



Universidad Nacional de Asunción
Facultad Politécnica

Aplicación de PET y *Luffa cylindrica* como alternativas de refuerzo para la fabricación de bloques de tierra compactada

María Belén Martínez Pavetti

*Tesis presentada a la Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción,
como requisito para la obtención del Grado de Doctor en Ciencias de la
Computación.*

San Lorenzo - Paraguay
Diciembre, 2021

Universidad Nacional de Asunción

Facultad Politécnica

**Aplicación de PET y *Luffa cylindrica*
como alternativas de refuerzo para la
fabricación de bloques de tierra
compactada**

María Belén Martínez Pavetti

Orientadora: Prof. Magna M. Monteiro, DSc.

*Tesis presentada a la Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción,
como requisito para la obtención del Grado de Doctor en Ciencias de la
Computación.*

San Lorenzo - Paraguay

Diciembre, 2021

Martínez Pavetti, María Belén.

Aplicación de PET y *Luffa cylindrica* como alternativas de refuerzo para la fabricación de bloques de tierra compactada / María Belén Martínez Pavetti.

- - San Lorenzo, 2021.

130p.: il.

Tesis (Doctor en Ciencias de la Computación). - - Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción, 2021.

Bibliografía

1. Bloques de tierra compactada
2. Caracterización.
3. *Luffa cylindrica*.
4. PET.

CDD 666.94

Hoja de Aprobación de Tesis

**Aplicación de PET y *Luffa cylindrica* como
alternativas de refuerzo para la fabricación de
bloques de tierra compactada**

María Belén Martínez Pavetti

Tesis de Doctorado aprobada el 16 de diciembre de 2021 por los siguientes
miembros del Jurado de Defensa:

Prof. Dr. Ricardo Emilio F. Quevedo Nogueira (UFC-Brasil)

Dr. Alexandre Antunes Ribeiro (INT-Brasil)

Prof. Dra. María Magdalena Espinola Colmán (FP-UNA, Paraguay)

Prof. Dra. Omayra Beatriz Ferreiro Balbuena (FCQ-UNA, Paraguay)

Prof. Dra. Magna M. Monteiro (FP-UNA, Paraguay), orientadora

Prof. Dr. Horacio A. Legal Ayala

Coordinador Académico

Postgrado en Ciencias de la Computación

Facultad Politécnica

Universidad Nacional de Asunción

Dedicado a mi madre, Margarita, y a mi hijo, Renato.
Mami, soy feliz por ser tu hija, y Reni, soy feliz por ser tu mamá.
Len

Agradecimientos

A mi hijo Renato, por iluminar mi vida con su sonrisa y regalarme un nuevo futuro lleno de aventuras.

A mi mamá, por su amor infinito, por ser mi ángel de la guarda.

A mis hermanos Ana y Emilio, por ser mis mejores amigos. A Anita, además, por responder siempre a mis preguntas sobre química y metodología.

A mi papá, por su ejemplo de trabajo honesto, valores y perseverancia.

A mi orientadora, la Dra. Magna Monteiro, por preocuparse por mí como una amiga y sostenerme para salir adelante.

A mi amiga, la Dra. Alicia Arévalos, por su presencia incondicional constante y sus palabras siempre oportunas.

A Yani, por cuidar a Reni con amor.

A mi prima Claudia, que no se imagina lo importante que es su apoyo.

A Gabi, por estar siempre pendiente y alentando.

Al Dr. Shoji Imatani, por todos los conocimientos que compartió conmigo con tanta paciencia.

A mi compañera, la Dra. Liz Báez, por su valiosísima ayuda en la recolección de botellas de PET.

A la Ing. Andrea Maldonado y a la Ing. Ángela Corvalán, con quienes tuve el agrado de trabajar al iniciar esta investigación. A la Ing. Andrea, además, por su apoyo con los ensayos de microscopía electrónica de barrido.

A la Ing. Carmen Sánchez y al MSc. Pablo Casanova, por las ocasiones en que fabricaron ladrillos conmigo. A Pablo, adicionalmente, por su actitud servicial de siempre con las actividades en el Laboratorio de Bio y Materiales.

A mis profesores de las materias del doctorado, por enseñar para cambiar el chip.

Al Dr. Diego Pinto, por su labor como coordinador del doctorado.

A mis compañeros de las materias del doctorado, Fabricio, Cristhian, Sergio, Arturo, César, Cinthia, Patricia, Eduardo y Enrique, por hacerme sentir su amistad y camaradería.

Al Dr. Antonio Aquino, del Laboratorio de Mecánica Computacional, al Dr. Alejandro Quiñónez, del Laboratorio de Ingeniería Geotécnica de la FIUNA, y al Dr. Benigno Villa, del Laboratorio de Metalurgia y Corrosión de la FIUNA.

Al Ing. Augusto Acosta, al Ing. Pastor Olmedo y al técnico Jorge Olmedo del Laboratorio de Materiales de Ingeniería de la FIUNA, y al técnico Rubén Britez del Laboratorio de Ingeniería Vial de la FIUNA.

Al Dr. Roberto Rojas Holden, por su orientación sobre la fabricación y ensayos de las probetas.

A la MSc. Perla Segovia, por su comprensión como jefa de cátedra en la materia en la que soy docente en la FIUNA.

A la Facultad Politécnica, por el programa de Doctorado, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo financiero (Proyecto POSG17-53 / BNAC02). A la Facultad Politécnica, igualmente, por los permitir la realización de los ensayos en las instalaciones especializadas del Laboratorio de Bio y Materiales.

Al Centro de Investigación en Matemáticas (CIMA) por permitir el uso de las instalaciones y equipamiento del Laboratorio de Ecomateriales para la fabricación, almacenamiento y ensayos de los ladrillos.

A la Facultad de Ingeniería, por autorizar la realización de ensayos en los Laboratorios de Materiales de Construcción, de Metalurgia y Corrosión, de Ingeniería Vial y de Ingeniería Geotécnica. Además, por apoyar la formación continua de sus docentes logística, financiera y académicamente, en mi caso a través del Laboratorio de Mecánica Computacional.

Belén

Aplicación de PET y *Luffa cylindrica* como alternativas de refuerzo para la fabricación de bloques de tierra compactada

Autor: María Belén Martínez-Pavetti

Orientadora: Prof. Dra. Magna M. Monteiro.

Resumen

La cocción que requieren los ladrillos tradicionales conlleva un alto consumo energético y a la emisión de contaminantes. En este trabajo, como alternativa al ladrillo tradicional, fueron estudiados bloques de tierra compactada estabilizada con cemento Portland, reforzados con PET triturado y fibras de *Luffa cylindrica* (*L. cylindrica*), sin involucrar cocción, lo que supone un menor consumo energético e impacto ambiental. El suelo empleado fue clasificado como arena limosa. La *L. cylindrica* fue empleada en tres condiciones, sin tratamiento de superficie, tratada con agua en ebullición, y tratada con hidróxido de sodio (NaOH). Las imágenes de MEB mostraron que la *L. cylindrica* sometida a los diferentes tratamientos presentó alteraciones superficiales, con relación a su rugosidad e incrustaciones de partículas. Además, los resultados de FTIR y DRX revelaron las bandas y picos característicos de los constituyentes de la *L. cylindrica*, y sus cambios de composición química de acuerdo al tratamiento. Los bloques fabricados fueron caracterizados por absorción de agua (*AA*) y resistencia a la compresión (*RC*). Según el estudio, los refuerzos no sólo contribuyeron al aumento significativo de la *RC*, sino también al incremento de tenacidad, pues las superficies de rotura exhibieron refuerzo arrancado. Considerando los resultados de *AA* y *RC*, el bloque más prometedor dentro del alcance de la investigación fue aquel con 3% de PET y 7% de *L. cylindrica* tratada con agua, pues cumplió con los requisitos técnicos considerados. Aún cuando son necesarios ensayos adicionales, se puede concluir que es posible fabricar ladrillos ecológicos alternativos con propiedades competitivas.

Palabras clave: Bloques de tierra compactada; Caracterización; *Luffa cylindrica*; PET.

Application of PET and *Luffa cylindrica* as reinforcement alternatives for the manufacture of compacted earth blocks

Author: María Belén Martínez Pavetti

Advisor: Prof. Dr. Magna M. Monteiro.

Abstract

Firing required by traditional bricks involves high energy consumption and pollutant emissions. In this work, compressed stabilized earth blocks were studied, reinforced with grinded PET and *Luffa cylindrica* (*L. cylindrica*) fibers, without the firing process, which implies lower energy consumption and environmental impact. The soil used was classified as silty sand. *L. cylindrica* fibers were considered in three conditions, untreated, treated with boiling water, and treated with sodium hydroxide (NaOH). SEM images showed that treated *L. cylindrica* presented surface modifications, regarding its roughness and particles embedding. Furthermore, FTIR and XRD results revealed the characteristic bands and peaks of the constituents of *L. cylindrica*, and the chemical composition changes depending on the treatments. Blocks manufactured were characterized by water absorption (*AA*) and compressive strength (*RC*). According to this study, reinforcements not only contributed to a significant increase in the *RC* but also improved the toughness because fracture surfaces exhibited reinforcement pullout. Considering the results of the *AA* and *RC* tests, the most promising block within the scope of this research is the one with 7% PET and 3% water-treated *L. cylindrica*, since it met the technical requirements considered. Although additional tests are necessary, it can be concluded that it is possible to manufacture alternative ecological bricks with competitive properties.

Keywords: Characterization; Compressed earth blocks; *Luffa cylindrica*; PET.

Índice General

Lista de Figuras	xii
Lista de Tablas	xiv
Lista de Símbolos	xvi
1 Introducción	1
1.1 Justificación	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Estructura de la tesis	4
2 Revisión bibliográfica	5
2.1 Impacto de la industria de la construcción civil en la naturaleza	5
2.1.1 Producción del cemento	5
2.1.2 Fabricación del ladrillo cerámico tradicional	7
2.2 Materiales compuestos	7
2.2.1 Tipos de matriz	8
2.2.2 Tipos de refuerzo	8
2.2.3 Interfaz matriz-refuerzo	9
2.3 Bloques de tierra compactada	11
2.3.1 Impacto ambiental de los bloques de tierra compactada	12
2.3.2 Caracterización y propiedades	14
2.3.3 Normas de caracterización y fabricación aplicables . . .	16

2.4	El PET como refuerzo	17
2.4.1	Propiedades	17
2.4.2	Impacto ambiental del uso indiscriminado de polímeros	18
2.4.3	Estudios sobre la aplicación de PET como agregado	19
2.5	La <i>Luffa cylindrica</i>	21
2.5.1	Estudios relacionados a la <i>L. cylindrica</i> para su uso como refuerzo	24

3 Materiales y métodos 28

3.1	Preparación y caracterización de los componentes de los bloques	31
3.1.1	Suelo	31
3.1.1.1	Granulometría por tamizado y sedimentación	32
3.1.1.2	Límites de Atterberg	34
3.1.1.3	Clasificación del suelo	35
3.1.1.4	DRX del suelo	38
3.1.2	PET	38
3.1.2.1	MEB del PET	41
3.1.3	<i>Luffa cylindrica</i>	41
3.1.3.1	Tratamiento con agua corriente	42
3.1.3.2	Tratamiento con NaOH	43
3.1.3.3	Microscopía óptica de la <i>L. cylindrica</i>	44
3.1.3.4	MEB y EDS de la <i>L. cylindrica</i>	44
3.1.3.5	Espectroscopía FTIR de la <i>L. cylindrica</i>	44
3.1.3.6	DRX de la <i>L. cylindrica</i>	45
3.2	Fabricación de los bloques	46
3.2.1	Dosificación	46
3.2.2	Mezclado de la materia prima	47
3.2.3	Moldeo, curado y producto final	48
3.3	Caracterización de los bloques	49
3.3.1	Ensayo de absorción de agua	49
3.3.2	Ensayo de resistencia a la compresión	51
3.3.3	Otros ensayos	52

4	Resultados y discusiones	54
4.1	Preparación y caracterización de los componentes de los bloques	54
4.1.1	Suelo	54
4.1.1.1	Granulometría por tamizado y sedimentación y límites de Atterberg	55
4.1.1.2	Clasificación del suelo y selección del estabi- lizante	56
4.1.1.3	DRX del suelo	57
4.1.2	Estabilizante - Cemento	58
4.1.3	PET	59
4.1.3.1	MEB del PET	59
4.1.4	<i>Luffa cylindrica</i>	60
4.1.4.1	Microscopía óptica de la <i>L. cylindrica</i>	61
4.1.4.2	MEB y EDS de la <i>L. cylindrica</i>	63
4.1.4.3	Espectroscopía FTIR de la <i>L. cylindrica</i>	67
4.1.4.4	DRX de la <i>L. cylindrica</i>	69
4.2	Fabricación de los bloques	72
4.2.1	Mezclado de la materia prima	72
4.2.2	Moldeo, curado y producto final	73
4.2.3	Estimación de costo de producción	74
4.3	Caracterización de los bloques	75
4.3.1	Aspecto	75
4.3.2	Masa y densidad	76
4.3.3	Ensayo de absorción de agua	78
4.3.4	Ensayo de resistencia a la compresión	82
4.3.4.1	Observaciones adicionales	85
4.3.5	Observación con lupa	91
5	Conclusiones y trabajos futuros	93
5.1	Conclusiones	93
5.2	Trabajos futuros	95

Lista de Figuras

2.1	Unión interfacial mecánica	10
2.2	Formas de la interfaz matriz-refuerzo	10
2.3	Mecanismos de aumento de tenacidad en matrices frágiles . . .	11
2.4	Comparación del carbono incorporado en diferentes materiales de construcción	13
2.5	Mapa de ubicación de suelos adecuados para construcción basada en tierra	17
2.6	Frutos verdes y fibras de la <i>L. cylindrica</i>	22
3.1	Flujograma de proceso de la parte experimental.	30
3.2	Preparación del suelo	31
3.3	Secado de muestra para sedimentación	33
3.4	Preparación de muestras para ensayo de sedimentación	33
3.5	Granulometría por hidrómetro	34
3.6	Máquina de Casagrande y utensilios para el ensayo de límites de Atterberg.	35
3.7	Cuadro de clasificación de suelos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	36
3.8	Guía para la selección del aditivo estabilizante	37
3.9	Muestra de las botellas de PET en su estado como adquirido.	38
3.10	Acondicionamiento del PET.	40
3.11	Hojuelas de PET de tamaño nominal 2,4 mm.	41
3.12	Muestra de <i>L. cylindrica</i> en su estado como adquirido.	41
3.13	Preparación de la <i>L. cylindrica</i>	42

3.14	Tratamiento de la <i>L. cylindrica</i> con solución de NaOH.	43
3.15	Muestra del refuerzo de <i>L. cylindrica</i> tratada con NaOH.	44
3.16	Fabricación de los bloques	48
3.17	Reposo, curado de los bloques y producto final	49
3.18	Bloques sumergidos completamente para el ensayo de absorción de agua.	50
3.19	Preparación de las probetas para el ensayo de compresión	51
3.20	Dimensiones del área resistente de la probeta.	51
3.21	Preparación de muestras para observación con lupa	53
4.1	Distribución de tamaños de grano del suelo empleado como matriz	55
4.2	Requisitos estimados de cemento para diversos tipos de suelo.	57
4.3	Difractogramas del suelo en estado como comprado y pasante tamiz No. 200.	58
4.4	Imágenes MEB del PET	59
4.5	Estructura de fibras interconectadas de la <i>L. cylindrica</i>	61
4.6	Imágenes de microscopía óptica de la <i>L. cylindrica</i>	62
4.7	Imágenes MEB de fibras de <i>L. cylindrica</i>	64
4.8	Resultados de MEB de la superficie y del mapeo de calcio por EDS de una muestra de LN	65
4.9	Espectros FTIR de las muestras de <i>L. cylindrica</i>	68
4.10	Espectros DRX de <i>L. cylindrica</i> sin tratamiento – LN	70
4.11	Espectros DRX de <i>L. cylindrica</i> tratada con agua en ebullición – LA.	70
4.12	Espectros DRX de <i>L. cylindrica</i> tratada con NaOH - LS.	71
4.13	Nódulos en la mezcla.	73
4.14	Esquema de los bloques obtenidos.	74
4.15	Producto final, y superficies de bloques con presencia de PET, y <i>L. cylindrica</i>	76
4.16	Resultados del ensayo de absorción de agua de los bloques.	79
4.17	Imagen MEB del corte transversal de una fibra de <i>L. cylindrica</i>	81
4.18	Resultados de resistencia a la compresión de los bloques	83

4.19	Patrón de fisuras típico en una cara de una probeta, y exfoliación.	85
4.20	Probetas 0P0L: patrón de fisuras típico y superficie de rotura de aspecto uniforme.	86
4.21	Probetas 10P0L: patrón de fisuras típico y superficie de rotura con presencia de hojuelas de PET arrancadas.	87
4.22	Probetas 7P3LZ: patrón de fisuras típico y superficie de rotura con presencia de hojuelas de PET arrancadas y fibras de <i>L. cylindrica</i> arrancadas.	88
4.23	Probetas 3P7LZ: patrón de fisuras típico y porciones de probeta unidas entre sí por fibras de <i>L. cylindrica</i>	89
4.24	Probetas 0P10LZ: patrón de fisuras típico y superficie de rotura con gran presencia de fibras de <i>L. cylindrica</i>	90
4.25	Posicionamiento de una probeta encapsulada en la lupa, y regiones sin contacto entre matriz y hojuelas de PET.	92

Lista de Tablas

2.1	Designación de algunos tamices normalizados.	15
3.1	Código de identificación de los bloques, de acuerdo a la fracción volumétrica de sus constituyentes.	47
4.1	Resumen de propiedades importantes del suelo en estudio. . .	56
4.2	Composición química de la <i>L. cylindrica</i> natural tratada con agua, y tratada con NaOH	65
4.3	Datos para la estimación del costo de producción de una unidad de bloque.	75
4.4	Masas y densidades promedio de los bloques fabricados. . . .	77

Lista de Abreviaturas y Símbolos

AA	Absorción de agua	2
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>	2
BTC	Bloques de tierra compactada.....	12
CIMA	Centro de Investigación en Matemática	38
CP	Cemento Portland	2
DRX	Difracción de rayos X	15
EDS	Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva	44
FIUNA	Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Asunción	32
FPUNA	Facultad Politécnica Universidad Nacional de Asunción	38
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier	15
<i>IP</i>	Índice de plasticidad	15
KBr	Bromuro de potasio.....	45
<i>L. cylindrica</i>	<i>Luffa cylindrica</i>	2
LA	<i>L. cylindrica</i> en estado tratada con agua en ebullición	42
LL	Límite líquido	15
LN	<i>L. cylindrica</i> en estado <i>in natura</i>	42
LP	Límite plástico	15
LS	<i>L. cylindrica</i> en estado tratada con solución de NaOH.....	42
MEB	Microscopía electrónica de barrido	24
m_{hum}	Masa de mezcla húmeda	48
m_{sat}	Masa saturada de los bloques	50
m_{sec}	Masa seca de los bloques.....	50
MO	Microscopía óptica	44

NaOH	Hidróxido de sodio	24
NBR	Norma Brasileira	2
NP	Norma Paraguaya.....	7
PET	Polietileno tereftalato	2
<i>RC</i>	Resistencia a la compresión	2
SM	Suelo tipo arena limosa	56
USCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	14
ρ_{hum}	Densidad de los bloques con masa húmeda	76
ρ_{sec}	Densidad seca de los bloques	76

Capítulo 1

Introducción

En la industria de la construcción civil, los ladrillos se encuentran entre los materiales más utilizados, pudiendo estos ser cocidos o no cocidos. Los ladrillos cocidos son cerámicos que requieren de cocción en horno para obtener el producto terminado, implicando un alto consumo energético y la emisión de contaminantes a la atmósfera. Por otra parte, los ladrillos no cocidos se fabrican a partir de suelo que puede estar o no estabilizado, suelen incorporar un refuerzo que usualmente está en forma de fibras longitudinales como la paja, y son moldeados y secados sin aplicación de calor. El hecho de no requerir consumo energético considerable y de no implicar emisión de contaminantes hace a los ladrillos no cocidos ecológicamente amigables [1, 2].

Otra manera de disminuir el impacto ambiental negativo de la industria de la construcción civil es buscando la sustitución de materias primas basadas en recursos no renovables por materias primas recicladas, o materias primas naturales sustentables. La transformación de los residuos industriales y domésticos en materia prima, como los envases de PET, así como los polímeros de un solo uso, permite la utilización de recursos no biodegradables. Por ello, incorporar un polímero como material de obras civiles es una opción viable como disposición final por la larga vida útil esperada de éstos [3, 4].

Por su parte, el uso de fibras naturales es atractivo porque son renovables, fáciles de obtener, relativamente baratas, y de baja densidad, siendo su producción de menor impacto negativo para el medio ambiente en com-

paración con las fibras sintéticas [5–7]. Además, utilizar materiales disponibles localmente minimiza los costos de transporte, tanto de la materia prima como del producto acabado, y contribuye a la reducción de costos energéticos y de contaminación derivada del transporte [1].

En esta investigación, fueron fabricados bloques compactados, cuya matriz de suelo compactado fue estabilizada con cemento Portland (CP), aplicando como refuerzo hojuelas obtenidas a partir de botellas de polietileno tereftalato (PET), y trozos de *Luffa cylindrica* (*L. cylindrica*), conocida coloquialmente como esponja vegetal.

Fueron caracterizados el suelo, el PET, la *L. cylindrica*, y los bloques fabricados. Además, para determinar la idoneidad de los bloques desarrollados y su aplicabilidad técnica, fueron realizados los ensayos de absorción de agua (*AA*), y resistencia a la compresión (*RC*) de acuerdo con los requisitos establecidos por la *Associação Brasileira de Normas Técnicas* en la norma brasileira NBR 8491: *Tijolo de solo-cimento – Requisitos* (Ladrillos de suelo-cemento - Requisitos) [8].

1.1 Justificación

El presente trabajo buscó desarrollar un material compuesto alternativo al ladrillo cocido convencional, que implique un impacto ambiental negativo menor y pueda ser una opción ingenieril válida como material de construcción civil sostenible. Así, bloques ecológicos fueron concebidos y fabricados adoptando las directrices de usar materia prima disponible localmente, incorporar residuos y fibras naturales como materia prima, y obtener un producto final sin el proceso de cocción, que cumpla con los requisitos y normas técnicas. Con esos criterios, diferentes tipos de bloques de matriz de suelo-cemento con refuerzo de hojuelas de PET reciclado y fibras naturales de *L. cylindrica* fueron fabricados con el auxilio de una prensa manual. La investigación buscó aportar a la comprensión del comportamiento estructural de estos materiales a la dosificación ideal de los componentes que conforman el bloque.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la aplicabilidad de agregados de PET y *Luffa cylindrica* como refuerzo en la fabricación de bloques ecológicos de tierra compactada, considerando diferentes dosificaciones.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el suelo por granulometría y límites de Atterberg y determinar su estabilizante adecuado.
- Evaluar el estado superficial del PET antes y después del triturado.
- Aplicar tratamientos superficiales a la *Luffa cylindrica*.
- Caracterizar la *Luffa cylindrica* antes y después de los tratamientos superficiales.
- Analizar el efecto de los tratamientos de superficie sobre la *Luffa cylindrica* como refuerzo.
- Fabricar bloques de tierra compactada estabilizada, considerando diferentes dosificaciones de refuerzos de hojuelas de PET y partículas de *Luffa cylindrica* sin tratamiento y tratadas.
- Caracterizar los bloques por absorción de agua y resistencia a la compresión en húmedo, y contrastar los resultados obtenidos con los requisitos de normas técnicas para ladrillos.
- Estudiar el comportamiento a la compresión de los bloques de suelo compactado, para diferentes dosificaciones de PET+*Luffa cylindrica*, evaluando la influencia de los refuerzos.

1.3 Estructura de la tesis

El presente trabajo está dividido en 5 capítulos. En el capítulo 1 es presentada la introducción que contextualiza la investigación, así como la justificación y los objetivos propuestos de la tesis. En el capítulo 2 es presentada la revisión bibliográfica, que enmarca el estado del arte y los fundamentos teóricos de la investigación. En el capítulo 3 son presentados los procedimientos metodológicos adoptados para desarrollar la investigación, con base en la revisión bibliográfica, y además son descritos los equipos y materiales empleados. En el capítulo 4 son mostrados los resultados y discusiones de los ensayos y experimentos. En el capítulo 5 son expuestas las conclusiones y las propuestas de trabajos futuros.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

2.1 Impacto de la industria de la construcción civil en la naturaleza

La industria de la construcción civil consume cerca del 50% en peso de los recursos no renovables, más que cualquier otra industria, y es responsable por 30% de la emisión de gases de efecto invernadero [1, 9]. Esta actividad económica está íntimamente relacionada al desarrollo a nivel país, con la calidad de vida asociada a las edificaciones e infraestructura tanto de las viviendas como de los espacios públicos. Por ello, con el aumento de la población mundial, las construcciones se incrementarán [1, 10, 11].

