europe», *Sustain.*, vol. 11, n.o 24, pp. 1-21, 2019. doi: 10.3390/su11246957.
- [99] G. Bumanis, L. Vitola, I. Pundiene, M. Sinka, y D. Bajare, «Gypsum, geopolymers, and starch-alternative binders for bio-based building materials: A review and life-cycle assessment», *Sustain.*, vol. 12, n.o 14, 2020. doi: 10.3390/su12145666.
- [100] R. Zhang, A. Arrigoni, y D. K. Panesar, «Could reactive MgO cement be a green solution? The effect of CO₂ mineralization and manufacturing route on the potential global warming impact», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 124, pp. 104263, 2021. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104263.
- [101] M. P. Tinoco, É. M. de Mendonça, L. I. C. Fernandez, L. R. Caldas, O. A. M. Reales, y R. D. Toledo Filho, «Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of cementitious materials for 3D concrete printing: A systematic literature review», *J. Build. Eng.*, vol. 52, pp. 104456, 2022. doi: 10.1016/j.job.2022.104456.
- [102] G. C. Palermo, D. A. Castelo Branco, A. C. O. Fiorini, y M. A. V. de Freitas, «Comparative life cycle assessment of three 2030 scenarios of the Brazilian cement industry», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 194, n.o 3, pp. 1-26, 2022. doi: 10.1007/s10661-022-09822-y
- [103] S. Çankaya y B. Pekey, «A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey», *J. Environ. Manage.*, vol. 249, pp. 1-12, 2019. doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109362
- [104] M. Tao, D. Lu, Y. Shi, y C. Wu, «Utilization and life cycle assessment of low activity solid waste as cementitious materials: A case study of titanium slag and granulated blast furnace slag», *Sci. Total Environ.*, vol. 849, pp 1-10, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157797.
- [105] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, vol. 9. USA, 2021, pp. 1-8.
- [106] American Society for Testing and materials, Standard Test Methods for Moisture in Cellulose, vol. 94, n.o Reapproved. USA, 2003, pp. 9-14.
- [107] American Society for Testing and materials, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-, vol. 41, n.o 147. USA, 1989, pp. 6-11.
- [108] C. D. S. Buey, «Análisis del peso específico y porosidad de materiales porosos mediante pycnometría de He», *Boletín la Soc. española mecánica suelo e Ingeniería Geotécnica*, n.o 156, 2019. *Bol. la Soc. española mecánica suelos e Ing. Geotec.*, pp. 19–27, 2008, [Online]. Available: file:///C:/Users/katyr/Downloads/2008PUBLICACIONBOLETINSEMSIG (1).pdf.
- [109] C. Zubieta, «Métodos y técnicas de caracterización», *Materiales mesoporosos ordenados en la eliminación de contaminantes en efluentes textiles*, Universidad Nacional del Sur, 2010, pp. 19-30.
- [110] American Society for Testing and materials, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), vol. 9. USA, 1986, pp. 7-10.
- [111] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse, vol. 9. USA, 2015, pp. 6-10.

- [112] American Society for Testing and materials, Standard Practice for Scanning Electron Microscope Beam Size Characterization. USA, 2017, pp. 1-3.
- [113] A. Singh, R. Kumar, y P. Goel, «Factors influencing strength of magnesium oxychloride cement», *Constr. Build. Mater.*, vol. 303, pp. 1-9, 2021. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124571
- [114] M. A. Shand y F. Jin, «Introduction – Characterization of MgO». *Magnesia Cements*, Elsevier Inc., 2020, pp. 1.10.
- [115] C. Sonat, C. H. Lim, M. Liska, y C. Unluer, «Recycling and reuse of reactive MgO cements – A feasibility study», *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 172-181, 2017. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.068.
- [116] R. Kurosawa, M. Takeuchi, y J. Ryu, «Fourier-transform infrared analysis of the dehydration mechanism of Mg(OH)₂ and chemically modified Mg(OH)₂», *J. Phys. Chem. C.*, vol. 125, n.o 10, pp. 5559-5571, 2021. doi: 10.1021/acs.jpcc.0c08696.