Entre los materiales de construcción más utilizados se encuentran el cemento y los ladrillos cocidos. Es por ello, que encontrar alternativas a estos materiales de manera más sostenible de fabricarlos, o reemplazarlos parcial o totalmente significará un impacto importante en lograr que la industria de la construcción sea ecológicamente amigable [1, 12, 13].

2.1.1 Producción del cemento

En todo el mundo, hay gran abundancia de materia prima para producir cemento. Su proceso de fabricación está optimizado en cuanto al consumo energético, pero como se fabrica en gran volumen, su producción genera de

gran demanda de energía y de materia prima, por lo que inevitablemente tiene un fuerte impacto en el medio ambiente. Diversos contaminantes, sub-productos, y desperdicios se derivan de su ciclo de vida [11, 14].

Por un lado, esta industria es responsable por la emisión de cantidades considerables de dióxido de carbono (CO_2) [14] y otros gases de efecto invernadero como óxidos de nitrógeno (NO_x), así como también dióxido de azufre (SO_2), que pueden causar lluvia ácida [15]. Debido a la enorme cantidad de cemento demandada por el hombre, cualquier pequeña reducción de gases de efecto invernadero debidos a su producción causaría un impacto positivo [16].

Por otra parte, una gran cantidad de polvos se emiten a la atmósfera como consecuencia del proceso de fabricación del cemento. Dependiendo de la materia prima usada, estos polvos pueden contener elevadas concentraciones de metales como calcio, hierro, y magnesio, metales pesados, óxidos metálicos como óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO_2), trióxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (FeO), y otros elementos tóxicos para los humanos, la vegetación y los animales [17–20]. Los gases y polvos aumentan el riesgo de enfermedades relacionadas a metales, enfermedades de la piel, alergias, y desórdenes respiratorios, no solo en los trabajadores de las fábricas de cemento, sino en los habitantes de las zonas circundantes a la fábrica [11, 18, 20]. La contaminación sonora también es considerable en la industria del cemento, tanto la relacionada al proceso de producción como al del empaque [18].

Otro recurso natural que es contaminado en regiones cercanas a las fábricas de cemento es el suelo, pues los niveles de sustancias perjudiciales depositadas, como potasio, calcio, y magnesio, aumentan, y además cambia su pH haciendo que el área no sea apta para el crecimiento de vegetación [18, 21, 22].

Las emisiones contaminantes derivadas de la fabricación el cemento probablemente ya hayan ocasionado daños ambientales irreversibles, y los recursos naturales empleados como materia prima no están disponibles en la cantidad necesaria para acompañar el incremento de la producción del cemento. Los materiales alternativos al cemento deben basarse en la alta

abundancia de la materia prima, la cual debe ser baja en contenido de carbono, debe ser fabricado sin gran consumo de energía y con baja polución y desperdicios derivados [11].

2.1.2 Fabricación del ladrillo cerámico tradicional

Según la Norma Paraguaya NP 104 [23], un ladrillo cerámico es “el mampuesto de uso común en las construcciones, constituido esencialmente por tierras arcillosas de características apropiadas, moldeado a mano o a máquina en forma geométrica, determinada según su uso, y sometido al adecuado **proceso de cocción**”.

La cocción implicada en el proceso de producción de los ladrillos es un tratamiento térmico intensivo en energía que les proporciona los requisitos mecánicos para cumplir funciones estructurales, y los hace materiales de alta energía incorporada [24]. Adicionalmente, el horno en el cual se realiza la cocción de estos ladrillos puede emplear diversos tipos de combustibles, dependiendo de la tecnología del mismo y en general se da preferencia a los combustibles disponibles en la región donde esté ubicada la industria de fabricación de ladrillos. Es por ello que los combustibles pueden ser leñas o maderas, combustibles fósiles, gas natural, basuras y desechos de todo tipo, etc., derivándose de esta combustión múltiples daños al medio ambiente y a la población expuesta [25]. Además, una vez fabricados, en general deben ser transportados por grandes distancias [26], y cuando termina su vida útil la disposición final de los residuos resultantes de ladrillos cocidos se hace en vertederos, causando impacto ambiental negativo [24].

2.2 Materiales compuestos

Un material compuesto puede definirse como un material estructural que consta de dos o más fases no solubles entre sí, combinadas macroscópicamente. Las fases reciben el nombre de matriz y refuerzo, y están separadas por una interfaz. La matriz es la fase continua que aglutina las fibras y distribuye la carga entre ellas, y el refuerzo es la fase dispersa o discontinua, general-

mente más rígida y resistente, que se agrega a la matriz para mejorar sus propiedades. Al fabricar un material compuesto, se busca lograr propiedades superiores con relación a las propiedades de los materiales que lo componen [27–30].

El primer registro escrito acerca de los materiales compuestos se encuentra en la Biblia, en el libro del Éxodo, mencionando los ladrillos de arcilla reforzados con paja [28]. Otros ejemplos históricos del uso de compuestos incluyen las paredes de barro reforzadas con bambú y las láminas de madera apiladas y pegadas usadas por los egipcios. Más recientemente, en el siglo XX, empezaron a producirse industrialmente los materiales compuestos, con la aplicación de fibras de vidrio para en matrices de resinas, y luego vino el auge de su desarrollo con la implementación de nuevas fibras como las de carbono, boro y aramida [28, 30, 31], tornando posible el desarrollo de materiales más resistentes y con mayor valor agregado.

Los compuestos pueden ser clasificados según varios criterios, como el tipo de matriz y la geometría del refuerzo.

2.2.1 Tipos de matriz

El criterio de clasificación más común para los materiales compuestos está relacionado a la naturaleza de su matriz, y según ese criterio pueden ser Compuestos de Matriz Polimérica (CMP), Compuestos de Matriz Cerámica (CMC) y Compuestos de Matriz Metálica (CMM) [27–29].

2.2.2 Tipos de refuerzo

En general, según la geometría del refuerzo, estos se clasifican como [28, 30]:

- **Compuestos particulados:** refuerzo con geometría tridimensional. Las partículas usualmente se agregan de manera aleatoria, lo que otorga un comportamiento isotrópico.
- **Compuestos de hojuelas:** refuerzos de geometría bidimensional. Los compuestos de hojuelas pueden proporcionar una mayor resistencia, sin embargo, puede haber dificultad para orientar las hojuelas.

- **Compuestos de fibras:** refuerzos con geometría unidimensional, pudiendo ser fibras cortas o largas. Estos compuestos son generalmente anisotrópicos.

2.2.3 Interfaz matriz-refuerzo

La interfaz entre un refuerzo y una matriz es la superficie de unión o contacto entre ambos a lo largo de la cual puede ocurrir una variación en algunos parámetros, tales como la concentración de un elemento, la estructura cristalina, el módulo elástico, la densidad, etc. Las propiedades de un material compuesto son el resultado del comportamiento combinado del refuerzo y de la matriz, y también están directamente relacionadas con la interfaz matriz-refuerzo [28, 29].

Los tipos de unión matriz-refuerzo influyen directamente en la unión que puede ocurrir entre ellos. Cuando se desarrolla un material compuesto, además de tener clara su aplicación, es de fundamental importancia conocer el tipo de unión que puede resultar, siendo así, podemos tener los siguientes tipos de uniones, de acuerdo a los materiales involucrados [27–29, 32]:

- **Unión química:** debido al transporte atómico o de moléculas por difusión. Pueden ser uniones covalentes, iónicas, metálicas, etc., y son consideradas uniones fuertes, también llamadas fuerzas primarias de alta energía. Dependen de un buen mojado entre matriz y refuerzo. Para propiciar este tipo de unión, pueden aplicarse tratamientos superficiales que insertan grupos químicos en la superficie de los refuerzos.
- **Unión mecánica:** debido al agarre o intertrabado mecánico entre matriz y refuerzo por la rugosidad de la superficie de la fibra, esta unión es más débil que la unión química. Para una mejor adherencia, la matriz debe llenar las estriaciones superficiales del refuerzo y no deben quedar vacíos en la interfaz (Figura 2.1) es decir, debe haber una buena mojabilidad. La rugosidad juega un papel positivo sólo si el refuerzo es adecuadamente mojado por la matriz. Pueden aplicarse tratamientos superficiales al material de refuerzo para mejorar la superficie de

contacto y aumentar la unión mecánica.

- **Unión física:** las fuerzas de unión interfacial son fuerzas débiles, llamadas secundarias o de van der Waals, e incluyen interacciones dipolares y uniones de hidrógeno. Son de uniones de muy baja energía. Estas fuerzas están involucradas en el fenómeno de mojabilidad.

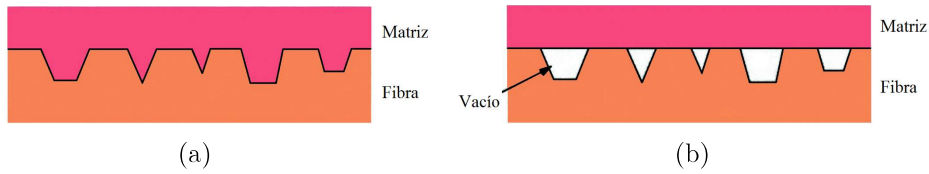


Figura 2.1: (a) Unión mecánica adecuada, y (b) unión con vacíos en la interfaz. Fuente: [29].

Lo expuesto permite apreciar que los mecanismos para lograr una unión óptima en la interfaz pueden basarse en tratar superficialmente el refuerzo o modificar la composición de la matriz [29].

Por un lado, el tratamiento superficial del refuerzo puede hacerse no solo para propiciar una unión química, sino también para aumentar el área de superficie en la interfaz fibra-matriz, pues con una mayor área se mejora la transmisión de cargas de la matriz al refuerzo [28]. Por otra parte, al modificar la composición de la matriz se busca mejorar la mojabilidad, que es la capacidad de la matriz de esparcirse sobre el refuerzo. Los refuerzos no son idealmente suaves sino que tienen cierto grado de rugosidad (Figura 2.2) y la morfología superficial del refuerzo también incide en la mojabilidad [29].

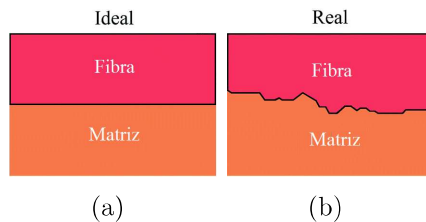


Figura 2.2: Formas de la interfaz matriz-refuerzo: (a) interfaz suave idealizada, y (b) interfaz rugosa real. Fuente: [29].

El concepto de unión óptima depende del tipo de matriz. Para el caso específico de matrices frágiles, una unión óptima no necesariamente es aquella que maximiza su resistencia, sino la que mejora su tenacidad sin detrimento excesivo de la resistencia. Es decir, en un material frágil, una interfaz es óptima si contribuye al aumento de tenacidad de la matriz [28, 29].

Cuando se introduce un refuerzo a una matriz, este puede contribuir al aumento de tenacidad debido a varios mecanismos, como el arranque o desprendimiento del refuerzo, el puenteo de fisuras, y la desviación de fisuras (Figura 2.3) [29, 30].

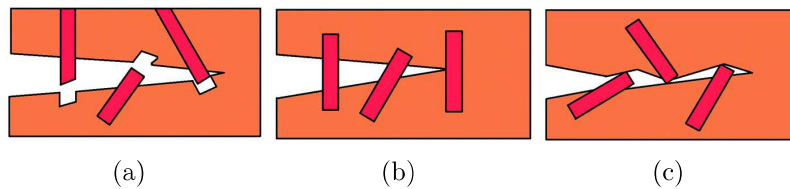


Figura 2.3: Mecanismos de aumento de tenacidad en matrices frágiles: (a) arranque de refuerzo, (b) puenteo de fisuras, (c) desviación de fisuras.

Fuente: [29].

El aumento de tenacidad se debe a que se propician múltiples lugares de falla en la matriz que se esparcen a través de la interfaz, induciendo un daño difundido en lugar de uno localizado. Además, se propicia que las fisuras se desvíen de su dirección principal, y que las porciones de la matriz fisurada sigan unidas. Esto se logra con una unión mecánica, con desacoplamiento débil de la interfaz fibra-matriz [28, 29].

2.3 Bloques de tierra compactada

Por todas partes a nuestro alrededor, son encontradas estructuras que incorporan materiales basados en el suelo [33]. En general, los bloques de suelo estabilizado son estructuras que se fabrican compactando el suelo mezclando con un estabilizante, que puede ser cal, cemento, yeso, etc., con humectación adecuada [2]. En las disciplinas que estudian la producción arquitectónica basada en suelo, cuando este es apropiado para la construcción recibe también

el nombre de tierra, de ahí la denominación común de los bloques de suelo-cemento es bloques de tierra compactada estabilizada o simplemente bloques de tierra compactada (BTC) [34].

Estabilizar un suelo es mezclarlo con otros materiales para mejorar las propiedades de interés. Este proceso puede incluir la mezcla de diferentes suelos para obtener una gradación específica, o la incorporación de aditivos que modifican la gradación o actúan como aglomerantes. En el caso de una estabilización por aditivos, el tipo de aditivo y su proporción son establecidos con base en la clasificación del suelo [35]. Para el caso de los BTC, lo que se busca en general es mejorar sus propiedades mecánicas, lo que puede lograrse por una estabilización por aditivos. Por ejemplo, un BTC estabilizado con 4 a 10% de cemento tiene mejores propiedades que un bloque sin estabilizar [36].

Según la NBR 8491 [8], el ladrillo de suelo-cemento es “el componente de mampostería constituido por una mezcla homogénea, compactada y endurecida de suelo, cemento Portland, agua y, de acuerdo a la necesidad, aditivos y/o pigmentos en proporciones que permitan cumplir con los requisitos de esta Norma, cuya altura sea menor que su largo. Puede ser macizo o hueco”.

2.3.1 Impacto ambiental de los bloques de tierra compactada

Los bloques de tierra compactada son considerados bloques de bajo carbono incorporado y energéticamente eficientes [2], y como son elementos estructurales basados en tierra, adquieren notoria importancia en el contexto de la construcción sustentable [1, 37].

Los países en vías de desarrollo emplean ampliamente bloques de tierra como una importante materia prima para la construcción [1, 13, 36, 37], pues desde el punto de vista económico, los bloques presentan un importante atractivo de costo-beneficio en estos países, donde la mano de obra tiene un costo bajo [1]. Aunque la popularidad del uso de mampostería basada en tierra decayó con el paso del tiempo desde la invención del cemento Portland

[37, 38], en la actualidad nuevamente se promueve su uso, con la concienciación acerca del impacto ambiental negativo del cemento Portland [37].

Por otra parte, desde una óptica ecológica, no puede decirse que la materia prima de los BTC es renovable. Sin embargo, en comparación con los materiales de construcción convencionales, en su fabricación se consume mucha menos energía, pues la extracción de la materia prima es más simple y no requiere maquinarias pesadas, además se puede usar el suelo *in situ* reduciendo la contaminación y los costos relacionados al transporte [1, 26]. Esto permite que viviendas de calidad estén al alcance de más personas, y promueve la economía local [37, 39].

En cuanto al alto impacto ambiental de los gases de efecto invernadero debidos a la quema de combustibles para generar energía, el empleo de materiales de bajo impacto ambiental, como los BTC, en la construcción puede contribuir considerablemente a la disminución de la emisión de estos gases [1, 37]. La Figura 2.4 presenta la relación entre los diferentes bloques o ladrillos utilizados en la construcción civil y su respectiva emisión de dióxido de carbono (CO_2).

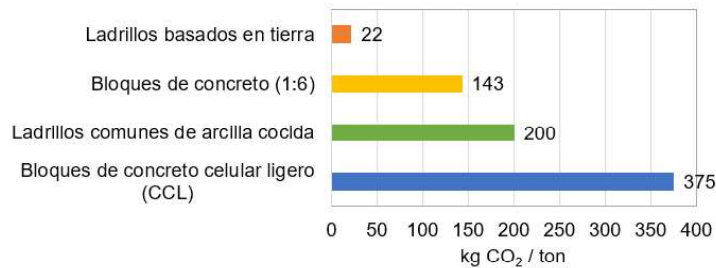


Figura 2.4: Comparación del carbono incorporado en diferentes materiales de construcción. Fuente: [40].

Como se representa en la Figura 2.4, hay una gran diferencia entre las emisiones de CO_2 derivadas de la obtención de los bloques basados en tierra y otros tipos de ladrillos. La emisión de CO_2 de los bloques basados en tierra es 15% de la correspondiente a los bloques de concreto, y tan solo 11% de la correspondiente a los ladrillos cerámicos cocidos, y en comparación con los bloques de concreto celular ligero es apenas un 6% [40].

Si bien es cierto que el uso de cemento como estabilizante de los BTC los hace parecer menos sostenibles [37, 41], el porcentaje de cemento en su composición es muy bajo. Además, si se comparan los BTC con los ladrillos cocidos en cuanto a su impacto ambiental, los BTC estabilizados con cemento implican un menor impacto, pues para su fabricación se requiere de aproximadamente 7% de la energía requerida para ladrillos cocidos, y contaminan ocho veces menos [1].

Adicionalmente, no sólo la forma básica del suelo-cemento es una interesante opción ecológica en la construcción civil, sino también aquellas dosificaciones que incorporan materiales alternativos que los hagan aún más sostenibles [13].

A pesar de sus ventajas medioambientales, hay importantes desventajas que deben tenerse en cuenta para las construcciones basadas en tierra. Algunas desventajas son que su durabilidad y resistencia son inferiores a las de los materiales convencionalmente usados, no se recomienda su aplicación en zonas sísmicas, la materia prima no está estandarizada, es una industria intensiva en mano de obra, y requiere de constante mantenimiento en regiones con mucha precipitación [1, 33].

2.3.2 Caracterización y propiedades

Como materia prima de los BTC, el suelo debe ser caracterizado según procedimientos para la clasificación de suelos establecidos por el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (USCS, por sus siglas en inglés, *Unified Soil Classification System*).

Para la clasificación del suelo, una de las propiedades más importantes es su composición granulométrica o gradación [34], que tiene influencia directamente en el comportamiento mecánico de los BTC [42]. La composición granulométrica permite saber el porcentaje de arena (granos de tamaño entre 2 y 0,075 mm), de limo (granos de tamaño entre 0,075 y 0,002 mm), y de arcilla (granos de tamaño inferior a 0,002 mm) [43]. Una representación gráfica de la composición granulométrica es la curva granulométrica, que es obtenida graficando la cantidad porcentual de partículas que pasan tamices

de abertura normalizada en función de los tamaños de dichos tamices [34]. Las denominaciones de tamices normalizados usualmente empleados para obtener la curva granulométrica se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Designación de algunos tamices normalizados.

Estándar	Alternativa
milímetros	
50,00	2"
37,50	1 1/2"
25,00	1"
19,00	3/4"
12,50	1/2"
9,50	3/8"
4,75	No. 4
2,00	No. 10
micrómetros	
600	No. 30
425	No. 40
300	No. 50
150	No. 100
75	No. 200

Fuente: [44].

Otro procedimiento de clasificación es la determinación de los límites de Atterberg, límites de plasticidad o límites de consistencia, que se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos y por los cuales es posible determinar el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), y el índice de plasticidad (IP). Conociendo estas características, es posible determinar el tipo de estabilizante adecuado y su proporción.

Para identificar los minerales en la arcilla y la presencia de material orgánico, el suelo es caracterizado por técnicas como difracción de rayos X (DRX) [45], y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés, *Fourier-transform infrared*) [46].

En cuanto a las propiedades de los BTC reportadas en la literatura, estas varían considerablemente. Esto se debe a que las propiedades finales dependen de diversos factores, como el suelo empleado en la fabricación, el

estabilizante y su proporción, los agregados elegidos para el refuerzo, las habilidades manuales y técnicas de fabricación, lo que incluye también los conocimientos técnicos para lograr buenas propiedades finales del bloque [2, 33, 36]. Las propiedades mecánicas de los bloques usualmente reportadas son la densidad en seco (entre 1,52 y 2,10 g/cm^3), la resistencia a la compresión húmeda (entre 1,67 y 8,34 MPa) y en seco (entre 3,11 y 21,9 MPa), la resistencia a la flexión en seco (entre 0,14 y 1,21 MPa) y la absorción de agua (entre 1,90 y 24,90%) [45].

2.3.3 Normas de caracterización y fabricación aplicables

Para determinar la proporción adecuada de suelo-cemento para la fabricación de BTC, deben ser realizados ciertos ensayos según normas técnicas. En varios países existen especificaciones locales para la fabricación y ensayos de los BTC [13, 33, 45], pero en cuanto a los ensayos de producto terminado, los requisitos de estas especificaciones no consideran el gran rango de valores posibles en las propiedades mecánicas [33].

Los ensayos más comunes para evaluar la eficacia de la estabilización son el de absorción de agua (AA) y el de resistencia a la compresión (RC) [45]. Como en Paraguay no se producen bloques de suelo-cemento a escala industrial, no cuenta con normas locales aplicables para la fabricación y el control de calidad de BTC. Sin embargo, existen normas regionales aplicables, considerando el mapa indicando las regiones del mundo con suelos aptos para la construcción basada en tierra de la Figura 2.5 [47].

El mapa de la Figura 2.5 permite identificar que regiones de Paraguay, Brasil y Argentina cuentan con suelos aptos. Entonces, teniendo en cuenta factores como la proximidad geográfica y el estado de desarrollo similar de estos países, las normas brasileras y argentinas podrían ser aplicables a Paraguay.



Figura 2.5: Mapa de ubicación de suelos adecuados (regiones sombreadas) para construcción basada en tierra. Fuente: [47].

2.4 El PET como refuerzo

El PET (polietileno tereftalato) es un polímero termoplástico económico, liviano y durable, de uso común en la vida cotidiana, principalmente en forma de botellas. Las botellas de PET son globalmente utilizadas y su reciclado no acompaña la tasa de consumo, por lo que son una importante causa del aumento de los residuos sólidos [48]. Una de las formas de reciclar las botellas de PET es transformándolas en fibras u hojuelas para aplicaciones en el procesamiento de materiales compuestos o simplemente en la fabricación de telas en la industria textil.

2.4.1 Propiedades

El PET tiene gran capacidad de conformación a baja energía, por lo que se usa extensivamente para fabricar fibras, películas, pero principalmente para producir botellas y envases para alimentos de consumo humano [29], por ser inerte, transparente, servir de barrera a gases y conservar el olor y sabor de los alimentos [49].

El PET es muy atractivo como material de ingeniería por su buena procesabilidad, bajo peso y su excelente relación resistencia a la tracción y a cargas dinámicas, además de tener resistencia química. Otras características

del PET son: buena estabilidad térmica, baja conductividad eléctrica, y alta reciclabilidad [49]. El PET, como la mayoría de los polímeros sintéticos o derivados del petróleo, no se oxida ni se desintegra fácilmente por microorganismos, por lo que tiene un periodo de descomposición de cientos de años [50].

2.4.2 Impacto ambiental del uso indiscriminado de polímeros

Los residuos sólidos no biodegradables resultantes del consumo masivo de PET, si bien no constituyen una amenaza directa, representan un gran desafío ambiental y económico en cuanto a su manejo y disposición final, por el gran volumen de desechos y su no biodegradabilidad [4, 49, 51, 52]. Aún cuando la incineración de los desechos es una de las medidas para reducir la cantidad de desperdicios depositados en vertederos [50], en el caso del PET la incineración no es una forma adecuada de manejar sus residuos, pues durante la misma se emiten gases tóxicos. La manera más apropiada de administrar residuos poliméricos como el PET es por medio de reciclado [4, 50].

El reciclado es uno de los principios de sustentabilidad denominados **3 R's**: Reducir, Reutilizar y Reciclar, que se aplican para controlar los daños al ambiente causados por la generación de desechos, no sólo de plásticos sino también de papeles, vidrios, comida, electrónicos, etc. [53].

Reducir es la acción que se contrapone al problema del sobreconsumo, y consiste en minimizar el consumo de energía y recursos, y considerar sistemas más eficientes, así como materiales durables de bajo mantenimiento [54]. Otra manera de aplicar el principio de **reducir** es diseñando mejor un producto para que produzca menor cantidad de desechos [53]. Por su parte, **reutilizar** es volver a emplear recursos ya extraídos. Se diferencia del principio de **reciclar** en que los productos reutilizados se usan prácticamente intactos o con un mínimo procesamiento, mientras que los productos reciclados deben transformarse nuevamente en materia prima para ser usados en nuevos productos [53, 54]. Los recursos reciclables, con contenido reciclado, o que provienen de fuentes renovables deben tener prioridad sobre otros re-

cursos [54].

La fuerza motriz para numerosas investigaciones en todo el mundo es la búsqueda de formas de reciclar desechos de PET [52, 55], presentándose la industria de la construcción civil como una opción prometedora para ese fin [3, 51, 56].

En obras civiles como carreteras, puentes, represas, etc., el PET puede reciclarse a gran escala y de diferentes formas, con lo que se reduce el uso de recursos naturales vírgenes, se reciclan materiales usados, y se abordan los problemas de la disposición final de los residuos y de la mejora de las propiedades de los materiales de construcción involucrados. Para que el beneficio al ambiente sea perceptible, se deben buscar formas no intensivas energéticamente para procesar los residuos de PET [3, 51, 55], entre las cuales se pueden citar el corte manual [51], y el procesamiento mecánico [55].

Según entrevistas realizadas por periódicos locales [57–60] al director adjunto de la empresa Compañía Recicladora S. A. (CORESA), el Lic. Giampiero Musso, el reciclado de PET en Paraguay ha crecido notablemente y es muy alto, estimándose que aproximadamente son recicladas 65% de las botellas de PET producidas. Paraguay produce para exportación cerca de 14.000 toneladas de hojuelas de PET reciclado, generando fuentes de trabajo a unas 100.000 personas.

2.4.3 Estudios sobre la aplicación de PET como agregado

Algunos trabajos que analizan el uso del PET como agregado de materiales para la construcción son presentados a continuación.

Alesmar et al. [49] fabricaron y ensayaron mezclas de cemento, arena y piedra, con agregado de 5, 10 y 15% PET triturado sustituyendo partes de arena, sin seleccionar granulométricamente el tamaño del agregado de PET. De entre las mezclas con agregado de PET, la mezcla con 15% de PET fue la más resistente, pero su resistencia fue inferior a la de la mezcla sin PET, por lo que propusieron utilizar este material compuesto en aplicaciones que no impliquen cargas importantes.

Muestras de concreto reforzado con 0,5, 0,75 y 1,0% de fibras cortas obtenidas del reciclado de botellas de PET fueron estudiadas por Kim et al. [3]. Las fibras fueron alteradas mecánicamente por repujado y además fueron recubiertas con polipropileno injertado con anhídrido maleico para mejorar su unión con el cemento. Reportaron que la resistencia a la compresión disminuyó entre 1 y 10% con el aumento de la proporción de PET, pero que las fibras de PET retrasaron la fisuración por contracción durante el secado del concreto y aumentaron la deformación a la rotura.

Fibras irregulares obtenidas de botellas de PET fueron incorporadas en fracciones volumétricas de 0,5, 1,0 y 1,5% a una matriz de cemento en el trabajo de Irwan et al. [4], indicando que para 0,5% de PET la *RC* aumentó en 9,1%, pero para 1,0 y 1,5% se produjo un deterioro en el comportamiento del concreto.

Saikia y de Brito [55] evaluaron concreto con PET como agregado, en forma de pellets y hojuelas pequeñas y grandes, en fracciones volumétricas de 5, 10 y 15%. Los tamaños promedio de los agregados fueron 2 mm para los pellets, 0,5 - 2 mm para las hojuelas pequeñas, y 2 - 5,6 mm para las hojuelas grandes. Reportaron que la resistencia a la compresión y otras propiedades disminuyeron con el aumento de porcentaje de PET en todos los casos, y que a mayor tamaño de hojuela mayor deterioro en las propiedades. Sin embargo, observaron que el agregado con forma de hojuelas actuó puentando la matriz durante la fisuración.

Un compuesto de concreto reforzado con fibras de PET cortadas manualmente fue investigado por Nibudey et al. [51], quienes emplearon de 0,0 a 3,0% de fibras, con relación de aspecto 35 y 50. Reportaron que las fibras disminuían la trabajabilidad de la mezcla, y que la mejor *RC* se obtuvo para 1% de fibras con relación de aspecto 50, aumentando en 1% pero con mejor tenacidad a la falla. Mayores proporciones de fibras redujeron la *RC*.

Paschoalim Filho et al. [61] estudiaron bloques macizos de suelo-cemento con hojuelas de PET obtenidas por triturado de botellas, sin seleccionar el tamaño de hojuelas. Para una dosificación con 25%CP y 10%PET, los bloques alcanzaron, en promedio, una *RC* de 1,97 MPa, que no satisface el requisito de 2 MPa de la NBR 8491, por lo que propusieron el uso de

estos bloques en mampostería no destinada a grandes cargas. Indicaron que mejores resistencias podían lograrse si se mejoraba la unión entre el PET y la matriz.

Nursyamsi y Zebua [62] investigaron la *RC* de concreto con agregado de partículas de PET recuperado, remoldeado y triturado con martillo. Reportaron que el tamaño de las partículas tiene gran influencia, para menor tamaño de partículas, menor resistencia. El mejor resultado de *RC* fue de 16,57 MPa para las muestras con partículas con mayor módulo de finura, con un tamaño máximo entre 3-4 cm.

Corvalan et al. [63] incorporaron hojuelas de PET de 1,2, 2,4, y 4,8 mm a probetas de cemento, en fracciones volumétricas de 24, 30 y 36%. Informaron que la mayor *RC* fue de 4,75 MPa se obtuvo para las probetas con 24% de hojuelas de PET de 1,2 mm, además que los resultados con hojuelas de 2,4 mm fueron más bajos pero similares, y que los resultados para hojuelas de 4,8 mm significativamente inferiores

A partir de los trabajos considerados en esta sección, puede ser observado que las matrices principalmente estudiadas son matrices cementicias, y que en consecuencia en la mayoría de casos la *RC* a la compresión del compuesto con agregado de PET es menor que la de la matriz. Además, en algunos casos, es necesaria la alteración superficial del PET para mejorar su adhesión a la matriz. Sin embargo, un resultado en común importante es que el agregado de PET mejora el comportamiento a la falla, por aumento de la deformación antes de la rotura o por puenteo de fisuras. También puede ser notado que no sólo el porcentaje de agregado de PET sino también su forma y tamaño tienen considerable influencia en el comportamiento final, habiendo un consenso general en que a mayor porcentaje de PET y mayores tamaños de agregado, mayor la disminución de la *RC*.

2.5 La *Luffa cylindrica*

En el ámbito de los materiales compuestos, numerosas son las investigaciones que exploran el uso de fibras naturales como las fibras de lino y cáñamo [64], el yute [65–68], el bagazo de caña dulce [69, 70], la fibra de sisal y otras [71]

como fase de refuerzo. En ese contexto, la *L. cylindrica*, o simplemente *luffa*, conocida localmente como esponja vegetal, aparece como una interesante candidata [72], pues exhibe tenacidad, resistencia y rigidez similares a las de metales del mismo rango de densidad [6], y además, presenta una alta resistencia específica [73]. Sin embargo, la incorporación de fibras naturales no está unánimemente aceptada por la posibilidad de que las fibras se pudran y aparezcan hongos [1].

La *L. cylindrica* es una planta trepadora de la familia de las cucurbitáceas, cuya fruta se puede consumir cuando está verde [74, 75] (Figura 2.6(a)), cuando madura completamente y se seca pueden extraerse sus fibras (Figura 2.6(b)), para innumerables aplicaciones. La aplicación más común de la *L. cylindrica* es como esponja de limpieza [6, 72, 73, 76, 77], pero también se emplea en medicina natural [6, 72, 78], como suelas y plantillas de zapatos, partes internas de filtros [76, 78], para refuerzo de materiales compuestos y adsorción de materiales en tratamiento de aguas [73, 77]. Crece fácilmente en zonas tropicales, por lo que se cultiva en varias partes del mundo [6, 72, 76]. Como es una fibra natural, las propiedades de la *L. cylindrica* dependen de diversos parámetros como el suelo de cultivo, las condiciones climáticas, los ataques de plagas, etc. [7, 74, 77, 79].



Figura 2.6: Frutos verdes (a) y fibras (b) de la *L. cylindrica*. Fuente: [80].

Todas las fibras vegetales tienen los mismos constituyentes, que son la celulosa, la hemicelulosa, la lignina, la pectina y la cera, pero en diferentes

proporciones [7, 77, 81]. El comportamiento de cualquier fibra vegetal depende de su composición y además de sus propiedades físicas. La composición de las fibras usualmente se da en términos de valores mínimos y máximos, y en la literatura, en general, la composición porcentual de las fibras naturales no suma 100%, pues algunos constituyentes están presentes en cantidades no medibles [7].

En la *L. cylindrica*, el contenido de celulosa puede estar entre 55 y 90% [6, 77]. La celulosa, que es un polímero natural con moléculas de unidades de glucosa unidas en cadenas largas, es el componente estructural básico de todas las fibras vegetales, y proporciona la resistencia y rigidez [7]. Hay cuatro formas cristalinas de la celulosa, siendo la llamada celulosa I o celulosa nativa la que está presente en las paredes celulares de las plantas [81] y por lo tanto en la *L. cylindrica*. Las unidades repetidas de D-anhidro glucosa $C_6H_{10}O_5$ están unidas por enlaces glucosídicos β -1,4, a su vez unidos entre sí en manojos de microfibrillas. Es cristalina y su cristalinidad depende de las uniones de hidrógeno, que regulan las propiedades físicas de la fibra. Las propiedades mecánicas y químicas de una fibra dependen principalmente del contenido de celulosa y, además, la composición de la celulosa es la que presenta menores variaciones en términos de su estructura y propiedades mecánicas, por lo que la celulosa se considera como el principal componente estructural de las fibras naturales [7].

La hemicelulosa está formada por polisacáridos unidos en cadenas cortas ramificadas, íntimamente asociados con las microfibrillas de la celulosa, recubriéndola con la lignina como si fuera una matriz. Es de naturaleza amorfa, muy hidrofílica. La biodegradabilidad, la microabsorción, y la degradación térmica de una fibra dependen de la ella. A mayor cantidad de hemicelulosa, mayor absorción de humedad de la fibra [7, 77]. En la *L. cylindrica* el contenido de hemicelulosa puede estar entre 8 y 22% [6, 77].

La lignina es un polímero aromático complejo que proporciona rigidez a las plantas. Sin la lignina, las plantas no alcanzarían gran altura. Tienen estructura amorfa y sirven como adhesivo entre las fibras. A mayor cantidad de lignina, mayor absorción de humedad de la fibra, y mayor deformación a la ruptura [7]. Además, la lignina proporciona estabilidad térmica [77]. El

contenido de lignina puede variar de 10 a 23% en la *L. cylindrica* [6, 77].

Como las fibras naturales como la *L. cylindrica* son fácilmente producidas por países en desarrollo, su uso en materiales compuestos permite que estos países tengan la posibilidad de ser parte del mercado global de la competitiva industria de los compuestos, tanto en el rol de desarrollador como en el de fabricante. Esto se traduciría en generación de empleo junto con desarrollo económico y social [82, 83]. En ese contexto, la fabricación de aglomerados y materiales de construcción usando la *L. cylindrica* como materia prima está siendo desarrollada en Paraguay, pues el cultivo de estas esponjas ha demostrado contribuir a la generación de empleos en el área rural [84].

2.5.1 Estudios relacionados a la *L. cylindrica* para su uso como refuerzo

Para determinar la factibilidad técnica de la utilización de *L. cylindrica* en el ámbito de la ingeniería, debe estar caracterizada en cuanto a su morfología superficial y su composición química, y también en su posible aplicación final, como refuerzo de una dada matriz.

Algunas investigaciones relacionadas a la caracterización de la *L. cylindrica* son presentadas a continuación.

Tanobe et al. [72] sometieron a las fibras de *L. cylindrica* a tratamientos químicos con soluciones hidróxido de sodio (NaOH) y de metacrilamida, en diferentes concentraciones y por diferentes tiempos. Los autores reportaron que, a pesar de que los dos tratamientos produjeron resultados agresivos para las fibras, el tratamiento con metacrilamida resultó aún más, pues produjo daños importantes en la integridad de las fibras.

Ghali et al. [85] aplicaron dos tratamientos, uno con NaOH y antroquinona, y otro con NaOH y peróxido de hidrógeno, a las fibras de *L. cylindrica*. La microscopía electrónica de barrido (MEB) reveló que la lignina, la pectina y la hemicelulosa fueron removidas por ambos tratamientos, y que diferentes conjuntos de parámetros produjeron diferentes cambios superficiales, lo que sería beneficioso para su uso como refuerzo de compuestos.

La DRX mostró que los tratamientos aumentaron la cristalinidad en ambos casos.

Muestras de *L. cylindrica* sometida a ataques ácidos, básicos y en combinación fueron analizadas por Dias et al. [86], para determinar el tratamiento más conveniente para el uso de *L. cylindrica* como refuerzo en compuestos. En el ataque ácido emplearon una mezcla de ácido acético y ácido nítrico, y en el básico una solución de NaOH. La DRX mostró que se mantuvo la cristalinidad, y una la evaluación macroscópica permitió determinar que el tratamiento más adecuado fue con NaOH, pues la fibra mantuvo alta resistencia sin degradar su estructura.

La relación entre características estructurales y propiedades mecánicas de racimos de fibras de *L. cylindrica* fue investigada por Chen et al. [78]. Estudiaron el mecanismo de falla, hallaron un diagrama tensión-deformación y la influencia de la densidad en el comportamiento mecánico. Determinaron, además, que la cristalinidad de la celulosa tiene influencia notoria en las propiedades, y también verificaron la estabilidad térmica.

Sood y Dwivedi [71] hicieron una revisión bibliográfica de trabajos publicados en el periodo 2000-2016 sobre el efecto de los tratamientos de fibras en compuestos con fibras naturales, concluyendo que, en general, los tratamientos químicos mejoran la unión interfacial.

Trabajos relacionados a la aplicación de la *L. cylindrica* como refuerzo en materiales compuestos son presentados a continuación.

Estudios de matrices poliméricas reforzadas con *L. cylindrica* no tratada fueron llevados a cabo por Boynard y D’Almeida [87] y Nagarajaganesh y Muralikannan [88]. En un caso, los resultados indicaron que las fibras no tratadas no mejoraron las *RC* ni la elongación a la rotura, pero contribuyeron positivamente al comportamiento mecánico propiciando un cambio en el mecanismo de falla reduciendo la propagación de la fisuración [87]. En el otro caso, ensayos de impacto permitieron observar que compuestos con 30% de fibras cortas exhibieron 8 veces más tenacidad que la matriz sin reforzar, lo que demuestra la capacidad de absorción de energía de la *L. cylindrica* [88].

Concretos poliméricos con agregado *L. cylindrica* fueron estudiados por

Martínez-Barrera et al. [89], Mota [90], y Alshaaer y Fahmy [91]. Reportaron una disminución en valores de resistencia a compresión y flexión pero con aumento en la deformación antes de la rotura [89], reducción de la propagación de fisuras, con una baja adhesión entre las fibras tratadas con agua en ebullición y la matriz [90], y una alteración beneficiosa de la *L. cylindrica* debida a la geopolimerización, que mejoró la unión fibra-matriz incrementando la resistencia la tracción, a la compresión, y a la flexión, y la tenacidad por fractura dúctil con endurecimiento por deformación [91].

Compuestos de matriz cementicia con refuerzo de fibras de *L. cylindrica* sin tratamiento y tratadas fueron caracterizados por Colorado et al. [92], Souza et al. [93] y Querido [94]. Fibras cortas y en forma de manta tratadas con ácido monoxoclórico (HClO) y NaOH fueron aplicadas como refuerzo. A partir de la MEB fue observaba una buena adhesión fibra-matriz en ambos casos, y que los compuestos reforzados con mantas tratadas con NaOH exhibieron mejor rendimiento, pues la solución ácida deterioró significativamente las fibras [92]. Una comparación entre compuestos con fibras sin tratamiento y tratadas por esterificación mostró que los compuestos con fibras tratadas presentaron un módulo de ruptura 20% mayor, y que las tenacidades para ambos casos fueron similares [93]. La matriz cementicia reforzada con fibras de *L. cylindrica* fue sometida a ensayo de flexión de tres puntos, y mostró un aumento de resistencia [94].

En cuanto a matrices de suelo-cemento, Cristina et al. [95] fabricaron ladrillos de suelo-cemento huecos con adición de fibras de *L. cylindrica*, reportando que aunque hubo buenos resultados relativos a la *AA*, el compuesto tuvo una *RC* considerablemente menor que la de la matriz sin reforzar, por lo que concluyeron que la incorporación de fibras no fue beneficiosa desde el punto de vista de la *RC*.

La revisión bibliográfica permitió constatar que el tratamiento químico más ampliamente aplicado a la *L. cylindrica* es el tratamiendo con NaOH, y que la variación en los parámetros de concentración de la solución, temperatura de tratamiento y tiempo de tratamiento producen diferentes alteraciones en la morfología de las fibras. Los parámetros deben elegirse adecuadamente, pues las alteraciones mencionadas pueden ser beneficiosas

o desfavorables para la aplicación en la que se empleará. Los tratamientos, además, produjeron variaciones en la cristalinidad de las fibras, en algunos casos aumento y en otros disminución, resultado que es importante pues también fue reportado que una mayor resistencia de la fibra está asociada a una mayor cristalinidad. En cuanto al uso de las fibras de *L. cylindrica* en compuestos, la revisión bibliográfica mostró que las presentaciones de *L. cylindrica* más comúnmente empleadas son en forma de fibras o en forma de manta. En cuanto a sus beneficios como refuerzo, en general, las fibras no contribuyen a un aumento de la resistencia, sino una mejora en el comportamiento a la falla aumentando la deformación a la rotura, lo cual es deseable en matrices frágiles.

Capítulo 3

Materiales y métodos

En esta sección son presentados los procedimientos experimentales de la investigación, que fueron ejecutados según normas técnicas, o bien, adaptados de la bibliografía consultada, de acuerdo a las condiciones aplicables.

El trabajo realizado abarcó la fabricación de bloques de matriz de suelo estabilizado con cemento Portland (CP), y como refuerzo fueron utilizadas hojuelas de PET y fibras de *L. cylindrica*. Los ensayos de caracterización fueron realizados en el suelo, el PET, y la *L. cylindrica* sin tratamiento y con tratamiento, que son materias primas, así como en los bloques, que son el producto final. La Figura 3.1 representa el flujograma de proceso de la parte experimental.

Debido a la carencia de normas aplicables a la construcción basada en tierra en Paraguay, considerando factores como la proximidad geográfica y el estado de desarrollo similar en ciertas regiones, en este trabajo han sido consideradas las normas brasileras correspondientes. Además, fueron aplicadas las normas internacionales recomendadas por la Asociación Paraguaya de Carreteras [96], y otras normas o procedimientos aplicables. Las mismas, en el orden de aplicación, son:

1. ASTM D4318: *Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils* [97], empleada para los ensayos de determinación de los límites de Atterberg.
2. ASTM D422: *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*

[98], empleada para la determinación cuantitativa de la gradación del suelo.

3. ASTM D2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)* [?], empleada para clasificar el suelo.
4. EM 1110-3-137: *Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction* [35], manual empleado para la selección del tipo de estabilizante y su proporción.
5. ABNT NBR 10833: *Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento* [99], empleada para la fabricación de los bloques.
6. ABNT NBR 8491: *Tijolo de solo-cimento - Requisitos* [8], empleada para referencia sobre los requisitos de absorción de agua y resistencia a la compresión.
7. ABNT NBR 8492: *Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio* [100], empleada para los ensayos de absorción de agua y de resistencia a la compresión.

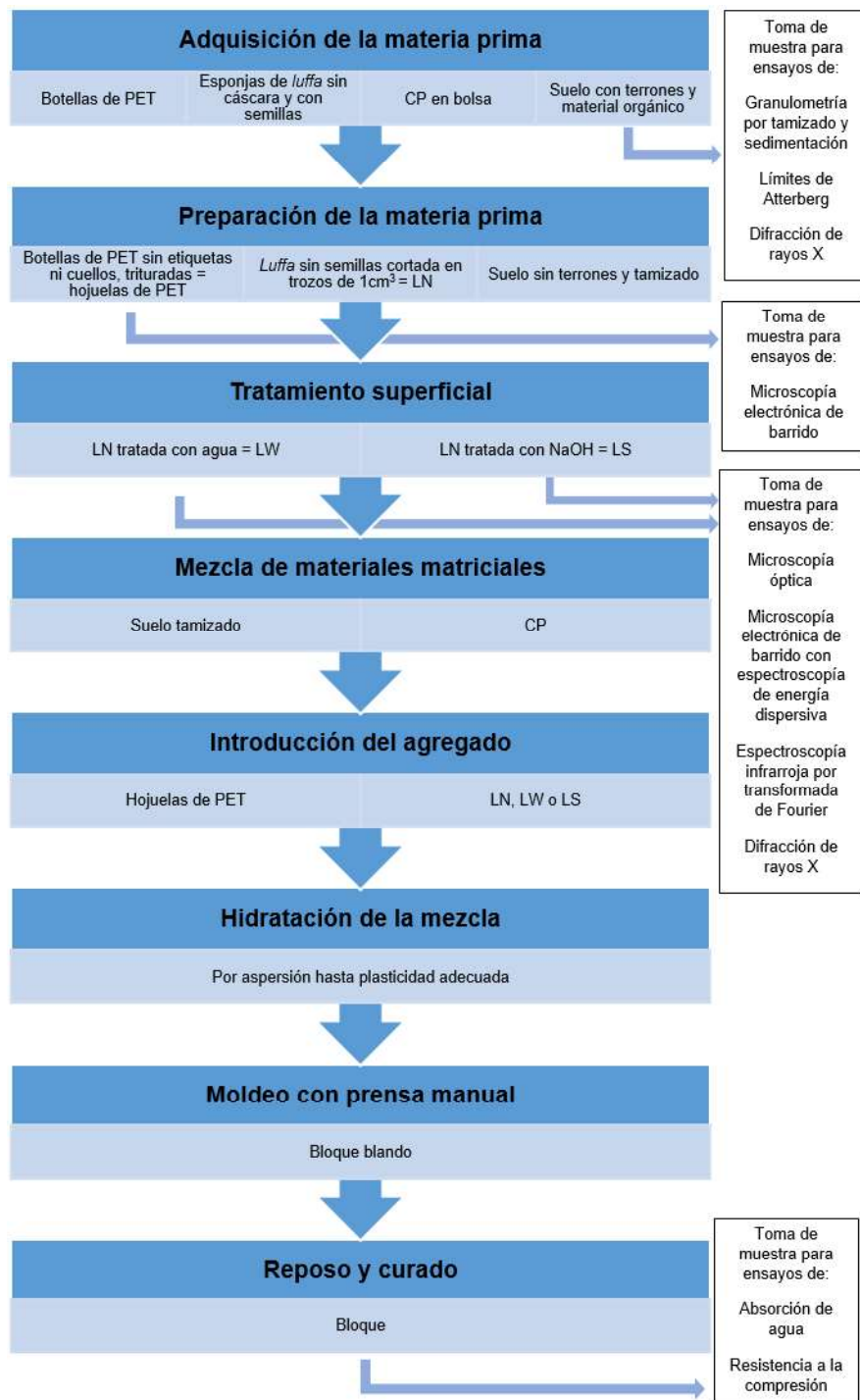


Figura 3.1: Flujograma de proceso de la parte experimental.

3.1 Preparación y caracterización de los componentes de los bloques

3.1.1 Suelo

El suelo fue adquirido por compra directa de depósitos de materiales de construcción locales. Debido a que, en general, este contiene material orgánico indeseado, piedras y terrones grandes y duros (Figura 3.2(a)), el suelo como comprado fue acondicionado con un molino de tierra (EcoLadrillos Paraná, Paraguay) y luego tamizado con una zaranda rotativa (EcoLadrillos Paraná, Paraguay), del Laboratorio de Ecomateriales del CIMA (Figuras 3.2(b) y (c), respectivamente).



Figura 3.2: Preparación del suelo: (a) suelo como comprado, con terrones y material orgánico, (b) molino de tierra y (c) zaranda rotativa.

Para fabricar los bloques de acuerdo a la norma técnica NBR 10833 [99], el suelo fue caracterizado en cuanto a su granulometría, y fueron determinados los límites de Atterberg que son el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), así como el índice de plasticidad (IP), según la norma ASTM D4318 [97].

De acuerdo a la norma técnica NBR 10833, el suelo apto para la fabricación de bloques debe estar encuadrado en las siguientes especificaciones:

- 100% del material debe pasar por el tamiz No. 4 (abertura 4,75 mm),

- 10 a 50% del material debe pasar por el tamiz No. 200 (abertura 0,075 mm),
- debe tener un LL menor o igual a 45%, y
- debe tener un IP menor o igual a 18%.

Además, la NBR 10833 [99] establece que el contenido de material orgánico no debe interferir negativamente con la hidratación del cemento. El contenido de material orgánico del suelo fue verificado por DRX.

3.1.1.1 Granulometría por tamizado y sedimentación

El ensayo de granulometría por tamizado fue ejecutado en el Laboratorio de Ingeniería Vial, y el de granulometría por sedimentación en el Laboratorio de Ingeniería Geotécnica, ambos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA).