- [117] V. Sirota et al., «Preparation of crystalline Mg(OH)₂ nanopowder from serpentinite mineral», *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 3, pp. 499-503, 2018. doi: 10.1016/j.ijmst.2017.12.018.
- [118] Y. Guo, Y. Zhang, K. Soe, W. D. Hutchison, H. Timmers, y M. R. Poblete, «Effect of fly ash on mechanical properties of magnesium oxychloride cement under water attack», *Struct. Concr.*, vol. 21, n.o 3, pp. 1181-1199, jun. 2020. doi: 10.1002/suco.201900329.
- [119] R. Zgueb, A. Brichni, y N. Yacoubi, «Improvement of the thermal properties of Sorel cements by polyvinyl acetate: Consequences on physical and mechanical properties», *Energy Build.*, vol. 169, pp. 1-8, 2018. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.007.
- [120] American Society of Agricultural and Biological Engineers, Method of Determining and Expressing Fineness of Feed Materials by Sieving. USA, 2006, p. 5.
- [121] American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE), *Densified Products Ford Bulk Handling - Definitions And Methods*. USA, 2021.
- [122] J. Sherman, B. Chin, P. D. T. Huibers, R. Garcia-Valls, y T. A. Hatton, «Solvent replacement for green processing», *Environ. Health Perspect.*, vol. 106, pp. 253-271, 1998. doi: 10.1289/ehp.98106s1253.
- [123] D. Torres, «Thermo-mechanical performance of a poly-lactic acid (pla) composite reinforced with rice husk cellulose», *Universidad de los Andes, Bogotá. Colombia. Tesis de Maestría*, 2021.
- [124] Y. Zou y T. Yang, «Rice husk, rice husk ash and their applications». *Rice Bran and Rice Bran Oil: Chemistry, Processing and Utilization*, Elsevier Inc., 2019, pp. 207-246.
- [125] A. Valverde, B. Sarria, y J. Monteagudo, «Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz», *Sci. Técnica*, vol. 5, no. 37, pp. 255-230, 2007.
- [126] M. Bakari, «Characterization of rice husks as a biofuel feedstock towards sustainable rural rice processing in Sub-Saharan Africa», *McGill University, Montreal, Canada, Tesis de doctorado*, 2016.

- [127] R.A. Naveda, P.A. Jorge, L. Flores, y L. Visitación, «Remoción de lignina en el pretratamiento de cascarilla de arroz por explosión de vapor.», *Rev Soc Quím Perú*, vol. 85, n.o 3, pp. 352-362, 2019.
- [128] S. D. Genieva, S. C. Turmanova, A. S. Dimitrova, y L. T. Vlaev, «Characterization of rice husks and the products of its thermal degradation in air or nitrogen atmosphere», *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 93, n.o 2, pp. 387-396, 2008. doi: 10.1007/s10973-007-8429-5.
- [129] A. Porras, A. Maranon, y I. A. Ashcroft, «Characterization of a novel natural cellulose fabric from *Manicaria saccifera* palm as possible reinforcement of composite materials», *Compos. Part B Eng.*, vol. 74, pp. 66-73, 2015. doi: 10.1016/j.compositesb.2014.12.033.
- [130] E.M. Ciannamea, P. M. Stefani, y R. A. Ruseckaite, «Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives», *Bioresour. Technol.*, vol. 101, n.o 2, pp. 818-825, 2010. doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.084.
- [131] L. Ludueña, D. Fasce, V.A. Alvarez, y P.M. Stefani, «Nanocellulose from rice husk following alkaline treatment to remove silica», *BioResources*, vol. 6, n.o 2, pp. 1440-1453, 2011. doi: 10.15376/biores.6.2.1440-1453.
- [132] A. Tatarczak y S. Fic, «Additives in Sorel Cement Based Materials - Impact Study», *Proc. Int. Conf. Civil, Struct. Transp. Eng.*, no. 318, pp. 318-1-318-9, 2015.