El tamizado fue hecho para las partículas retenidas en el tamiz No. 200, empleando una tamizadora mecánica (ELE Intenational, USA) con tamices normalizados según [44]. Con una masa total de 530 g , la masa retenida en cada tamiz fue registrada y el retenido acumulado fue calculado.

La gradación por sedimentación con hidrometría fue realizada para las partículas que pasaron por el tamiz No. 200, con referencia a la norma ASTM D422 [98], empleando un hidrómetro tipo 151H. Para ello, fue tomada una muestra de 50 g del material que pasó por el tamiz No. 200 (Figura 3.3(a)), que fue secada a 70 °C por 24 h en un horno de secado (G-030, Alfa Testing Equipment, USA) (Figura 3.3(b)).

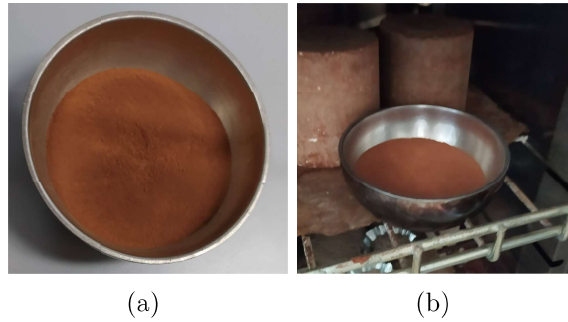


Figura 3.3: Secado de muestra para sedimentación: (a) Muestra del suelo pasante por el tamiz No. 200, (b) secado de la muestra en horno.

Como los granos finos de suelo tienden a flocular y precipitan adheridos entre si como si fuesen granos de mayor tamaño, la muestra secada debe ser introducida en una solución defloculante para que no ocurra floculación durante el ensayo. Para ello, fue preparada una solución defloculante con hexametáfosfato de sodio al 4 wt% en agua destilada, que reposó por 12 *h*. La muestra secada fue introducida en dicha solución (Figura 3.4(a)) donde permaneció por 16 *h*, y luego fue transferida a un cilindro de sedimentación (Figura 3.4(b)). En intervalos específicos de tiempo, fueron registradas las lecturas del hidrómetro (Figura 3.5). Además, fue registrada la temperatura del laboratorio en cada medición. Los cálculos para determinar el tamaño de las partículas y los porcentajes retenidos fueron hechos de acuerdo a la norma ASTM D422 [98].

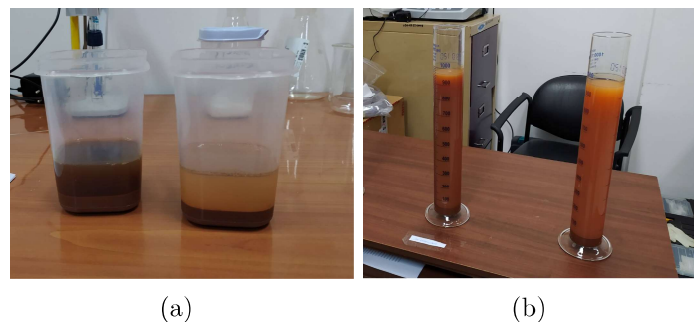


Figura 3.4: Preparación de muestras para ensayo de sedimentación: (a) muestras del suelo en la solución con defloculante (izq.) y sin defloculante (der.), y (b) muestras transferidas cilindros de sedimentación.

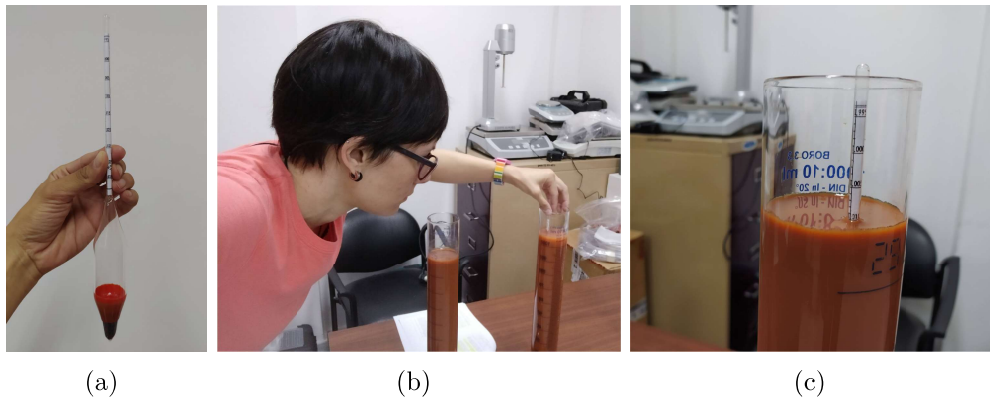


Figura 3.5: Granulometría por hidrómetro: (a) hidrómetro, (b) colocación del hidrómetro, y (c) lectura.

El resultado del ensayo de tamizado fue la distribución de tamaños de grano en la muestra de suelo que no pasan el tamiz No. 200, y el resultado del ensayo de sedimentación fue la distribución de partículas finas pasantes por el tamiz No. 200. Con estos resultados, fue obtenida la curva granulométrica, en la cual los porcentajes de masa de suelo pasante en cada tamiz fueron graficados como función del tamaño del tamiz, en escala semilogarítmica.

3.1.1.2 Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg (límite líquido - LL , límite plástico - LP , e índice de plasticidad - IP) fue ejecutado en el Laboratorio de Ingeniería Vial de la FIUNA, según las directrices de la norma ASTM D4318 [97]. Fue tomada una muestra del suelo en estudio, que fue tamizada por un tamiz No. 40. El material pasante fue mezclado con diferentes cantidades de agua destilada en una cápsula de porcelana con el auxilio de una espátula, hasta que obtener una pasta semilíquida y homogénea. De esta mezcla, fueron transferidos 60 g a la cuchara de bronce normalizada montada en la máquina de Casagrande (Figura 3.6). Con un acalanador, el contenido de la cuchara fue dividido en dos partes iguales, según el eje de simetría de la cuchara. Luego, fue girada la manivela de la máquina para producir el golpeteo de la cuchara. La masa de agua, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco, para la cual la ranura en la mezcla se cerró 13 mm con 25 golpes, fue

registrada como el LL .



Figura 3.6: Máquina de Casagrande y utensilios para el ensayo de límites de Atterberg.

Para la determinación del LP , fue tomada una alícuota de aproximadamente 1 cm^3 de la muestra pasante por el tamiz No. 40. El LP , definido como el contenido de humedad para el cual la muestra de suelo comienza a agrietarse al ser amasada durante la producción de un bastón de 3 mm de diámetro, fue registrado. Conocidos el LL y el LP , el IP fue calculado a través de la ecuación 3.1:

$$IP = LL - LP \quad (3.1)$$

3.1.1.3 Clasificación del suelo

La curva granulométrica junto con el IP fueron empleados para obtener parámetros que permiten clasificar el suelo, y de acuerdo al tipo de suelo, determinar su estabilizante adecuado. En el presente trabajo, el suelo fue clasificado según los criterios del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, por sus siglas en inglés), presentados en el cuadro de la Figura 3.7.

Criterios para asignar símbolos de grupos y nombres de grupos usando ensayos de laboratorio				Clasificación del suelo		
				Símbolo del grupo	Nombre del grupo	
SUELOS DE GRANO GRUESO	Gravas (Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz No. 4)	Gravas limpias (menos de 5% de finos)	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien gradada	
			$Cu < 4$ y/o $[Cc < 1$ o $Cc > 3]$	GP	Grava con gradación pobre	
		Gravas con finos (más de 12% de finos)	Finos clasificados como ML o MH	GM	Grava limosa	
			Finos clasificados como CL o CH	GC	Grava arcillosa	
	Más del 50% retenido en el tamiz No. 200	Arenas (50% o más de la fracción gruesa pasa el tamiz No. 4)	Arenas limpias (menos de 5% de finos)	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien gradada
				$Cu < 6$ y/o $[Cc < 1$ o $Cc > 3]$	SP	Arena con gradación pobre
Arenas con finos (más de 12% de finos)			Finos clasificados como ML o MH	SM	Arena limosa	
			Finos clasificados como CL o CH	SC	Arena arcillosa	
SUELOS DE GRANO FINO	Limos y arcillas	Inorgánico	$IP > 7$ y cae sobre o por encima de la línea 'A'	CL	Arcilla limpia	
			$IP < 4$ y cae por debajo de la línea 'A'	ML	Limo	
	LL < 50	Orgánico	$\frac{LL - \text{secado en horno}}{LL - \text{no secado}} < 0,75$	OL	Arcilla orgánica o Limo orgánico	
	50% o más pasa el tamiz No. 200	Limos y arcillas LL ≥ 50	Inorgánico	IP cae sobre o por encima de la línea 'A'	CH	Arcilla gorda
				IP cae por debajo de la línea 'A'	MH	Limo elástico
Orgánico			$\frac{LL - \text{secado en horno}}{LL - \text{no secado}} < 0,75$	OH	Arcilla orgánica o Limo orgánico	
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	Principalmente materia orgánica, color oscuro, olor orgánico			PT	Turba	

Figura 3.7: Cuadro de clasificación de suelos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - (USCS, por sus siglas en inglés). Fuente: ASTM D2487 [?].

Para seleccionar el agente estabilizante comercial, es empleado el cuadro de la Figura 3.8 del manual de ingeniería EM 1110-3-137 [35], que requiere como entradas los porcentajes de grava (material retenido en el tamiz No. 4), arena (material pasante el tamiz No. 4 y retenido en el tamiz No. 200) y finos (material pasante el tamiz No. 200).

Área	Clasific. del suelo	Tipo de aditivo estabilizante recomendado	Restricción en LL e IP del suelo	Observaciones
1A	SW o SP	(1) Bituminoso		
		(2) Cemento Portland		
		(3) Cenizas volantes de cal-cemento	IP<25	
1B	SW-SM o SP-SM o SW-SC o SP-SC	(1) Bituminoso	IP<10	
		(2) Cemento Portland	IP<30	
		(3) Cal	IP>12	
		(4) Cenizas volantes de cal-cemento	IP<25	
1C	SM o SC o SM-SC	(1) Bituminoso	IP<10	
		(2) Cemento Portland	$IP \leq 20 + \frac{50 - \% \text{pasa tamiz } 200}{4}$	
		(3) Cal	IP>12	
		(4) Cenizas volantes de cal-cemento	IP<25	
2A	GW o GP	(1) Bituminoso		Sólo material bien gradado.
		(2) Cemento Portland		El material debe contener por lo menos 45% en peso de material pasante tamiz No. 4.
		(3) Cenizas volantes de cal-cemento	IP<25	
2B	GW-GM o GP-GM o GW-GC o GP-GC	(1) Bituminoso	IP<10	Sólo material bien gradado.
		(2) Cemento Portland	PI<30	El material debe contener por lo menos 45% en peso de material pasante tamiz No. 4.
		(3) Cal	IP>12	
		(4) Cenizas volantes de cal-cemento	IP<25	
2C	GM o GC o GM-GC	(1) Bituminoso	IP<10	Sólo material bien gradado.
		(2) Cemento Portland	$IP \leq 20 + \frac{50 - \% \text{pasa tamiz } 200}{4}$	El material debe contener por lo menos 45% en peso de material pasante tamiz No. 4.
		(3) Cal	IP>12	
		(4) Cenizas volantes de cal-cemento	IP<25	
3	CH o CL o MH o ML o OH o OL o ML-CL	(1) Cemento Portland	LL<40 y e IP<20	Suelos orgánicos y fuertemente ácidos que caen en esta categoría no son susceptibles para estabilización por medios ordinarios.
		(2) Cal	IP>12	

Figura 3.8: Guía para la selección del aditivo estabilizante. Fuente: [35].

3.1.1.4 DRX del suelo

La caracterización por DRX del suelo fue realizada para verificar y evaluar la existencia o no de impurezas que pudieran influir de manera negativa en el proceso de fabricación y en la resistencia mecánica de los bloques. Estas impurezas pueden ser sales, exceso de material orgánico, etc. Además, los difractogramas pueden mostrar si hay diferencias significativas entre el suelo en estado como comprado y el suelo tamizado.

Para este ensayo, fue empleado un difractómetro de rayos-X (X'Pert, Malvern Panalytical, Países Bajos) con radiación $\text{CuK}\alpha$ generada a 20 *mA* y 40 *kV*, con rango de 2θ de 5 a 80°, tamaño de paso 0,05° y tiempo de paso de 0,80 s. La identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras fue hecha a través del banco de datos libre Atomwork. La muestra de suelo como comprado fue macerada en mortero de ágata. El ensayo fue ejecutado en el Laboratorio de Bio y Materiales de la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción (FPUNA).

3.1.2 PET

Las botellas de PET (Figura 3.9) fueron recolectadas de viviendas familiares y espacios públicos, y su preparación fue hecha en el Laboratorio de Ecomateriales del Centro de Investigación en Matemáticas (CIMA/FPUNA).



Figura 3.9: Muestra de las botellas de PET en su estado como adquirido.

Las botellas de PET, luego de ser recolectadas, fueron sometidas a un

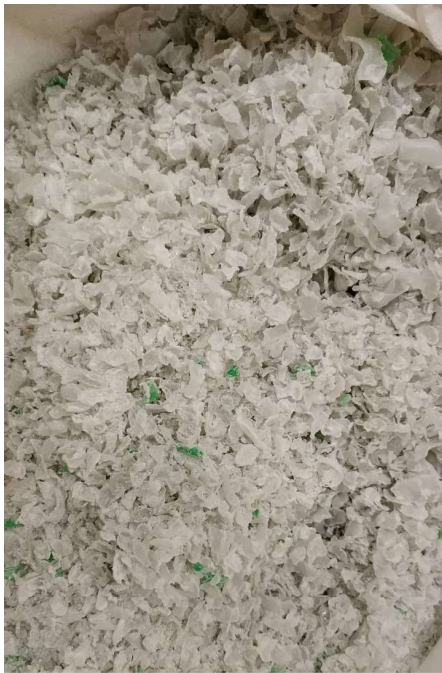
proceso de limpieza con la remoción de sus etiquetas y cuellos, seguido de un vigoroso lavado con agua y jabón para eliminar posibles residuos o contaminantes. Para el método de fabricación artesanal propuesto, resultó problemático reutilizar las botellas con etiquetas adhesivas y las que contuvieron materiales aceitosos, por la excesiva etapa de limpieza que requerían. Es así que fueron empleadas sólo las botellas con etiquetas fácilmente removibles y que hayan contenido líquidos lavables con agua y jabón, como las botellas de gaseosas, refrescos y agua. Además, no fue hecha una discriminación de las botellas en cuanto a los diferentes volúmenes y colores de las mismas.

Los cuellos de las botellas, que no fueron triturados para ser utilizados como refuerzo, fueron descartados en centros de reciclado de PET.

Una vez limpias, las botellas fueron puestas a secar a temperatura ambiente (Figura 3.10(a)) y luego fueron trituradas usando una máquina trituradora de 5,5 HP (ROBOT50, Reyhani, Paraguay). El triturado fue hecho en dos etapas, primero un triturado grueso y luego uno fino. Las hojuelas obtenidas (Figura 3.10(b)) fueron clasificadas granulométricamente por medio de una tamizadora mecánica (TS18, Gilson Company, Estados Unidos) (Figura 3.10(c)) en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la FIUNA. El tamaño de hojuelas de PET de 2,4 mm fue seleccionado, pues ha proporcionado resultados satisfactorios como agregado en bloques de matriz de suelo estabilizado con cemento Portland, reportado en trabajos anteriores realizados por nuestro grupo de investigación [101].



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10: Acondicionamiento del PET: (a) eliminación de etiquetas y cuellos, (b) hojuelas de diversos tamaños, (c) tamizado mecánico.

En la Figura 3.11 es mostrado el agregado de PET luego del tamizado a través del cual fueron seleccionadas las hojuelas de tamaño nominal 2,4 mm.



Figura 3.11: Hojuelas de PET de tamaño nominal 2,4 mm.

3.1.2.1 MEB del PET

La morfología superficial del PET, en las condiciones antes y después del triturado mecánico, fue estudiada por MEB (EVO15, Zeiss Company, Alemania). Las muestras fueron preparadas con un recubrimiento de oro, con micrografías con magnificación 500X y 3000X, tensión de aceleración 10 kV, y distancia de trabajo entre 7,92 y 10,00 mm. El ensayo fue realizado en el Laboratorio de Bio y Materiales de la FPUNA.

3.1.3 *Luffa cylindrica*

La *L. cylindrica* (Figura 3.12) fue adquirida por compra directa de productores locales, y fue preparada en el Laboratorio de Ecomateriales del CIMA.



Figura 3.12: Muestra de *L. cylindrica* en su estado como adquirido.

Las esponjas de *L. cylindrica*, adquiridas sin cáscara, fueron cortadas manualmente con tijeras (Figura 3.13(a)), hasta obtener partículas de aproximadamente 1 cm^3 (Figura 3.13(b)). En esta etapa las semillas fueron removidas y descartadas. El método de corte manual con tijeras fue considerado un tanto ineficiente en términos de tiempo, pero tiene la ventaja de no requerir de maquinaria ni de habilidades especiales.



Figura 3.13: Preparación de la *L. cylindrica*: (a) como adquiridas y (b) esponjas en partículas.

Las partículas de *L. cylindrica* fueron separadas en tres partes, una de las partes fue utilizada en la condición *in natura* (LN), otra parte fue sometida a un tratamiento térmico con agua en ebullición (LA), y la tercera parte fue sometida a un tratamiento termoquímico con NaOH (LS), de acuerdo con los procedimientos explicados a continuación.

3.1.3.1 Tratamiento con agua corriente

Para el tratamiento de la *L. cylindrica* con agua corriente, fueron introducidos 30 g de LN en un recipiente conteniendo 5 l de agua corriente. Fue suministrado calor hasta alcanzar el punto de ebullición, el cual fue mantenido por 20 min, bajo agitación constante por medio de un bastón durante todo el proceso. Luego, la *L. cylindrica* fue enjuagada con agua corriente, y secada a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar peso constante. Este procedimiento fue adap-

tado de [90]. Las muestras tratadas con agua recibieron la denominación de LA.

El tratamiento con agua corriente no requirió de la compra de reactivos o insumos, y no fue necesario usar tapabocas y ventilación forzada como medidas de seguridad.

3.1.3.2 Tratamiento con NaOH

A su vez, para el tratamiento con solución básica de NaOH ($0,1 \text{ mol/l}$), fueron introducidos 30 g de LN en un recipiente conteniendo 5 l de la solución de NaOH. Fue suministrado calor hasta alcanzar el punto de ebullición (Figura 3.14), el cual fue mantenido por 20 min , bajo agitación constante con el auxilio de un bastón durante todo el proceso. Posteriormente, las fibras de *L. cylindrica* tratadas con NaOH fueron lavadas en agua destilada, requiriéndose entre 6 y 7 lavados de 2 l cada lavado, hasta lograr pH constante verificado con un pHmetro. El lavado fue hecho para retirar el exceso de la solución de tratamiento. Luego, las fibras tratadas fueron secadas a $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar peso constante. Este procedimiento fue adaptado de [72, 86, 92]. Las muestras tratadas con NaOH recibieron la denominación de LS.

El tratamiento con NaOH requirió de medidas de seguridad como el uso de tapabocas y la ventilación forzada del laboratorio, para no inhalar los gases durante la ebullición, además de la compra del NaOH.



Figura 3.14: Tratamiento de la *L. cylindrica* con solución de NaOH.

En la Figura 3.15 es mostrado el refuerzo de *L. cylindrica* luego del tratamiento con NaOH.



Figura 3.15: Muestra del refuerzo de *L. cylindrica* tratada con NaOH.

3.1.3.3 Microscopía óptica de la *L. cylindrica*

Uno de los medios para evaluar el estado de la *L. cylindrica* antes y después de los tratamientos superficiales fue la microscopía óptica (MO), en el Laboratorio de Bio y Materiales de la FPUNA. Las fibras de *L. cylindrica* fueron preliminarmente analizadas por MO, con el fin de comparar el aspecto de las fibras sin tratamiento y las fibras tratadas.

3.1.3.4 MEB y EDS de la *L. cylindrica*

La morfología superficial y la composición química de las fibras de *L. cylindrica*, antes y después de los tratamientos superficiales, fueron estudiadas por microscopía electrónica de barrido (MEB) con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS) (EVO15, Zeiss Company, Alemania), en el Laboratorio de Bio y Materiales de la FPUNA. El análisis por EDS fue realizado para obtener información sobre la composición química de la muestra. Las muestras fueron preparadas recubriéndolas con una fina capa de oro, con micrografías con magnificación 3000X, tensión de aceleración 20 kV y distancias de trabajo entre 11,9 y 12,8 mm.

3.1.3.5 Espectroscopía FTIR de la *L. cylindrica*

Los grupos funcionales fueron identificados por espectroscopía FTIR (Nicolet iS5, Thermo Scientific, USA), en el Laboratorio de Bio y Materiales de la

FPUNA. Para el análisis de las muestras se utilizó la técnica de pastillas con bromuro de potasio (KBr), dispersando 2 *mg* de cada muestra en 100*mg* de KBr, y luego compactando por 3 *min* a 80 *kN*. El registro de los espectros fue hecho en el rango 400-4000 *cm*⁻¹, con resolución de 4 *cm*⁻¹ y 128 barridos, a temperatura ambiente.

3.1.3.6 DRX de la *L. cylindrica*

Los espectros de DRX de las muestras fueron obtenidos con un difractómetro de rayos X con fuente CuK α (X'pert3 Powder, Malvern Panalytical, Países Bajos), en el Laboratorio de Bio y Materiales de la FPUNA, usando 40 kV y 35 mA, con rango de 2θ de 10 a 90°, tamaño de paso 0,01° y tiempo de paso 0,50 s. Los porcentajes de fase cristalina fueron calculados a partir de la relación entre las fases amorfas y cristalinas obtenidas por el análisis de DRX, con la ecuación 3.2:

$$CP_{DRX} = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 (\%) \quad (3.2)$$

en la cual, CP_{DRX} representa el grado de cristalinidad relativo, I_{002} es el área del pico de máxima intensidad (*u.a.*) que corresponde al plano cristalográfico (002) localizado entre los picos 21° y 24° y I_{am} es el área del halo de amorfismo de la difracción (*u.a.*) para $2\theta=18^\circ$, que corresponde a la fase amorfa de la *L. cylindrica*.

Además, la ecuación de Scherrer (Ec. 3.3) fue empleada para determinar el tamaño D de los cristales de las muestras LN, LA y LS:

$$D = \frac{K \times \lambda}{\beta \times \cos \theta} (nm) \quad (3.3)$$

en la cual, $K = 0,9$ es la constante de Scherrer, $\lambda = 0,15406$ (nm) es la longitud de onda de la fuente de rayos X, β en radianes es el ancho de banda a media altura (FWHM, por sus siglas en inglés, *Full Width at Half Maximun*), y θ es el ángulo de Bragg, también en radianes. La deconvolución de ajuste fue hecha primero restando el halo de difusión y luego aplicando la curva Gaussiana no lineal como función de forma (ecuación 3.4) utilizando

el software Origin Pro 2020.

$$y = y_0 + \frac{A}{\beta \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2}}} \times e^{-4 \ln 2 \frac{(x-x_c)^2}{\beta^2}} \quad (3.4)$$

en la cual, $A > 0$ es el área por encima de la curva, y_0 es la base, x_c el centro, y β el FWHM de cada pico.

3.2 Fabricación de los bloques

Para la fabricación, el PET, la *L. cylindrica* y el suelo fueron preparados según las explicaciones de los apartados 3.1.2 y 3.1.3. Además, así como el suelo, el cemento Portland (CP) fue adquirido por compra directa de depósitos de materiales de construcción, y acondicionado por tamizado manual para eliminar grumos.

3.2.1 Dosificación

Fueron fabricados once tipos diferentes de bloques, considerando las fracciones volumétricas aproximadas indicadas en la Tabla 3.1. Las cantidades indicadas en la Tabla 3.1 fueron tomadas como valores referenciales. La composición real en volumen presenta pequeñas diferencias debido a la precisión del instrumento de medición volumétrico (el vaso de precipitados) y a la dificultad de medir el volumen de las hojuelas de PET y las partículas de *L. cylindrica*. Para el código de identificación del tipo de bloque, fue adoptada la siguiente nomenclatura:

$$x P y L Z$$

siendo, xP e yL los porcentajes en volumen de PET y *L. cylindrica*, respectivamente; Z ($=N$, A , o S) según el estado o el tratamiento aplicado a las fibras de *luffa*. Cabe resaltar, también, que la identificación Z podrá estar ausente, en el caso de no utilización de la *L. cylindrica* en la preparación de los bloques.

Tabla 3.1: Código de identificación de los bloques, de acuerdo a la fracción volumétrica de sus constituyentes.

	Código del bloque	Suelo, vol%	CP, vol%	Hojuelas de PET, vol%	Partículas de <i>L. cylindrica</i> , vol%	Cantidad fabricada, unidades
1	0P0L	90	10	0	0	6
2	10P0L	80	10	10	0	6
3	7P3LN	80	10	7	3	6
4	7P3LA	80	10	7	3	6
5	7P3LS	80	10	7	3	6
6	3P7LN	80	10	3	7	6
7	3P7LA	80	10	3	7	6
8	3P7LS	80	10	3	7	6
9	0P10LN	80	10	0	10	6
10	0P10LA	80	10	0	10	6
11	0P10LS	80	10	0	10	6

El bloque tipo 0P0L es un bloque suelo-cemento, sin agregado, fabricado con fines comparativos. En los demás bloques, fueron mantenidas constantes las fracciones volumétricas del suelo y del CP en 80 y 10%, respectivamente, y el 10% restante corresponde a los agregados PET+*L. cylindrica*, siendo la proporción PET:*L. cylindrica* según el detalle de la Tabla 3.1.

Para cada tipo de bloque se fabricaron como mínimo seis ejemplares, previendo que para el ensayo de AA serían usados tres bloques y para el de RC otros tres.

3.2.2 Mezclado de la materia prima

Luego del acondicionamiento y de los tratamientos, las fracciones volumétricas para los diferentes tipos de bloques fueron medidas con un vaso de precipitados, con la dosificación de la Tabla 3.1.

En primer lugar, los materiales matriciales fueron mezclados mecánicamente en una mezcladora de cemento eléctrica de 130 l (Menegotti, Brasil), hasta lograr una coloración uniforme. Luego, gradualmente y según el caso, los agregados de PET y *L. cylindrica* fueron incorporados y mezclados hasta la homogeneidad. Posteriormente, con la mezcladora en funcionamiento,

la mezcla fue humectada suministrando agua continuamente por aspersión, hasta la adecuada humectación de los componentes. Sobre este punto, cabe resaltar que el porcentaje de humedad del suelo al momento de la fabricación fue desconocido, por lo que la cantidad de adecuada de agua agregada fue medida indirectamente. Para comprobar la humectación de la mezcla, una porción de la misma es extraída y apretada entre las manos. El punto de humectación adecuada es cuando una porción de mezcla queda con la marca de los dedos al ser apretada [34, 95], y, además, cuando la porción se deja caer desde 1,00 *m* de altura, esta se desmorona [34].

3.2.3 Moldeo, curado y producto final

Para moldear los bloques, la mezcla fue compactada con una prensa manual (EcoLadrillos Paraná, Paraguay) (Figura 3.16).



Figura 3.16: Fabricación de los bloques: (a) Prensa manual y (b) moldeo de los bloques.

Las dimensiones de la cámara del molde son, en promedio, 24 *cm* × 12 *cm* × 5,5 *cm*. Una determinada cantidad de masa m_{hum} , que fue mantenida constante, de modo a estandarizar las dimensiones del producto terminado, fue cargada en el molde de la máquina, con lo cual la densidad fue controlada [102]. La masa fue determinada por prueba y error, siendo elegida aquella para la cual el molde fue llenado en su totalidad produciendo una superficie del bloque suave, alcanzando el indicador de tope de la prensa sin que el operador fuerce el prensado.

Luego del desmoldeo, los bloques fueron mantenidos en reposo en el laboratorio a temperatura ambiente (Figura 3.17(a)) y curados por rociado manual de agua dos veces al día durante siete días. Al cabo de 28 días de la fabricación, fue obtenido el producto final (Figura 3.17(b)).



Figura 3.17: (a) Reposo y curado de bloques blandos y (b) producto final.

3.3 Caracterización de los bloques

En cuanto a los ensayos del producto final, la NBR 8491 [8] establece los requisitos de *AA* y de *RC* para bloques de suelo-cemento. Con el objetivo de ejecutar los ensayos de *AA* y de *RC* de los bloques con y sin refuerzo, fue usada como referencia la norma NBR 8492 [100]. Para la *RC*, fue adoptado el procedimiento de ensayo de la NBR 8492 [100] que es una compresión en estado saturado, pues los resultados establecen un límite inferior de *RC* logrado en condiciones de humectación controladas y fácilmente repetibles [103]. Además, aunque el procedimiento indicado en la NBR 8492 [100] es especificado para bloques de suelo-cemento, sirve como una referencia que puede ser aplicada en materiales compuestos [13].

3.3.1 Ensayo de absorción de agua

El ensayo de absorción de agua (*AA*) fue hecho en el Laboratorio de Ecomateriales del CIMA. Luego del proceso de curado, fueron tomados tres ejemplares

de cada tipo de bloque para la realización del ensayo de AA . Inicialmente, los bloques fueron pesados en estado seco para obtener la masa seca m_{sec} .

Para el pesado en seco, la NBR 8492 [100] establece que los cuerpos de prueba deben ser secados en estufa entre 105 y 110 °C, hasta masa constante. En el presente trabajo, las muestras no pasaron por este proceso de secado debido a que los agregados utilizados, el PET y la *L. cylindrica*, sufren descomposición en este rango de temperaturas. En cuanto al PET, su temperatura de transición vítrea puede estar entre 71 y 85 °C, dependiendo de su estado de envejecimiento [104]. Por su parte, la *L. cylindrica* tiene pérdida de agua a 100 °C [72, 83, 87].

Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente hasta obtener una masa constante m_{sec} . Luego del pesado en estado seco, los bloques fueron sumergidos completamente en agua por 24 h (Figura 3.18) y vueltos a pesar en estado saturado para obtener la masa saturada m_{sat} .



Figura 3.18: Bloques sumergidos completamente para el ensayo de absorción de agua.

La absorción de agua AA fue calculada aplicando la ecuación 3.5:

$$AA = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sec}} \times 100 (\%) \quad (3.5)$$

La NBR 8491 [8] establece que la absorción de agua de los bloques no debe exceder 20%.

3.3.2 Ensayo de resistencia a la compresión

Los tres ejemplares restantes de cada tipo de bloque fueron preparados para el ensayo de resistencia a la compresión (RC) siguiendo los pasos indicados en la NBR 8492 [100] (Figura 3.19(a) y (b)). El ensayo de RC fue realizado en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la FIUNA.



Figura 3.19: Preparación de las probetas para el ensayo de compresión: (a) bloque cortado, y (b) probetas terminadas.

Luego de que las probetas hayan estado sumergidas por 24 h , fueron extraídas de la pileta y secadas superficialmente con papel absorbente. Las medidas l y a del área resistente $A = l \times a$ de cada probeta (Figura 3.20) fueron tomadas y registradas y sometidas a al ensayo de compresión.

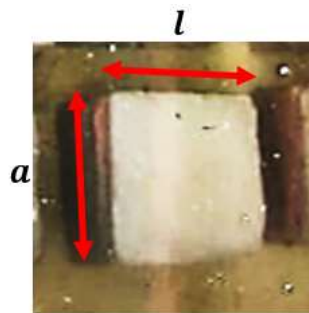


Figura 3.20: Dimensiones del área resistente de la probeta.

La RC fue calculada por medio de la ecuación 3.6, que es el cociente entre la máxima fuerza F_{max} soportada por la probeta medida durante el ensayo de compresión, y el área resistente A , es decir:

$$RC = \frac{F_{max}}{A} (MPa) \quad (3.6)$$

La NBR 8491 [8] establece que la RC media de probetas ensayadas según la NBR 8492 [100] no debe ser menor a 2,00 MPa , e individualmente una probeta no debe presentar una resistencia a la compresión menor a 1,70 MPa .

3.3.3 Otros ensayos

Otros ensayos realizados incluyen la observación de la interfaz matriz-refuerzo con una lupa estereoscópica (Pantec, Brasil), de modo a evaluar la adhesión matriz-refuerzo de PET.

Las muestras para los ensayos de observación con lupa estereoscópica en un tamaño de aproximadamente 1 cm^3 (Figura 3.21(a)) fueron extraídas con una amoladora, y luego fueron empotradas en resina en frío (Figura 3.21(b) y (c)). Las mismas también pasaron por un proceso de lijamiento de modo a eliminar el exceso de resina de la superficie a ser analizada (Figura 3.21(d)).

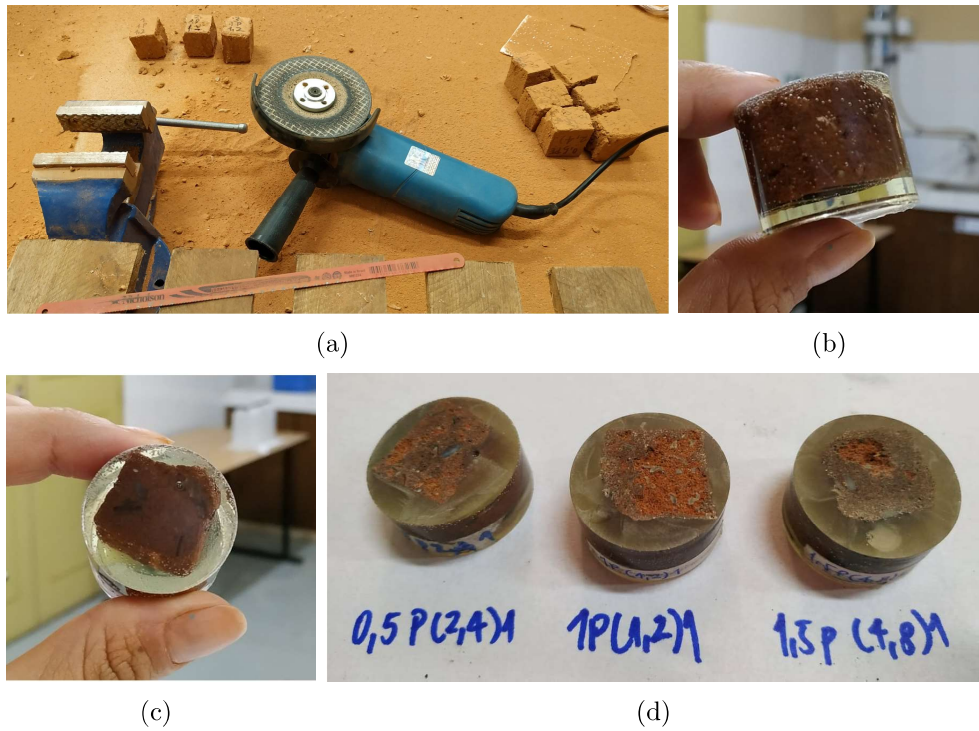


Figura 3.21: Preparación de muestras para observación con lupa: (a) extracción de la muestra, (b) y (c) muestra encapsulada, y (d) muestra encapsulada con pulido en la cara superior.

Este ensayo fue hecho para bloques reforzados únicamente con PET, pues para los bloques con contenido de PET+*L. cylindrica* no fue posible obtener muestras adecuadas. En pruebas preliminares para extraer muestras de bloques con PET+*L. cylindrica*, fue comprobado que las fibras de *L. cylindrica* no eran cortadas, sino que eran arrancadas por la amoladora.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

En este capítulo son expuestos y discutidos los resultados experimentales de los ensayos realizados al suelo, al PET, a la *L. cylindrica*, y al producto final. Las propiedades del producto final son evaluadas usando como referencia los requisitos establecidos en la NBR 8491 [8].

4.1 Preparación y caracterización de los componentes de los bloques

4.1.1 Suelo

Fue observado que, dependiendo del proveedor, hay una considerable diferencia en el estado del suelo como comprado. En un caso particular, los terrones eran notoriamente grandes y difíciles de desmoronar con el molino de tierra, por lo que hubo mayor desperdicio.

Con los ensayos de caracterización fue posible clasificar el suelo a ser empleado, y de esta forma, elegir el estabilizante adecuado y su proporción en la mezcla.

4.1.1.1 Granulometría por tamizado y sedimentación y límites de Atterberg

A partir del tamizado y del ensayo de sedimentación, fue obtenida la curva de distribución de tamaños de grano (Figura 4.1).

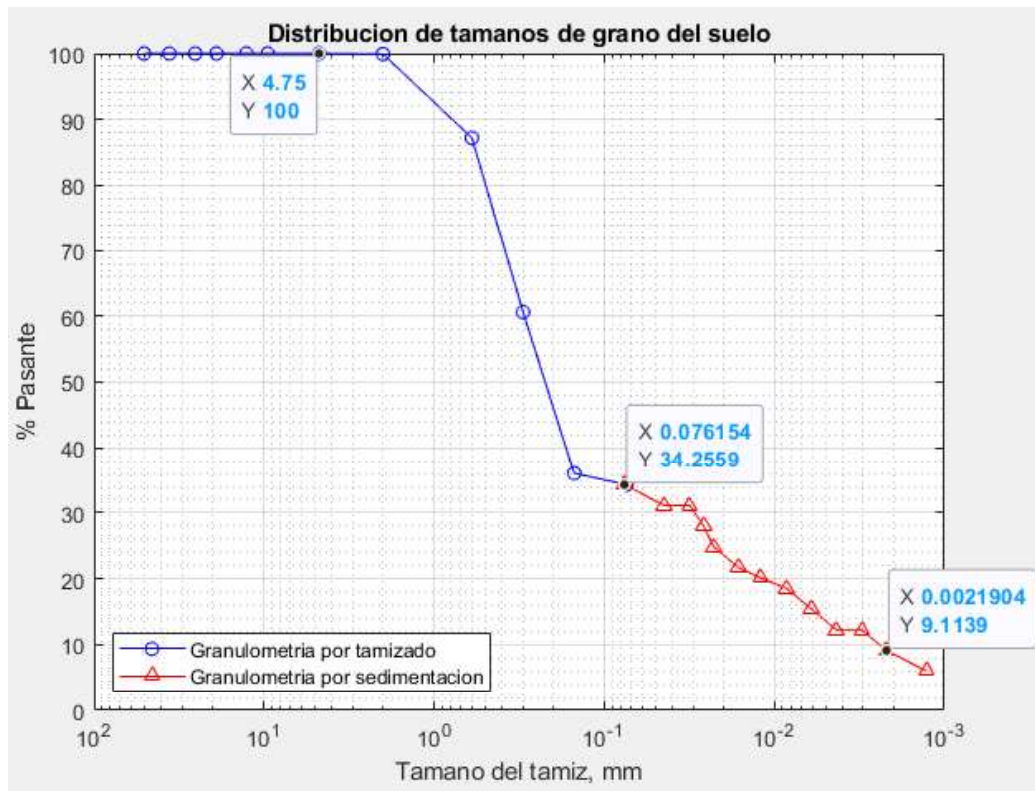


Figura 4.1: Distribución de tamaños de grano del suelo empleado como matriz, indicando puntos notables.

De la curva y de la composición granulométrica del suelo empleado, verifícase que hay 65,74% de arena (partículas con tamaño de grano de 2 a 0,075 mm), 25,15% de limo (partículas con tamaño de grano de 0,075 a 0,002 mm), y 9,11% de arcilla (partículas con tamaño de grano inferior a 0,002mm), como indica en la Figura 4.1.

En cuanto los valores notables de la curva granulométrica y los límites de Atterberg, fueron obtenidos los valores indicados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resumen de propiedades importantes del suelo en estudio.

Pasante tamiz No. 4, %	100,00
Pasante tamiz No. 200, %	34,25
LL , %	17
LP , %	14
IP , %	3

Considerando el resumen de la Tabla 4.1 y los requisitos de la NBR 10833 [99], citados en el apartado 3.1.1, el suelo es apto para la fabricación de bloques según la norma mencionada.

4.1.1.2 Clasificación del suelo y selección del estabilizante

Los resultados indicados en la Tabla 4.1 permitieron clasificar el suelo en estudio de acuerdo a la ASTM D2487 [?], según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, por sus siglas en inglés), usando la Figura 3.7 y otros criterios de la norma mencionada. Podemos decir que el suelo empleado se encuadra como un **suelo de grano grueso con finos o arena limosa**, y recibe la denominación de **suelo tipo SM**. De acuerdo a Venkatarama Reddy y Gupta [102], los suelos arenosos son los más adecuados para fabricar bloques estabilizados con 6% a 10% de cemento, si los mismos estarán bajo cargamento. Esto fue verificado con la utilización de la Figura 3.8.

En la Figura 3.8 está indicada una restricción para el uso de cemento Portland (CP) como estabilizante del suelo tipo tipo SM. Esta restricción se basa en un índice de plasticidad de referencia (IP_{ref}) dado por:

$$IP_{ref} = 20 + \frac{50 - \%pasa200}{4}$$

El CP puede usarse como estabilizante para un suelo SM si se cumple que $IP < IP_{ref}$. Para el caso del suelo en estudio, el IP_{ref} es:

$$IP_{ref} = 20 + \frac{50 - 34,25}{4} = 24$$

Considerando que el IP del suelo en estudio es igual a 3, se concluye

que el cemento Portland es su estabilizante adecuado. Para determinar la proporción inicial de estabilizante, fue usada la Figura 4.2.

Clasificación del suelo	Requisito estimado inicial de cemento, porcentaje en peso seco
GW-SW	5
GP, SW-SM, SW-SC, SW-GM, SW-GC	6
GM, SM, GC, SC, SP-SM, SP-SC, GP-GM, GP-GC, SM-SC, GM-GC	7
SP, CL, ML, ML-CL	10
MH, OH	11
CH	10

Figura 4.2: Requisitos estimados de cemento para diversos tipos de suelo.
Fuente: [35].

De la Figura 4.2, para el suelo tipo SM el requisito inicial del cemento es de 7% en peso. En la presente investigación fue empleado un porcentaje en volumen de CP de 10%, que equivale a un 8% en peso.

4.1.1.3 DRX del suelo

Los resultados de la caracterización del suelo por DRX son presentados en los difractogramas de la Figura 4.3. Es posible verificar que no hay diferencias entre el suelo como comprado y el suelo tamizado, lo que significa que el suelo no contenía contaminantes como material orgánico, plásticos, piedras y otros.

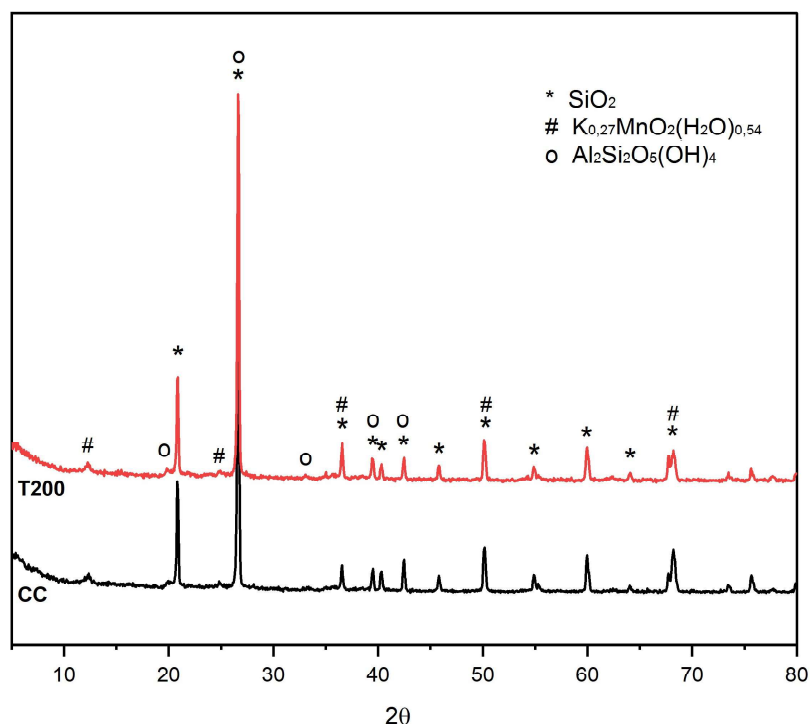


Figura 4.3: Difractogramas del suelo en estado como comprado (CC-negro) y pasante tamiz No. 200 o finos (T200-rojo), con los picos de cuarzo (SiO_2) como fase principal, y los picos de birnesita de potasio ($K_{0,27}MnO_2(H_2O)_{0,54}$) y caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) como fases secundarias.

Las muestras de suelo como comprada y pasante tamiz No. 200 presentaron como fase principal el óxido de silicio (SiO_2), como fase secundaria un mineral de dióxido de manganeso hidratado llamado birnesita de potasio o K-birnesita ($K_{0,27}MnO_2(H_2O)_{0,54}$). Adicionalmente, en la muestra pasante tamiz No. 200 también pudo ser observada la presencia de un silicato de aluminio hidratado conocido como caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) en baja concentración.

4.1.2 Estabilizante - Cemento

El cemento utilizado como estabilizante fue adquirido por compra directa de depósitos de materiales de construcción locales. Fue empleado un tipo

de cemento Portland compuesto denominado CPII - C32, recomendado para ser usado en elementos estructurales prefabricados. Este cemento tiene una composición de 79 - 65% de clínker más yeso (sulfato de calcio), y entre 21 - 35% de por lo menos dos aditivos como *filler* calcáreo, escoria granulada de alto horno, o puzolana [105].

4.1.3 PET

4.1.3.1 MEB del PET

Las micrografías de la Figura 4.4 muestran la morfología de las hojuelas de PET antes y después del proceso de triturado.

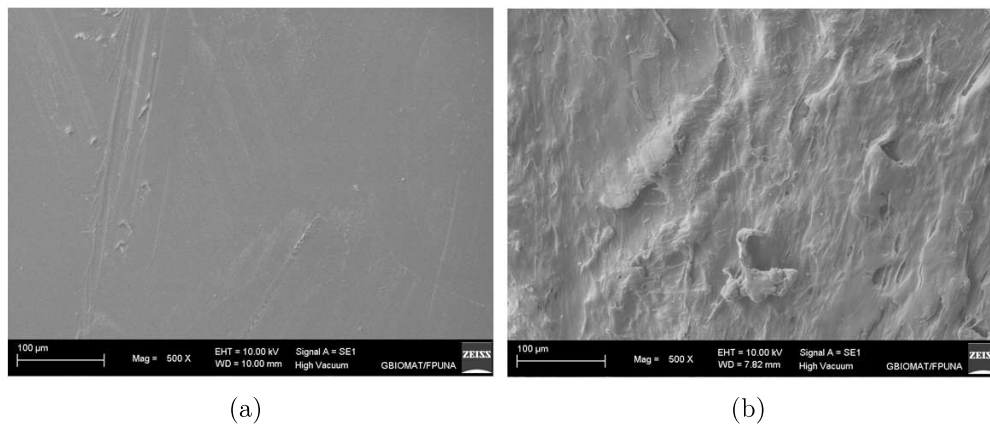


Figura 4.4: Imágenes MEB del PET: (a) antes del triturado, y (b) después del triturado.

La muestra de PET antes del triturado (Figura 4.4(a)) presentó una superficie lisa y suave, con algunos raspones que pueden deberse al manejo de las botellas durante su vida útil. Las muestras de PET trituradas (Figura 4.4(b)) presentaron una notable alteración superficial. El triturado por impacto de las botellas propició la formación de una rugosidad beneficiosa desde el punto de vista de la unión mecánica. En comparación con otros trabajos en los que luego del corte de las botellas fueron aplicados tratamientos mecánicos y químicos [3] o térmicos [55] para mejorar la unión interfacial, el proceso de triturado aplicado en la presente investigación fue

eficiente teniendo en cuenta tiempos y costos de procesamiento. Esto se debe a que, en una sola etapa, fueron logrados el corte y la alteración superficial de las hojuelas.

4.1.4 *Luffa cylindrica*

Durante el proceso de corte fue estudiada la estructura jerárquica de las esponjas, y fue observado que la *L. cylindrica* es un material de celdas abiertas, con una estructura de andamio aleatoria y geométricamente compleja. Las fibras están fuertemente interconectadas, y tienen diferentes longitudes, orientaciones y diámetros, dependiendo de la región en que se encuentren.

La posición 1 de la Figura 4.5 muestra un corte transversal que exhibe la región central, donde las fibras son más rígidas y las celdas tienen diversas formas y tamaños. Un corte longitudinal, correspondiente a la posición 2 de la Figura 4.5, muestra una estructura intermedia en la que las celdas son de un tamaño mayor comparadas con las de las demás posiciones. La parte exterior de la esponja tiene el aspecto de una estera o manta, cuya cara interior, mostrada en la posición 3 de la Figura 4.5, presenta una distribución de fibras altamente orientadas en dirección longitudinal y unas celdas más pequeñas que las de las otras posiciones. Finalmente, la cara externa, indicada por la posición 4 de la Figura 4.5, tiene una configuración similar a la de la posición 1 con relación a los tamaños y formas de las celdas, pero es mucho más flexible. Las características descritas proporcionan a la esponja una estructura anisotrópica. Estas observaciones concuerdan con lo reportado por Tanobe et al. [72], Chen et al. [78], y An et al. [106].