- [133] M. Miao, C. Wu, y H. Zhang, «Study on the properties of magnesium oxychloride cement prepared by the magnesium-rich byproducts from the production of lithium carbonate from salt lakes», *J. Ceram. Soc. Japan*, vol. 129, n.o 8, pp. 516-527, 2021. doi: <http://doi.org/10.2109/jcersj2.20242>
- [134] B. Xu, H. Ma, C. Hu, y Z. Li, «Influence of cenospheres on properties of magnesium oxychloride cement-based composites», *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, n.o 4, pp. 1319-1326, 2016. doi: 10.1617/s11527-015-0578-6.
- [135] C. Chau, J. Chan, y Z. Li, «Influences of fly ash on magnesium oxychloride mortar», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, n.o 4, pp. 250-254, 2009. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.011.
- [136] J. Khedari, B. Suttisonk, N. Pratinthong, y J. Hirunlabh, «New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, n.o 1, pp. 65-70, 2001. doi: 10.1016/S0958-9465(00)00072-X.
- [137] T.A. Aiken, M. Russell, D. McPolin, y L. Bagnall, «Magnesium oxychloride boards: understanding a novel building material», *Mater. Struct. Constr.*, vol. 53, n.o 5, pp. 1-16, 2020. doi: 10.1617/s11527-020-01547-z.
- [138] S. Wang, R. Weng, Y. Zhu, X. Li, y Y. Xi, «Effects of EVA latex on the properties of Glass-Fiber/Magnesium-Oxychloride Cement composites», *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, vol. 21, n.o 1, pp. 138-142, 2006. doi: 10.1007/BF02861492.
- [139] Y. Tan, C. Wu, H. Yu, Y. Li, y J. Wen, «Review of reactive magnesia-based cementitious materials: Current developments and potential applicability», *J. Build. Eng.*, vol. 40, pp. 1-21, 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102342.

- [140] C. Kulasuriya, V. Vimonsatit, y W. P. S. Dias, «Performance based energy, ecological and financial costs of a sustainable alternative cement», *J. Clean. Prod.*, vol. 287, pp. 1-8, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125035.
- [141] Y. Han, Y. Xu, S. Q. Shi, J. Li, y Z. Fang, «Cuttlebone-inspired magnesium oxychloride cement reinforced by biochar as green adhesive for wood industry», *J. Clean. Prod.*, vol. 370, pp 1-14, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133365.
- [142] Z. Jokar y A. Mokhtar, «Policy making in the cement industry for CO₂ mitigation on the pathway of sustainable development- A system dynamics approach», *J. Clean. Prod.*, vol. 201, pp. 142-155, 2018. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.286.
- [143] S. K. Kaliyavaradhan, T. C. Ling, y K. H. Mo, «Valorization of waste powders from cement-concrete life cycle: A pathway to circular future», *J. Clean. Prod.*, vol. 268, pp. 1-25. 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122358.
- [144] S. Zhang, Y. Xie, R. Sander, H. Yue, y Y. Shu, «Potentials of energy efficiency improvement and energy–emission–health nexus in Jing-Jin-Ji’s cement industry», *J. Clean. Prod.*, vol. 278, pp. 1-15, 2021.
- [145] M. Tomatis, H.K. Jeswani, L. Stamford, y A. Azapagic, «Assessing the environmental sustainability of an emerging energy technology: Solar thermal calcination for cement production», *Sci. Total Environ.*, vol. 742, pp. 1-17, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123335.
- [146] S. Yousuf, L. F. M. Sanchez, y S. A. Shammeh, «The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry», *J. Build. Eng.*, vol. 25, pp. 1-12, 2019. doi: 10.1016/j.job.2019.100815.
- [147] Y. Guo, Y. X. Zhang, K. Soe, R. Wuhner, W. D. Hutchison, y H. Timmers, «Development of magnesium oxychloride cement with enhanced water resistance by adding silica fume and hybrid fly ash-silica fume», *J. Clean. Prod.*, vol. 313, pp. 1-16, 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127682.