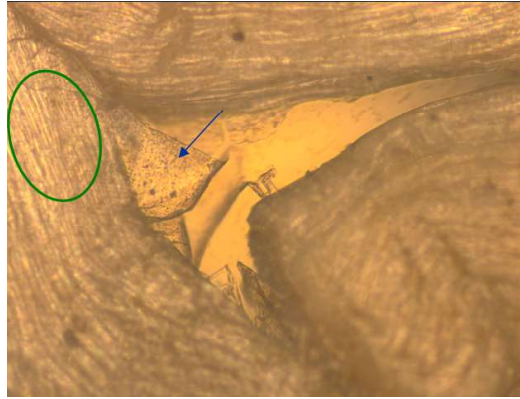
Las regiones descritas no fueron discriminadas para su uso como agregado, fueron usadas indistintamente.



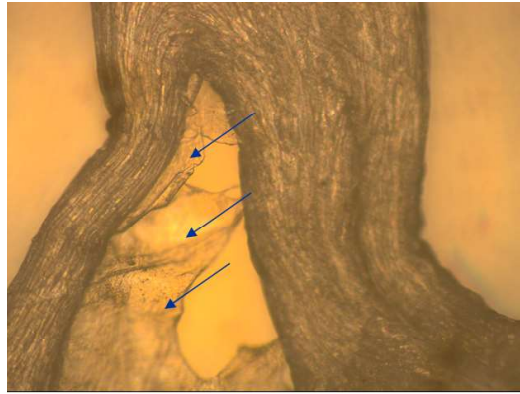
Figura 4.5: Estructura de fibras interconectadas de la *L. cylindrica*.

4.1.4.1 Microscopía óptica de la *L. cylindrica*

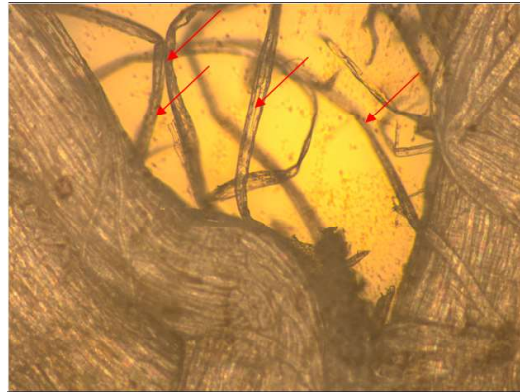
La Figura 4.6 muestra las imágenes de MO de las fibras estudiadas. Las fibras tipo LN (Figura 4.6(a)) presentan una superficie rugosa y membranas que posiblemente sean de lignina. A su vez, las fibras tipo LA (Figura 4.6(b)) presentan membranas de lignina sin alteraciones considerables. Por su parte, las fibras tipo LS (Figura 4.6(c)) exhiben una notoria alteración con ausencia de la membrana identificada en las muestras al natural y tratadas con agua, que adquirió un aspecto de pelos. Esto sugiere que el tratamiento con NaOH es más agresivo que el tratamiento con agua, y produce alteraciones importantes en la morfología superficial, lo que debe confirmarse con la MEB.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6: Imágenes de microscopía óptica de la *L. cylindrica*: (a) *in natura* - LN, (b) tratada con agua - LA, y (c) tratada con NaOH - LS. Círculo verde - rugosidad superficial; flecha azul - membrana sin alteraciones; flecha roja - membrana destruida. Imágenes sin escala.

4.1.4.2 MEB y EDS de la *L. cylindrica*

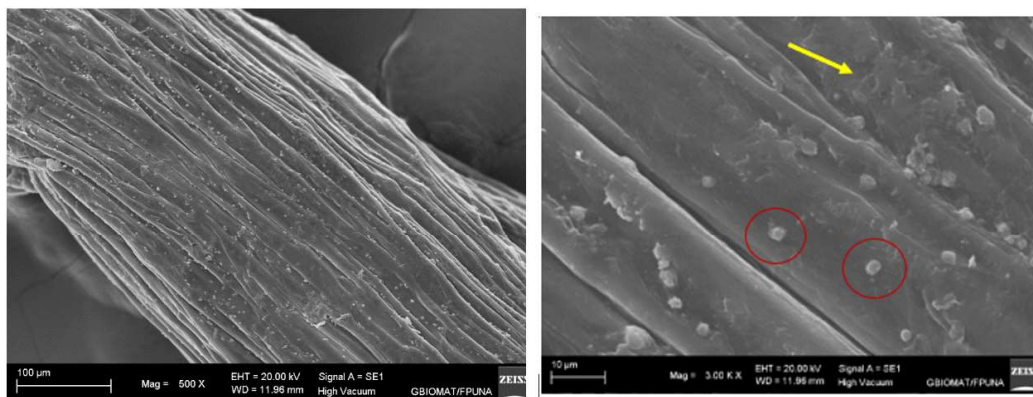
Los resultados obtenidos por MEB y EDS, imágenes y composición química, son mostrados en la Figura 4.7 y en la Tabla 4.2, respectivamente.

La Figura 4.7 muestra la morfología de las fibras de *L. cylindrica*, sin tratamiento y con tratamiento, obtenidas por el análisis por MEB. La LN (Figura 4.7(a)), presenta pequeñas partículas incrustadas (círculos rojos) y membranas (flecha amarilla) que podrían ser las sustancias cerosas y gomosas descritas por Tserki et al. [64] y Ghali et al. [85].

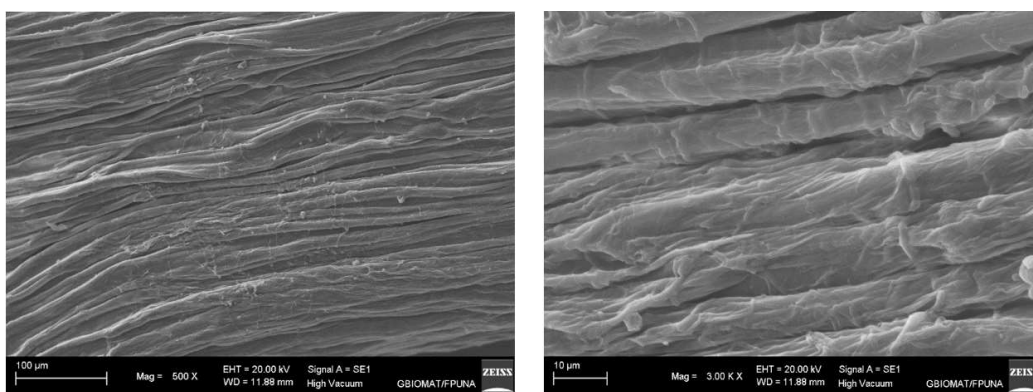
La Figura 4.7(b) presenta la micrografía de la muestra LA. La superficie de la muestra LA presenta una morfología más limpia y suavizada que la morfología de la LN debido a la remoción ligera de la lignina y la hemicelulosa, y es posible ver más claramente el manojito de microfibras que forman la fibra principal macroscópica de la *L. cylindrica*. Además, todavía hay partículas incrustadas remanentes. Considerando la Figura 4.8, que corresponde a la LN, estas partículas presentan una intensa concentración de calcio, que podría estar en la forma de carbonato de calcio. Es probable que la *L. cylindrica* tenga la capacidad natural de formar precipitados de calcio en su superficie. Esta propiedad podría posicionar a la *L. cylindrica* como una prometedora materia prima para aplicaciones biomédicas y ambientales.

La Figura 4.7(c) presenta la morfología superficial de la muestra LS, que exhibe una superficie incluso más suavizada, con menos estriaciones y una apariencia más pulida. En la muestra LS, la fibra no tiene la apariencia de estar compuesta por un aglomerado de varias fibrillas individuales, como ocurre con la muestra LA debido a la hinchazón causada por la absorción de agua. En contraposición, la superficie de la muestra LS tiene el aspecto de grupos de fibras coalescentes.

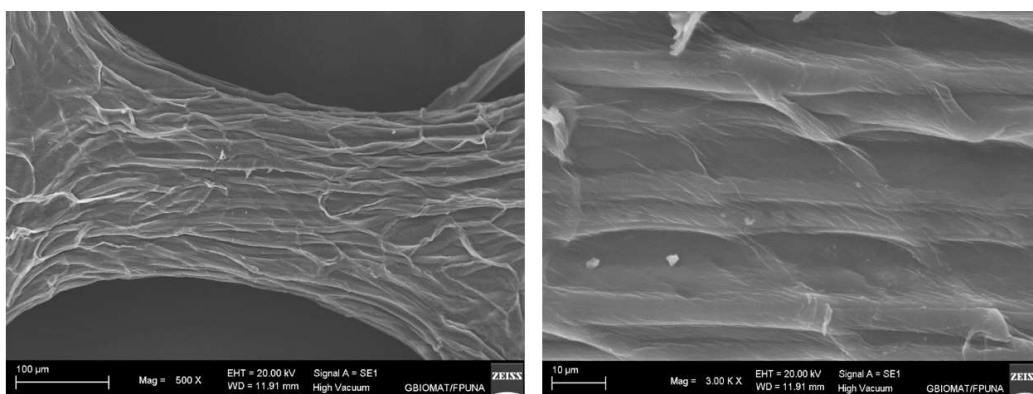
Teniendo en cuenta el aspecto de las fibras en los tres estados considerados, los resultados de MEB corroboran los resultados de MO en cuanto a la mayor agresividad del tratamiento con NaOH. Por otra parte, si bien las imágenes por MO no fueron concluyentes para manifestar las diferencias de rugosidad superficial entre las tres muestras, el ensayo por MEB efectivamente probó que el tratamiento con NaOH produjo una superficie



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7: Imágenes MEB de fibras de *L. cylindrica*: (a) sin tratamiento – LN, y tratadas térmicamente con (b) agua corriente – LA, y (c) solución de NaOH – LS. Círculos rojos – partículas de calcio; flecha amarilla – sustancias cerosas y gomosas.

notoriamente más lisa que en los otros dos casos.

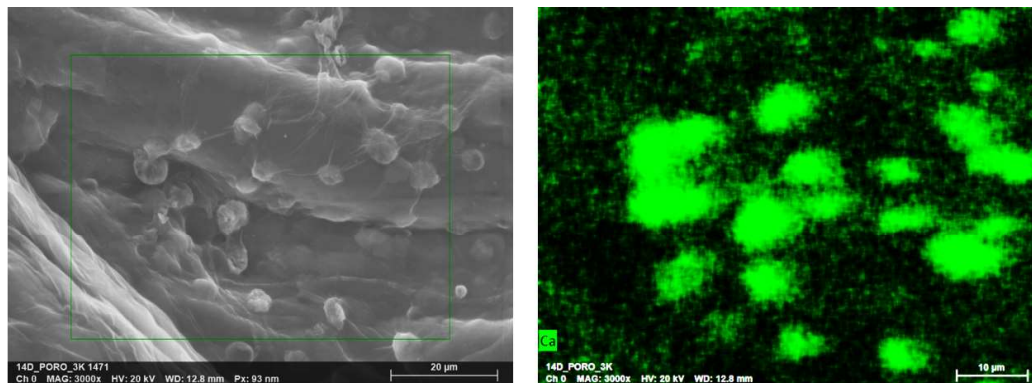


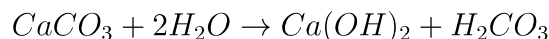
Figura 4.8: Resultados de (a) MEB de la superficie y (b) mapeo de calcio por EDS de una muestra de LN.

Tabla 4.2: Composición química de la *L. cylindrica* natural - LN, tratada con agua - LA y tratada con NaOH - LS.

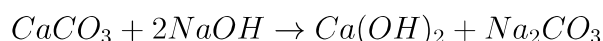
Elemento	LN	LA	LS
Composición química, wt%			
C	54,90	62,94	58,13
O	38,78	35,98	41,21
Ca	3,70	0,62	0,57
K	2,83	0,21	0,09
Otros	0,42	0,25	0,00

La Tabla 4.2 muestra los resultados del análisis elemental cuantitativo relativo. Los elementos encontrados en mayor proporción en todas las muestras son el carbono y el oxígeno, siendo el porcentaje de C+O igual a 93,68% para la muestra LN, 98,92% para la muestra LA y 99,34% para la muestra LS. Esto permite apreciar que las reacciones debidas a los tratamientos aplicados propiciaron la disminución porcentual del contenido de calcio, potasio y otros elementos.

Asumiendo que el calcio detectado se encuentra en forma de carbonato de calcio (CaCO_3), con el tratamiento con agua pudo haberse dado una reacción en la que ocurre la formación de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y ácido carbónico (H_2CO_3), representada por:



A su vez, aplicando el tratamiento con NaOH, pudo haberse dado una reacción con formación de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) y carbonato de sodio (Na_2CO_3), representada por:



En ambas reacciones ocurre la formación de hidróxido de calcio, que pudo haber sido eliminado al realizar el lavado de las fibras posterior al tratamiento, por ser un precipitado. Esto explicaría la disminución del contenido de calcio en las muestras LA y LS. Además, la proporción ligeramente menor de calcio en la muestra LS comparada con la LA podría deberse a que el carbonato de calcio es menos soluble en agua que en NaOH. El menor contenido de calcio en la muestra LS corrobora los resultados de MEB (Figura 4.7(c)), pues la muestra LS tiene una morfología superficial con menos incrustaciones.

Otra observación importante de este análisis elemental es que la proporción de carbono es mayor en la muestra LA. Tanto en la muestra LA como en la muestra LS, el contenido porcentual de carbono aumenta con respecto a la muestra LN porque el mismo no es eliminado en cantidades importantes por los tratamientos, como ocurre con los demás elementos. Entonces, al disminuir el contenido relativo de los elementos secundarios, aumenta el de carbono.

Una hipótesis que explicaría la mayor proporción de carbono en la muestra LA es que fue usada agua de grifo, tanto en el tratamiento como en el lavado posterior, con la intención de representar las posibles condiciones de fabricación de un pequeño productor de bloques. No fue determinada la composición del agua de grifo empleada, pero es posible que la misma tenga altos porcentajes de carbonatos que pudieron haberse depositado en la muestra LA.

Cuando una fibra será usada como refuerzo en un compuesto, la morfología superficial en conjunto con la composición química, son determinantes

a la hora de la aplicación en una determinada matriz. La rugosidad superficial de las fibras está directamente relacionada a una unión mecánica fibra-matriz, y la composición química podría afectar a la afinidad química. En compuestos de matrices poliméricas y de matrices metálicas, es deseable tener tanto una unión química como mecánica, mientras que en compuestos de matrices cerámicas es preferible principalmente una unión mecánica [29]. En consecuencia, fibras tipo LN o LA podrían ser usadas como refuerzo de matrices cerámicas o matrices poliméricas, mientras que las fibras tipo LS serían convenientes para una matriz con afinidad química, pues esta superficie no proporciona agarre mecánico.

4.1.4.3 Espectroscopía FTIR de la *L. cylindrica*

La Figura 4.9 presenta los espectros de FTIR con las bandas de frecuencia vibracional de las fibras de *L. cylindrica* en los estados LN, LA y LS. Todas las bandas encontradas fueron reportadas en la literatura. No obstante, pequeñas diferencias son observadas, pues la composición de la *L. cylindrica* depende de varios parámetros, como su especie y variedad, el tipo de suelo en que fue cultivada, las condiciones climáticas, la edad de la planta, y otros [72].

La Figura 4.9 muestra que los cambios más significativos son encontrados alrededor de las bandas 3402 cm^{-1} relacionada con el enlace de estiramiento -OH [83, 88], 2920 cm^{-1} relacionada con los enlaces -CH₂ asimétrico y -CH₃ simétrico [88, 107–109], 1735 cm^{-1} relacionada con el enlace de estiramiento C=O [83], 1640 cm^{-1} relacionada con el enlace de flexión O-H [88], y 1047 cm^{-1} relacionada con el estiramiento C-O [110].

Las bandas entre 3600 y 3000 cm^{-1} corresponden al hidroxilo OH del grupo -OH vinculado por hidrógeno. Estas bandas pueden corresponder tanto a la celulosa I como a la celulosa II [110].

Las bandas en torno a 3402 y 1640 cm^{-1} son más prominentes en la muestra LA, en comparación con lo observado para las muestras LN y LS, debido al carácter hidrofílico de la *L. cylindrica*. Estas bandas también podrían corresponder a bandas de absorción, pues, de acuerdo a Nagarajaganesh y

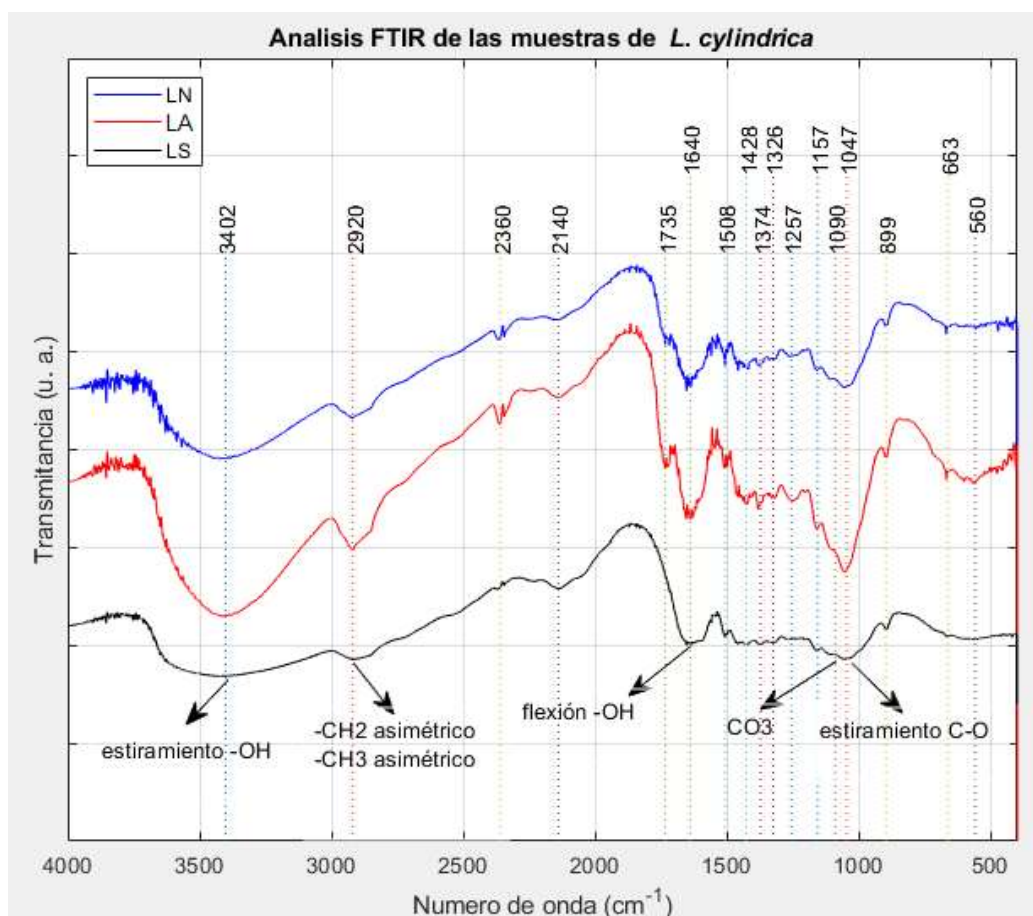


Figura 4.9: Espectros FTIR de las muestras de *L. cylindrica* (a) sin tratamiento – LN, (b) tratada con agua en ebullición – LA, y (c) tratada con solución de NaOH – LS.

Muralikannan [88], las bandas ubicadas entre $1600\text{--}1640\text{ cm}^{-1}$ están probablemente relacionadas al agua absorbida en la fase cristalina de la celulosa. Estas bandas están asociadas a las vibraciones de estiramiento y flexión, respectivamente. Además, la presencia de la banda a 3402 cm^{-1} , cerca de la banda a 3405 cm^{-1} podría indicar la presencia de celulosa I.

La banda alrededor de 2917 cm^{-1} puede atribuirse a las vibraciones de estiramiento asimétricas (CH_2) y simétricas (CH_3) [88, 107, 108]. De acuerdo a Parida et al. [109], esta banda está relacionada a los grupos metil y metileno de la celulosa en la fibra. En el presente trabajo, la banda a 2917 cm^{-1} está relacionada a la estructura de la celulosa I. No fueron encontradas

bandas correspondientes a la estructura de la celulosa II.

Las bandas alrededor de 1734 y 1643 cm^{-1} son atribuidas a las fases de hemicelulosa (estiramiento $\text{C}=\text{O}$) y celulosa (flexión OH), respectivamente. En este trabajo, es probable que la banda en torno a 1643 cm^{-1} esté también asociada al agua absorbida [72], pues la intensidad de esta banda aumentó con el tratamiento con agua en ebullición. La banda en torno a 1047 cm^{-1} probablemente esté más relacionada al grupo C-OH que al C-C o al C-H [110], pues su aumento es más significativo en las muestras tratadas con agua que en las otras muestras. Luego del tratamiento con NaOH , las bandas de 1640 y 1047 cm^{-1} disminuyeron drásticamente.

De acuerdo a Fan et al. [110], la banda a 899 cm^{-1} es atribuida al anillo desfasado no simétrico. Esta banda probablemente está asociada al modo de estiramiento en fase simétrico de la estructura de la lignina [88], y la banda a 897 cm^{-1} asignada a la región amorfa de la celulosa [111]. Por otra parte, la banda a 896 cm^{-1} está asociada con la vibración de frecuencia en la celulosa I cristalina y cambia a 893 cm^{-1} en la celulosa II cuando los materiales celulósicos son tratados con NaOH /tiourea/urea [112]. Es probable que la banda a 899 cm^{-1} esté más fuertemente asociada a la presencia de la celulosa I antes que a la estructura de la lignina, pues las bandas relacionadas a la estructura de la lignina, en torno a $1579\text{-}1519\text{ cm}^{-1}$ y 1143 cm^{-1} [88], y las bandas a 1627 y 1635 cm^{-1} reportadas por Quinayá y D'almeida [113] desaparecen con el tratamiento con NaOH .

4.1.4.4 DRX de la *L. cylindrica*

Las Figuras 4.10, 4.11, y 4.12 corresponden a los difractogramas de rayos X para las muestras de *L. cylindrica* sin tratamiento, tratada con agua en ebullición y tratada con solución NaOH ($0,1\text{ mol/l}$), respectivamente. Además, para las muestras sin y con tratamiento, fue realizada la deconvolución de los espectros de DRX con el fin de identificar los picos superpuestos en los espectros de modo a identificar las fases remanentes.

Las Figuras 4.10, 4.11, y 4.12 muestran los picos más significativos correspondientes a las fases amorfas y cristalinas de las muestras, para 2θ en

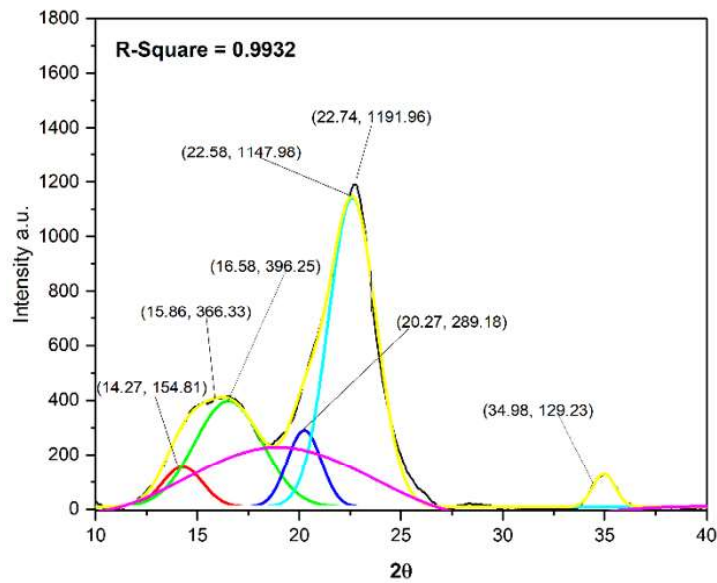


Figura 4.10: Espectros DRX de *L. cylindrica* sin tratamiento – LN. Curva negra - curva experimental; amarilla - sumatoria de los picos; fucsia - celulosa amorfa; cian, roja, azul y verde - celulosa cristalina.

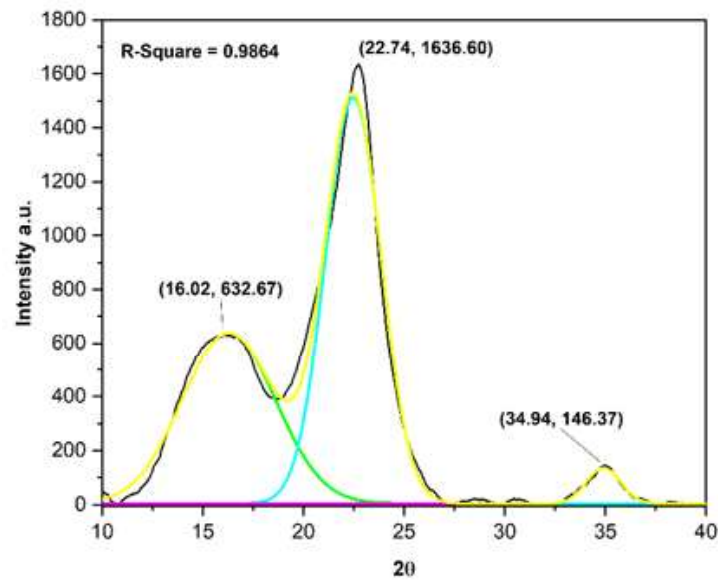


Figura 4.11: Espectros DRX de *L. cylindrica* tratada con agua en ebullición – LA. Curva negra - curva experimental; amarilla - sumatoria de los picos; fucsia - celulosa amorfa; cian, roja, azul y verde - celulosa cristalina.

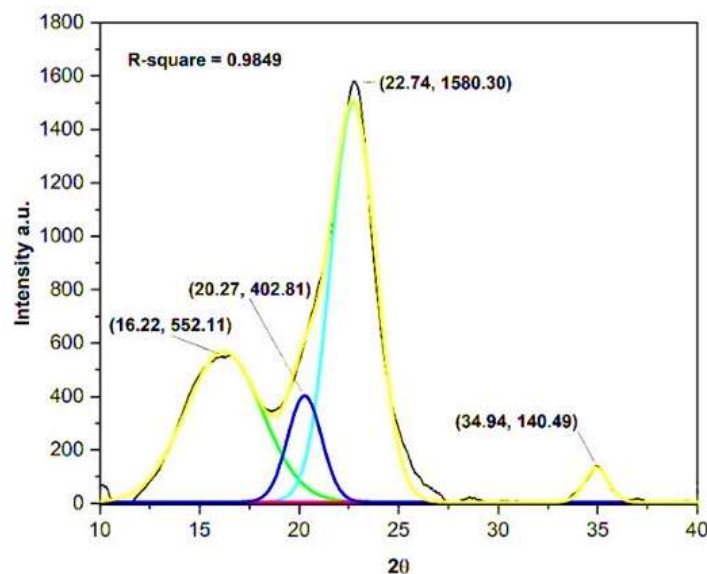


Figura 4.12: Espectros DRX de *L. cylindrica* tratada con NaOH - LS. Curva negra - curva experimental; amarilla - sumatoria de los picos; fucsia - celulosa amorfa; cian, roja, azul y verde - celulosa cristalina.

torno a 16 y 22°. Además, presenta la deconvolución (Figura 4.10), con la línea de base sustraída, lo que identifica los picos superpuestos de las regiones amorfas y cristalinas para 2θ en torno a 14, 16, 20, 22 y 34°. Los picos se encuentran alrededor de 15,1, 16,4, 22,4 y 34,4°, correspondientes al polimorfo cristalino I de la celulosa [64]. Particularmente, 15,1 y 16,4° corresponden a los planos cristalográficos (1 $\bar{1}$ 0) y (110), respectivamente. Estos presentan un gran contenido de productos amorfos como hemicelulosa, lignina y celulosa amorfa. Los picos ajustados por la deconvolución a 14,27° (1 $\bar{1}$ 0) y 20,27° (100) están asociados a la celulosa I y a la celulosa II [110, 113, 114]. La mínima intensidad del pico a 20,27° podría indicar la presencia de celulosa II. Este contenido mínimo concuerda con los resultados de FTIR pues no fueron encontradas bandas de otros tipos de celulosa, solo de la celulosa I. El otro pico, cerca de 34° (023), también está asociado al plano cristalográfico de la celulosa I [64].

Los índices de cristalinidad CP_{DRX} son 69,27, 61,39 y 65,04% para la LN, la LA y la LS, respectivamente. Es posible verificar que los métodos de tratamiento aplicados producen una disminución de la cristalinidad, y que los

cambios ocurren tanto en la fase cristalina como en la amorfa de la celulosa. Esta disminución de cristalinidad puede estar asociada a la eliminación de los compuestos de calcio. La cristalinidad de la muestra LS es mayor que la de la muestra LA debido, probablemente, a la eliminación de las estructuras de hemicelulosa y lignina por hidrolización, lo que reduce la región amorfa.

Con relación al tamaño de cristal, es posible verificar que hay una relación directa entre la cristalinidad y el tamaño de cristal para las muestras LA y LS. Como la muestra LS tiene mayor cristalinidad, tiene un mayor tamaño de cristal $D_{LS} = 2,34 \text{ nm}$, en comparación con la muestra LA para la cual $D_{LA} = 2,17 \text{ nm}$. De acuerdo a Gong et al. [114], la celulosa con menor cristalinidad podría tener menor tamaño de cristal en las regiones cristalinas.

En cuanto a la cristalinidad encontrada en la literatura, Guimaraes et al. [83] obtuvieron un valor de 50% para la *L. cylindrica* sin tratamiento. Por su parte, Tanobe et al. [72] reportaron un incremento de la misma luego del tratamiento de 59,1% (natural) a 62,9% (tratada con NaOH), aunque mencionaron que los resultados tal vez no sean significativos.

4.2 Fabricación de los bloques

Las particularidades observadas durante la fabricación son expuestas a continuación.

4.2.1 Mezclado de la materia prima

La etapa de humectación fue la más larga, y requirió de control constante para lograr la humectación adecuada. Además, fue observado que si la mezcladora seguía en funcionamiento una vez alcanzada la humectación correcta, empezaban a formarse grumos o nódulos (Figura 4.13(a) y (b)) lo que también fue reportado por Lima et al. [70]. El tamaño de los nódulos aumentaba con el tiempo de mezclado, y si éstos alcanzaban un diámetro de 1 *cm* o más, dificultaban un moldeado homogéneo del bloque pues actuaban como porciones independientes de material, no fluían plásticamente para adquirir la forma del molde y constituir un sólido continuo. Esto propiciaba la formación

de porosidad indeseada que consecuentemente conllevaba a una reducción del rendimiento mecánico. Los nódulos pequeños como los de la Figura 4.13(c), de tamaño inferior a 0,5 *cm* de diámetro, eran prensados adecuadamente.

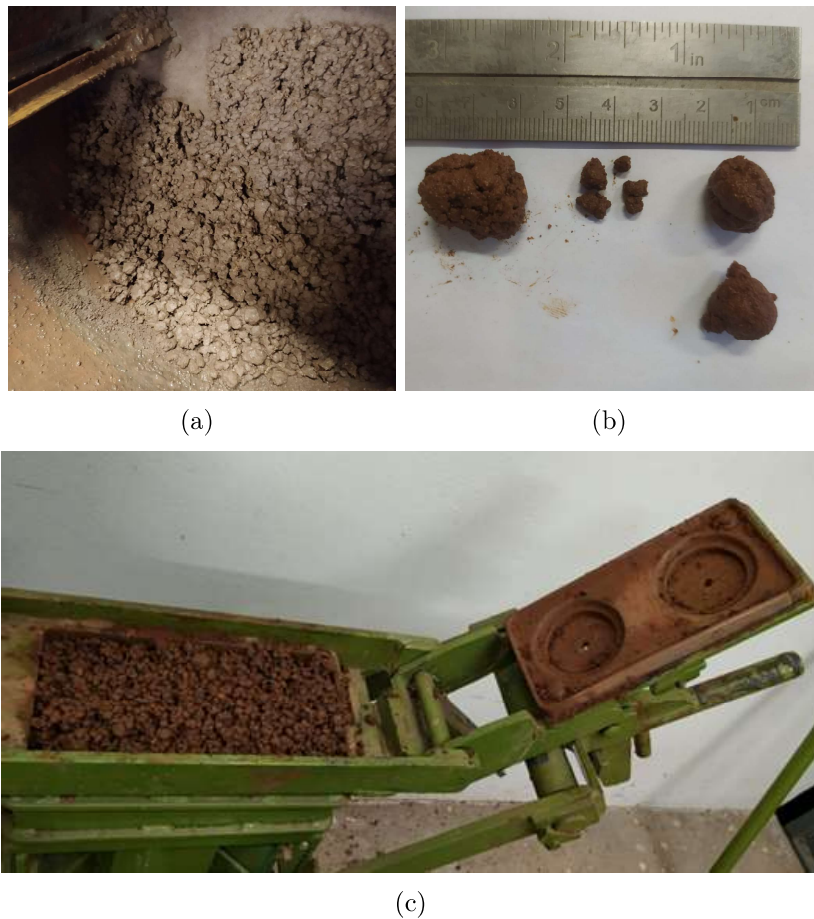


Figura 4.13: Nódulos en la mezcla: (a) formación de nódulos durante el mezclado, (b) nódulos de diversos tamaños, y (c) mezcla de materia prima cargada en el molde con presencia de nódulos de diámetro pequeño.

4.2.2 Moldeo, curado y producto final

A través de pruebas de fabricación preliminares, fue concluido que el molde de bloques de suelo-cemento con huecos cilíndricos no era viable, pues se rompía durante el desmoldeo. Este inconveniente también fue reportado por Cristina et al. [95]. Por ello, fueron fabricados los bloques macizos esquematizados

en la Figura 4.14, con las dimensiones promedio $25\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 5,5\text{ cm}$ sin considerar los encastrés.

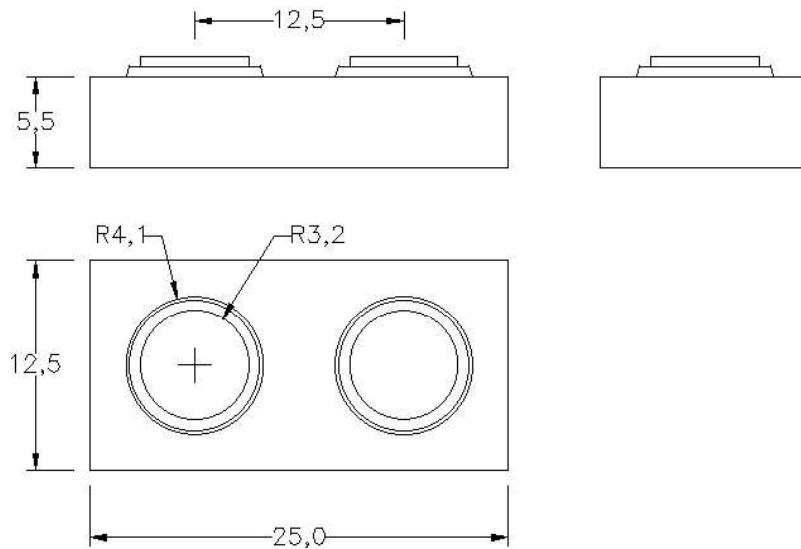


Figura 4.14: Esquema de los bloques obtenidos (cotas en cm).

Por prueba y error, en fabricaciones preliminares, fue determinada una masa promedio de mezcla hidratada a ser cargada en el molde de $m_{hum} = 3500\text{ g}$ para todos los tipos de bloque. Las masas del producto final presentaron variaciones de acuerdo a la composición, lo cual es explicado en el apartado 4.3.2.

4.2.3 Estimación de costo de producción

El presente trabajo no contempló la determinación exacta del costo de producción a nivel industrial, pero fue posible determinar un costo aproximado, considerando la materia prima y algunas etapas del proceso de producción.

En la Tabla 4.3 son indicados algunos datos necesarios para realizar la estimación del costo de producción, en dólares americanos (USD). El PET no fue incluido en la Tabla 4.3 porque el mismo fue recolectado, no fue adquirido por compra.

Tabla 4.3: Datos para la estimación del costo de producción de una unidad de bloque.

Material	Masa, <i>kg</i>	Precio por kg, <i>USD/kg</i>	Precio, <i>USD</i>
Suelo	2,909	0,021	0,061
Cemento	0,284	0,221	0,063
<i>Luffa cylindrica</i>	0,003	5,882	0,018
Total, <i>USD</i>			0,141

En la Tabla 4.3 son presentadas las masas aproximadas de cada materia prima necesaria para la fabricación de cada bloque, así como el costo de estas por unidad de masa y el total por materia prima y del producto final. Si el precio de costo total de la materia prima, igual a USD 0,141, es incrementado en 30% para incluir otros costos, el costo estimativo del bloque en las condiciones estudiadas queda en USD 0,183. Observando que no fueron especificados los costos de la mano de obra ni el porcentaje de ganancia, y solamente con fines comparativos, este costo estimativo es aproximadamente 2,1 veces mayor que el de un ladrillo cocido tradicional.

El volumen del bloque estudiado en este trabajo es casi 1,5 veces mayor que el del ladrillo cocido tradicional, por lo que otras consideraciones adicionales deben ser tenidas en cuenta para hacer una comparación de costos más justa.

Además, cabe hacer énfasis en que fueron detectadas diversas etapas donde el proceso de producción podría optimizarse, con lo que se lograría una mayor cantidad de bloques por hora. El alcance de este trabajo no abarcó la mejora de estas etapas.

4.3 Caracterización de los bloques

4.3.1 Aspecto

El producto final presentó un color uniforme con superficies planas (Figura 4.15(a)). Dependiendo de la composición del bloque, en la superficie era

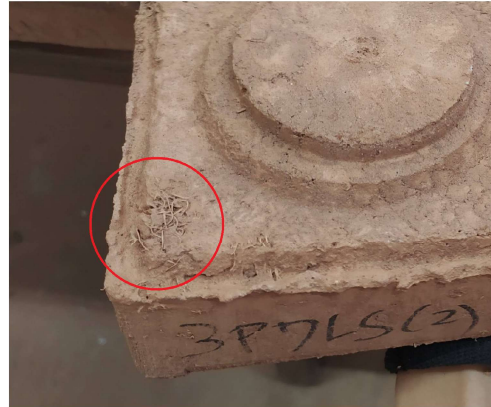
posible visualizar las hojuelas de PET y fibras de *L. cylindrica* (Figura 4.15(b) y (c)).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15: (a) Producto final, y superficies de bloques con presencia de (a) PET, y (b) *L. cylindrica*.

4.3.2 Masa y densidad

La Tabla 4.4 muestra los valores promedio de masa de la mezcla húmeda m_{hum} y masa seca de los bloques m_{sec} (28 días), y de la densidad húmeda ρ_{hum} y densidad seca ρ_{sec} de los diferentes tipos de bloques fabricados. Para el cálculo de la densidad, el volumen de bloque considerado fue $V_B = 1627 \text{ cm}^3$.

Tabla 4.4: Masas y densidades promedio de los bloques fabricados.

	Código del bloque	Masa húmeda $m_{hum},$ g	Densidad húmeda $\rho_{hum},$ g/cm^3	Masa seca $m_{sec},$ g	Densidad seca $\rho_{sec},$ g/cm^3
1	0P0L	3500	2,14	3260	2,00
2	10P0L	3500	2,14	3250	2,00
3	7P3LN	3500	2,14	3250	2,00
4	7P3LA	3500	2,14	3249	2,00
5	7P3LS	3500	2,14	3249	2,00
6	3P7LN	3500	2,14	3219	1,98
7	3P7LA	3500	2,14	3219	1,98
8	3P7LS	3500	2,14	3219	1,98
9	0P10LN	3500	2,14	3196	1,96
10	0P10LA	3500	2,14	3196	1,96
11	0P10LS	3500	2,14	3196	1,96

La m_{sec} , y en consecuencia la ρ_{sec} , de los bloques con 7 y 10% de *L. cylindrica* son, respectivamente, 1,27 y 1,96% menores que la masa del bloque sin agregado. Esto puede deberse a la capacidad de la *L. cylindrica* de absorber agua y de secarse. Para el caso del bloque 0P0L, puede ser asumido que la totalidad del agua de humectación fue empleada para la reacción del cemento, mientras que en el caso de los bloques con cierto porcentaje de *L. cylindrica*, parte del agua pudo ser absorbida por las fibras, y luego eliminada en el secado.

Para fines comparativos, la densidad seca de bloques de suelo-cemento estabilizados con 10% en peso de CP para un suelo con $IP = 3,1$ reportada por Walker [103] es $1,76 g/cm^3$. Considerando que el bloque de Walker [103] tiene un porcentaje de CP igual a 10% en peso, y su IP es el mismo que el bloque 0P0L, la densidad del bloque 0P0L es 14% mayor. Ventakarama Reddy et al. [42] reportaron una densidad de $1,78 g/cm^3$ para bloques de suelo-cemento con 8% de CP y 10,9% de arcilla. Esto podría representar una desventaja del bloque estudiado en esta investigación, pues una mayor densidad implica una mayor masa para el mismo volumen.

Usando como referencia el bloque sin agregado 0P0L, los bloques que

incorporaron agregados presentan una reducción en la densidad. Para el caso de bloques que incorporan 10% de PET, o 7% de PET + 3% de *L. cylindrica* en cualquiera de sus estados, la reducción de densidad es de 0,31 y 0,35%, respectivamente. Para el caso de bloques con 3% de PET + 7% de *L. cylindrica* en cualquiera de sus estados, la densidad es 1,27% veces menor, y para los bloques que no tienen agregado de PET y tienen 10% de *L. cylindrica* en cualquiera de sus estados, la reducción de densidad es de 1,96%. Esto permite apreciar una tendencia de disminución de la densidad del bloque compuesto con el aumento de agregado de *L. cylindrica*, lo cual se traduce en un menor peso del bloque.

Un análisis de varianza entre todas las muestras reveló, para un nivel de significación del 5%, que la hipótesis de medias iguales puede ser rechazada. Esto permite deducir que hay diferencias significativas entre las densidades de los bloques dependiendo de su dosificación.

4.3.3 Ensayo de absorción de agua

La Figura 4.16 muestra los resultados del ensayo de absorción de agua (AA), media de tres especímenes.

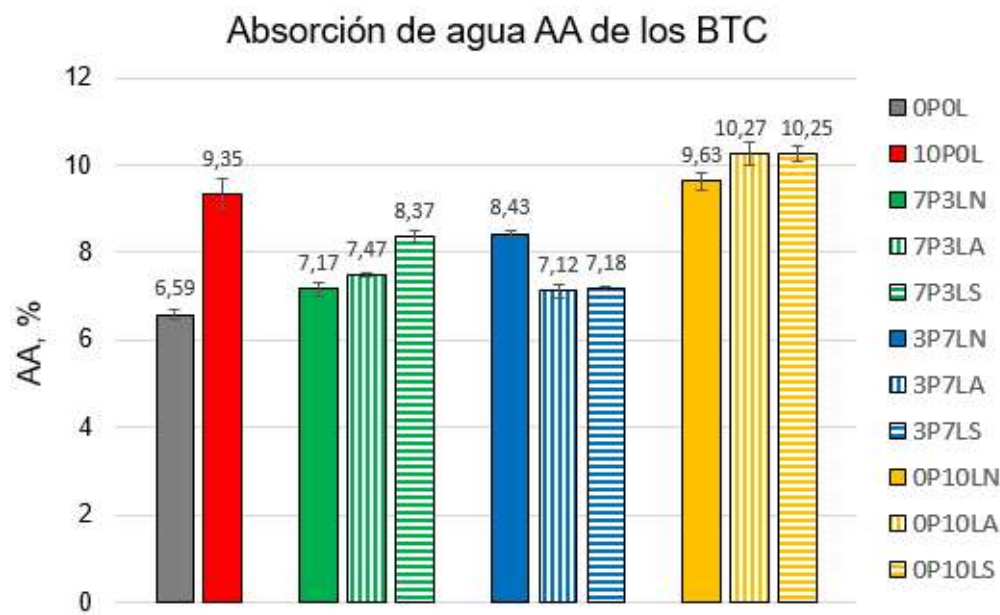


Figura 4.16: Resultados del ensayo de absorción de agua - AA - de los bloques. Los datos están representados como valor medio $\pm$ desviación estándar.

Considerando los resultados de AA de la Figura 4.16, es observado que la adición de refuerzo a la matriz suelo-cemento produce un aumento de la AA en todos los casos, aunque aun así todos los bloques cumplieron con el requisito de la NBR 8491 [8], pues $AA < 20\%$ para todas las dosificaciones estudiadas. Esto quiere decir que aún cuando hay un incremento de la AA al introducir refuerzos en la composición de los bloques de suelo-cemento, como los valores de AA están dentro del rango establecido por la norma, sus propiedades mecánicas no se verán afectadas.

La falta de relación aparente entre las dosificaciones y el estado de tratamiento superficial de la *L. cylindrica* podría deberse a que las fibras no fueron discriminadas según su posición en el fruto.

Un análisis de varianza considerando el total de las muestras exhibió que las diferencias entre las AA son significativas a un nivel de significación del 5%, lo cual quiere decir que la dosificación tiene influencia sobre la AA de los bloques.

Además, un análisis de varianza dentro de cada una de las dosificaciones 3P7L y 0P10L, reveló que las medias muestrales de *AA* entre los bloques 3P7LA y 3P7LS no difieren significativamente, y que tampoco hay diferencias significativas entre las medias de *AA* de los bloques 0P10LA y 0P10LS. Esto significa que puede ser considerado que el valor medio de la *AA* de los bloques 3P7LA y 3P7LS es el mismo, y también que los bloques 0P10LA y 0P10LS tienen medias iguales. Es decir, para estas dosificaciones es indistinto el estado de tratamiento de la *L. cylindrica*, desde el punto de vista de la absorción de agua.

Comparando los bloques 10P0L con los bloques 7P3L y 3P7L, es observado que reemplazar fracciones de PET por fracciones de *L. cylindrica* produce una mejoría en la *AA* en los bloques con PET+*L. cylindrica*. Para todos los tipos de bloque con refuerzo de PET+*L. cylindrica*, la absorción de agua fue inferior al 10%. Por su parte, los bloques reforzados sólo con *L. cylindrica* presentaron las mayores *AA*, incluso más altas que las de los bloques reforzados sólo con PET. Esto podría deberse a que a mayor porcentaje de *L. cylindrica*, mayor presencia de *L. cylindrica* en la superficie del bloque, lo que implica una interacción de las fibras con el medio externo. Esta situación favorecería la absorción de agua por parte de las fibras, que son hidrofílicas, así como la penetración de agua por capilaridad a los canutillos contiguos de *L. cylindrica* (Figura 4.17) que componen la fibra principal.

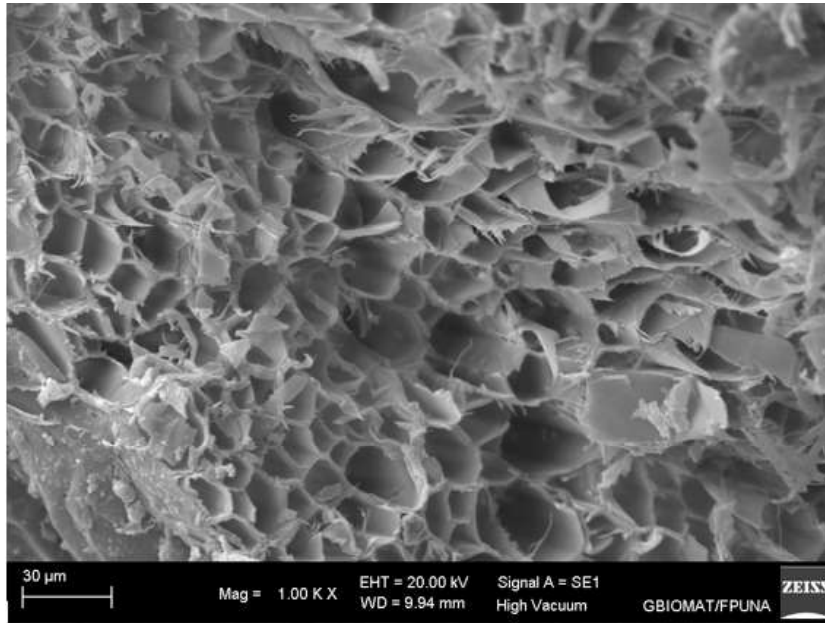


Figura 4.17: Imagen MEB del corte transversal de una fibra de *L. cylindrica*.

El mejor resultado es para los bloques con 3%PET+ 7%LA con 7,12% de AA, y el peor para la muestra con 0%PET + 10%LA con una AA de 10,27%.

Comparando los resultados obtenidos entre los bloques reforzados con LA y con LS, las muestras con fibras tratadas con agua presentaron, en general, mejor resultado. Para las muestras con 3% LA, la AA fue de 7,5%, y para las muestras con 7% de LA, la AA fue de 7,1%, en contraste con las muestras con 3% LS y con 7% de LS, para las cuales la AA fue de 8,4 y 7,2%, respectivamente. Considerando como parámetro la AA, el tratamiento con agua produjo mejores resultados que el tratamiento con NaOH.

Para fines comparativos, la AA reportada por Cristina et al. [95] para bloques de suelo-cemento con 5% de CP es de 10,31% en los bloques sin refuerzo, mayor que el 6,59% de los bloques 0P0L, y de 10,35 y 9,70% en bloques con 5 y 10% de *L. cylindrica*, respectivamente. Además, también como referencia, los valores de AA reportados por Venkatarama Reddy et al. [102] son de 11,2 y 11,4% para bloques de suelo estabilizado con 8 y 12% de CP, respectivamente. Considerando estos datos reportados, los bloques

desarrollados en el presente trabajo presentan resultados similares.

La mejora en la absorción de agua de los bloques que reemplazan fracciones de PET por fracciones de *L. cylindrica* puede deberse a: en primer lugar, es observado que introducir PET a la matriz suelo-cemento aumenta la AA, probablemente por un incremento en la porosidad del bloque debido a la interfaz matriz-refuerzo. Las hojuelas de PET adquieren una forma altamente irregular tanto en su contorno como en su superficie, y queda alabeada, pues el proceso de trituración al que son sometidas implica un impacto que produce deformaciones. Como las hojuelas son rígidas, esto podría dificultar la mojabilidad por parte de la matriz hidratada, haciendo que no moje completamente toda la superficie de las hojuelas. Entonces, son generadas zonas en las que hay vacíos entre la matriz y el refuerzo. Por su parte, a pesar de que los trozos de *L. cylindrica* también son altamente irregulares y complejos, los mismos no son de geometría superficial como las hojuelas, sino que son como pequeños andamios tridimensionales que podrían considerarse macroscópicamente como cubos de un material de altísima porosidad, y además son flexibles. Por ello, la matriz en estado plástico puede mojar mejor la superficie de las fibras y entonces disminuir la cantidad de regiones vacías, reduciendo la absorción de agua.

4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión

Los resultados del ensayo de *RC*, media de tres especímenes, son presentados en la Figura 4.18.

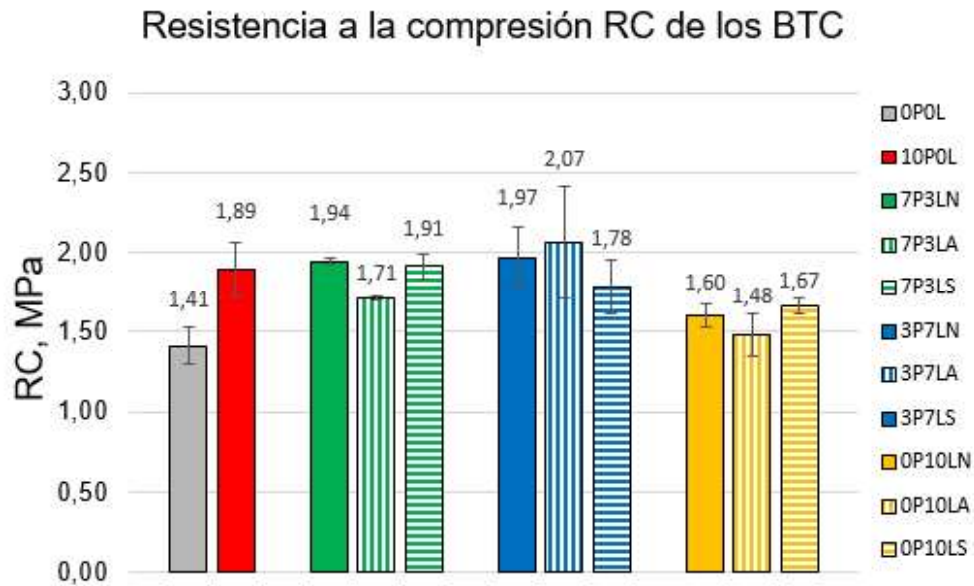


Figura 4.18: Resultados de resistencia a la compresión - RC - de los bloques.

Considerando los resultados de RC de la Figura 4.18 para los bloques tipo 0P0L y 10P0L, es observado que la adición de 10% PET a la matriz suelo-cemento produce un aumento beneficioso del 33,91% en la RC . El reemplazo de fracciones de PET por fracciones de *L. cylindrica* implica, aparentemente, una leve mejoría en la RC en la mayoría de los casos estudiados, en comparación con la RC de un bloque solamente reforzado con PET. Las muestras 7P3LN, 7P3LS y 3P7LN presentan un ligero incremento en la RC , siendo los incrementos de 2,65, 1,02 y 4,10%, respectivamente. El caso de la muestra 3P7LA podría ser considerado como un aumento de RC más importante, pues es del 9,28%.

Por su parte, las muestras reforzadas solamente con *L. cylindrica* en cualquiera de sus estados exhiben un aumento aparente en la resistencia en comparación con el bloque sin refuerzo 0P0L. Si bien, el incremento en la muestra 0P10LA es de 5,02%, en las muestras 0P10LN y 0P10LS es de 13,27 y 17,85% respectivamente.

Un análisis de varianza considerando el total de las muestras reveló que

las diferencias entre las RC son significativas a un nivel de significación del 5%, lo cual quiere decir que la dosificación tiene influencia sobre la RC de los bloques. A su vez, un análisis de varianza excluyendo la dosificación 0P0L, es decir considerando todos los bloques con refuerzo, mostró que la diferencia entre las medias de RC no es significativa. Esto quiere decir que puede considerarse que las RC medias de todos los bloques reforzados, independientemente de la dosificación, son iguales. Estos resultados demuestran que la incorporación de hojuelas de PET y de fibras de *L. cylindrica*, tratadas o no tratadas, a la matriz suelo-cemento, es significativamente beneficiosa desde el punto de vista de la RC .

Los resultados de resistencia a la compresión no muestran una relación entre la RC y el estado de tratamiento superficial de la *L. cylindrica*. Esto puede deberse, así como en el caso de la absorción de agua, a que no fue hecha una clasificación de las fibras de *L. cylindrica* según su posición en el fruto.

El bloque de suelo-cemento 0P0L no alcanzó el requisito de la NBR 8491 [8], pues su resistencia fue 1,41 MPa en contraste con los 2,00 MPa exigidos por la norma en cuestión. Por otra parte, pese a haber obtenido mejoras en la resistencia del bloque 0P0L al introducir refuerzos a su composición, los resultados de los bloques reforzados tampoco cumplieron, en general, con el requisito de la NBR 8491 [8]. Sólo un tipo de bloque superó el valor mínimo de RC exigido de 2,00 MPa , el bloque de composición 3P7LA con 2,07 MPa de RC . Este bloque fue, además, el que presentó mejor AA .

Para fines comparativos, la RC húmeda de un bloque de suelo-cemento sin refuerzo, pero con granulometría óptima con 9% de arcilla y estabilizados con 8% de CP reportada por Venkaratama Reddy y Gupta [102] es de 5,63 MPa . En otro trabajo, Venkaratama Reddy et al. [42] obtuvieron una RC de 4,99 MPa para bloques de suelo-cemento con 8% de CP y un suelo con 10,90% de arcilla. Comparando estos resultados, RC del bloque 3P7LA es de entre 35 y 42% de las RC mencionadas. Sin embargo, no hay que perder de vista que en los bloques desarrollados en esta investigación no fue alterada la granulometría del suelo.

Por su parte, los bloques huecos estudiados Cristina et al. [95] con

5% de CP sin refuerzo alcanzaron 1,55 MPa , los bloques con 5% de *L. cylindrica* 0,44 MPa , y aquellos reforzados con 10% de *L. cylindrica* tan sólo 0,30 MPa . Comparando con los resultados del presente trabajo, los bloques 0P0L tienen una RC igual al 90% de la RC del bloque sin refuerzo de Cristina et. al [95], y la RC del bloque 3P7LA equivale a casi 5 veces la mejor resistencia bloques con refuerzo. En este caso, la comparación sólo fue hecha con fines de contrastar resultados, pues no se puede hablar de una mejora propiamente al comparar bloques huecos con macizos.

4.3.4.1 Observaciones adicionales

Los bloques producidos exhibieron el siguiente comportamiento:

- Para las diferentes composiciones, presentaron un patrón de fisuras longitudinales en la dirección de la carga, en general dos o tres fisuras por cara (Figura 4.19) excepto por las probetas sin refuerzo y las probetas con 10% de *L. cylindrica*, que presentaron una o dos fisuras por cara. Además, algunas probetas exhibieron exfoliación (Figura 4.19) ante la aparición de la fisuración, pero no fue identificada una relación entre la composición del bloque y este comportamiento.



Figura 4.19: Patrón de fisuras típico en una cara de una probeta (flechas rojas), exfoliación (círculo amarillo).

- Los bloques 0P0L (sin refuerzo) presentaron, en general, una o dos fisuras por cara (Figura 4.20(a)) y además las probetas se desmoronaron

durante la fisuración o al ser manipuladas gentilmente para desmontarlas de la máquina de ensayo. La superficie de rotura fue de color uniforme y homogéneo (Figura 4.20(b)).



Figura 4.20: Probetas 0P0L (sin refuerzo): (a) patrón de fisuras típico (flecha roja), (b) superficie de rotura de aspecto uniforme.

- Los bloques con 10% de PET, 10P0L, no se desmoronaron cuando fueron manipulados suavemente luego de la falla (Figura 4.21(a)). Un golpe débil causó el desmoronamiento, siendo observadas hojuelas de PET arrancadas en la superficie de rotura (Figura 4.21(b)). Esto sugiere que el refuerzo de PET presentó una contribución a la tenacidad del material por el mecanismo de puenteo de fisuras y arranque de refuerzo.

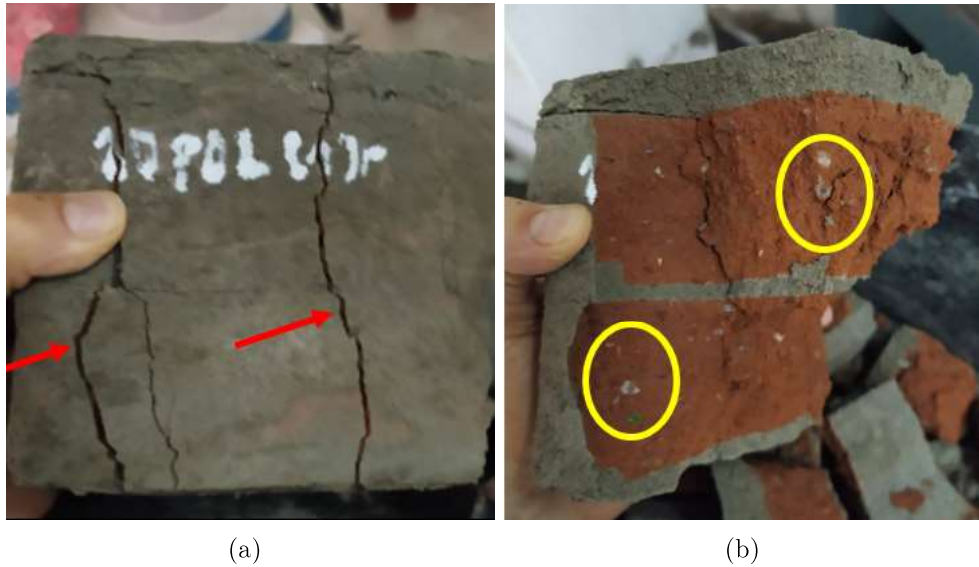


Figura 4.21: Probetas 10POL (10% PET como refuerzo): (a) manipulación suave de la probeta, con patrón de fisuras típico (flechas rojas), (b) superficie de rotura con presencia de hojuelas de PET arrancadas (círculos amarillos).

- Los bloques con refuerzo de 7% de PET y 3% de *L. cylindrica* en cualquiera de sus estados no se desmoronaron cuando fueron manipulados suavemente luego de la falla (Figura 4.22(a)). Un golpe débil causó el desmoronamiento, siendo observadas hojuelas de PET y fibras de *L. cylindrica* arrancadas en la superficie de rotura, además de pequeñas porciones de matriz unidas al cuerpo principal de la probeta por medio de fibras de *L. cylindrica* (Figura 4.22(b)). Esto sugiere que la adición de refuerzo de *L. cylindrica* también significó una contribución a la tenacidad del material por el mecanismo de puenteo de fisuras y arranque de refuerzo. No fue determinada una correlación entre el tratamiento de la *L. cylindrica* y el comportamiento final del bloque.

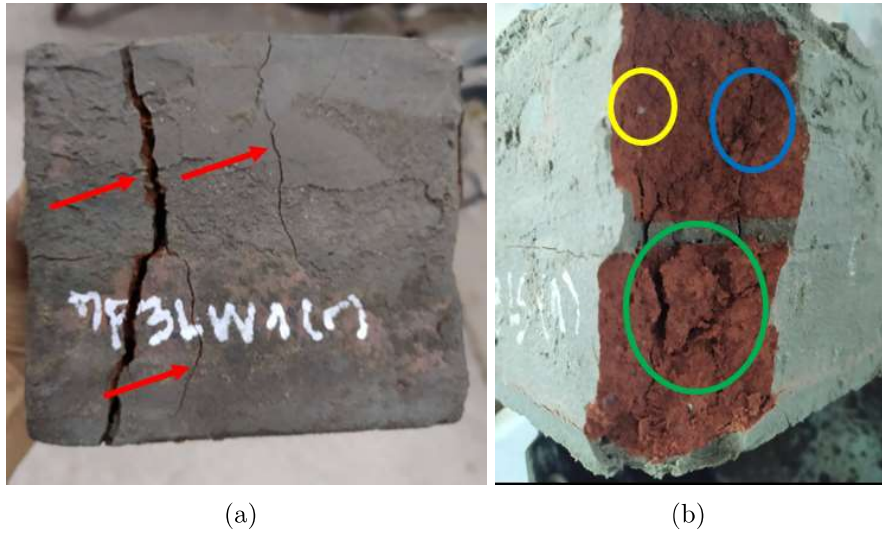


Figura 4.22: Probetas 7P3LZ (refuerzo de 7% PET+3% *L. cylindrica* en cualquiera de sus presentaciones: (a) manipulación suave de la probeta, con patrón de fisuras típico (flechas rojas), (b) superficie de rotura con presencia de hojuelas de PET arrancadas (círculo amarillo), fibras de *L. cylindrica* arrancadas (círculo azul), y terrones sujetos al cuerpo principal por medio de fibras de *L. cylindrica* (círculo verde).

- Los bloques con refuerzo de 3% de PET y 7% de *L. cylindrica* en cualquiera de sus estados no se desmoronaron cuando se manipularon suavemente luego de la falla (Figura 4.23(a)). Un golpe débil causó el desmoronamiento, siendo observadas hojuelas de PET y fibras de *L. cylindrica* arrancadas en la superficie de rotura. Para esta composición, también fueron observadas fibras arrancadas en la superficie de rotura, así como porciones de material matricial unidas entre sí por medio de fibras de *L. cylindrica* (Figura 4.23(b)). No fue determinada una correlación entre el tratamiento de la *L. cylindrica* y el comportamiento final del bloque.

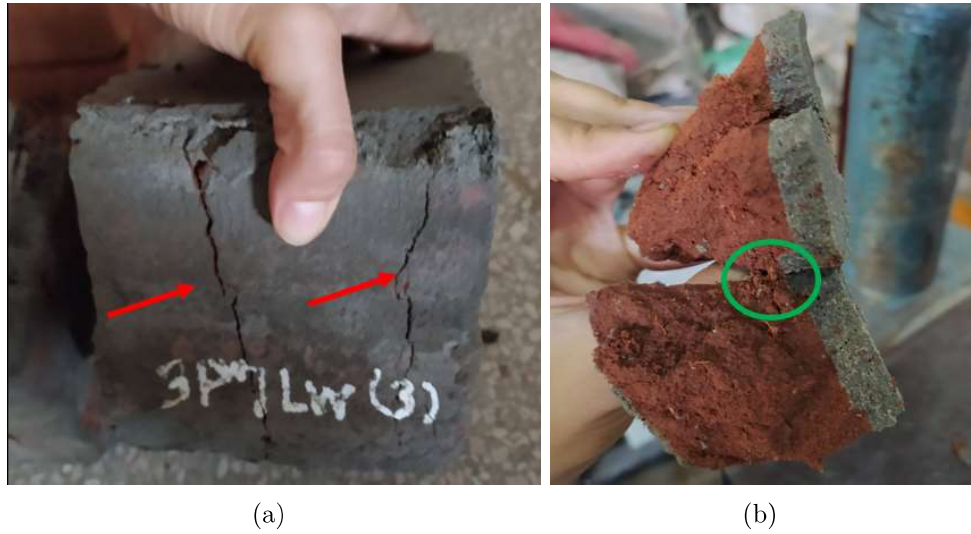


Figura 4.23: Probetas 3P7LZ (refuerzo de 3% PET+3% *L. cylindrica* en cualquiera de sus presentaciones): (a) manipulación suave de la probeta, con patrón de fisuras típico (flechas rojas), (b) porciones de probeta unidas entre sí por fibras de *L. cylindrica* (círculo verde).

- Los bloques con 10% de *L. cylindrica* en cualquiera de sus presentaciones presentaron menor cantidad de fisuras en las caras, una a dos fisuras por cara (Figura 4.24(a)), y en la superficie de rotura hubo gran presencia de fibras de *L. cylindrica* arrancadas (Figura 4.24(b)). En comparación con las probetas que incluyeron PET en su composición, puede ser interpretado que las hojuelas de PET contribuyen a la microfisuración múltiple por el mecanismo de desviación de la fisuración, en contraste con la fisuración más localizada ocurrida en los bloques solamente reforzados con fibras de *L. cylindrica*. Esto explicaría, además, por qué los bloques con fracciones de PET tienen mayor resistencia.

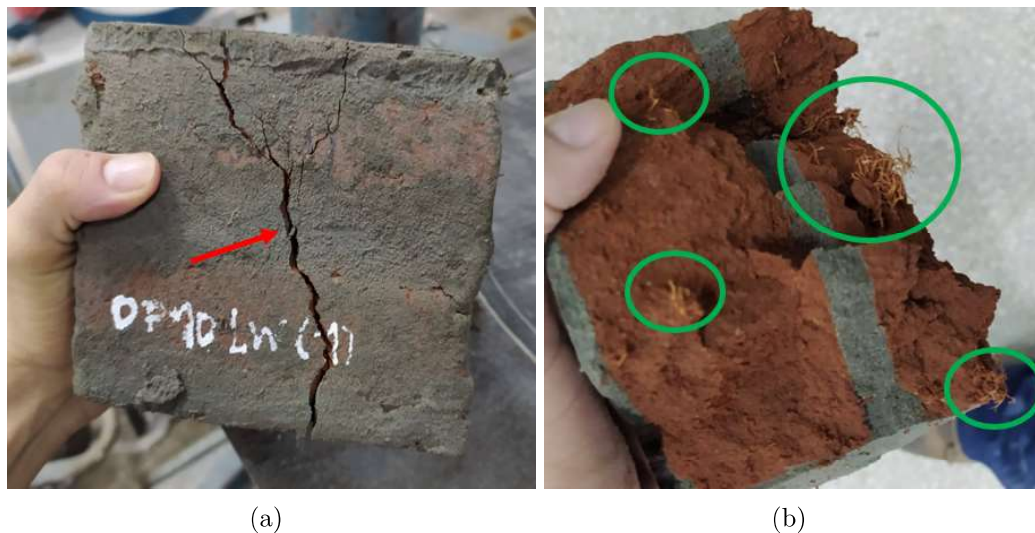


Figura 4.24: Probetas 0P10LZ (refuerzo de 0% PET+10 %*L. cylindrica* en cualquiera de sus presentaciones): (a) manipulación suave de la probeta, con patrón de fisuras típico (flecha roja), (b) superficie de rotura con gran presencia de fibras de *L. cylindrica* (círculo verde).

La presencia de refuerzo arrancado, ya sea hojuelas de PET o fibras de *L. cylindrica*, en la superficie de rotura es un indicativo de una unión mecánica entre fibra y matriz, que es lo deseable en matrices frágiles como la de los bloques en estudio. La unión mecánica en este caso aumenta la resistencia y la tenacidad, pues los refuerzos mantienen unidos los bloques de matriz por el puenteo y propician la falla gradual del compuesto. Aunque la matriz se haya fisurado, el material sigue resistiendo por acción del refuerzo que mantiene unidas las porciones de matriz ya fisurada.

Otra observación que puede ser realizada es que el formato de las fibras empleado en este trabajo probablemente contribuye al agarre mecánico buscado más que el rozamiento debido a la rugosidad superficial, pues la configuración aleatoria tridimensional de las fibras en las partículas de *L. cylindrica* actuaría como un anclaje. La matriz empleada es un material granular, y para que ocurra el agarre mecánico por rugosidad superficial se requeriría que el tamaño de los granos sea lo suficientemente pequeño para ingresar a las estriaciones de las fibras de *L. cylindrica*. Si bien es cierto que hay partículas de diámetro pequeño en la matriz, están presentes en un

bajo porcentaje, y en este trabajo no es considerado que su influencia en el agarre por rugosidad superficial sea significativo. De lo expuesto también puede explicarse por qué no hay diferencia aparente entre las *RC* según el tratamiento de las fibras.

La otra presentación posible de los refuerzos de *L. cylindrica* podría ser en forma de fibras cortas, que podrían lograrse cortando las partículas de *L. cylindrica* con una trituradora adecuada.

4.3.5 Observación con lupa

La observación de la unión matriz-hojuelas de PET por medio de la lupa estereoscópica con aumento 40X (Figura 4.25(a)), permitió apreciar que en algunas zonas no hay contacto o adhesión entre la matriz y las hojuelas de PET a lo largo de toda la superficie de la interfaz (Figura 4.25(b), (c) y (d)). Esto podría ser lo que propicia el aumento de *AA* mencionado en el apartado 4.3.3. Además, puede ser observada la aleatoriedad de la distribución de las hojuelas, lo cual es positivo pues proporciona homogeneidad al material.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.25: (a) Posicionamiento de una probeta encapsulada en la lupa; (b), (c) y (d) regiones sin contacto entre matriz y hojuelas de PET (círculos rojos). Imágenes sin escala.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

De los resultados y discusiones, es posible concluir que:

- Los ensayos de caracterización del suelo adquirido de proveedores locales permitieron determinar que el mismo es del tipo arena limosa SM, y que su estabilizante adecuado es el cemento Portland.
- Los ensayos de caracterización de la *L. cylindrica* en los tres estados considerados (LN, LA y LS) permitieron identificar que los tratamientos aplicados modifican su rugosidad superficial, siendo el tratamiento con NaOH el provoca una superficie más suave.
- La densidad de los bloques sin reforzar es mayor que la de otros bloques similares reportados en la literatura, lo cual podría significar una desventaja del material propuesto.
- Todos los bloques estudiados cumplieron con el requisito de absorción de agua $AA > 20\%$ de la NBR 8491.
- Fue verificado que la dosificación de los bloques influye significativamente en su AA , siendo el peor resultado de AA de 10,27% para los bloques con 0%PET+10%LA, y el mejor 7,12% para los bloques con 3%PET+7%LA.

- El bloque de suelo-cemento sin reforzar no alcanzó el requisito de resistencia a la compresión $RC \geq 2,00 \text{ MPa}$ exigido por la NBR 8491. Incorporar refuerzos de hojuelas de PET y partículas de *L. cylindrica* mejoró la resistencia de manera significativa, pero en general no fue suficiente para cumplir con el requisito de la NBR 8491. El único tipo de bloque que cumplió con el requisito mínimo de RC fue el que contiene 3%PET+7%LA, con $2,07 \text{ MPa}$.
- Considerando los resultados de AA y de RC , el bloque denominado 3P7LA, con 3%PET y 7%LA es el que presenta las características más prometedoras dentro del alcance de esta investigación, pues tuvo la menor AA y alcanzó el requisito de RC de la norma considerada.
- Los resultados no muestran una relación entre la AA y el tratamiento superficial de la *L. cylindrica*, y tampoco entre la RC y el tratamiento superficial de la *L. cylindrica*.
- Sobre el efecto del refuerzo, puede ser concluido que no solo contribuyó al aumento significativo de la RC , sino además ambos tipos de refuerzo favorecieron al aumento de tenacidad, lo cual podría significar una reducción en la manera catastrófica o abrupta de falla en la matriz sin reforzar.
- La mejora de tenacidad por agarre mecánico probablemente se deba al formato de fibras de *L. cylindrica*, que fue usada en forma de partículas de geometría tridimensional y no en forma de fibras cortas unidimensionales. Esto también induce a concluir que por ello no se observaron diferencias significativas de los bloques de acuerdo al tratamiento de las fibras.
- Para elegir el estado más adecuado de la *L. cylindrica* a ser incorporada a la matriz en estudio, se requieren de estudios adicionales, como por ejemplo resistencia a ataque de hongos, durabilidad, comportamiento térmico, y otros análisis de comportamiento mecánico como resistencia a la flexión.

5.2 Trabajos futuros

Los trabajos futuros propuestos son:

- Proponer una manera económica y ecológica de limpiar eficientemente las botellas de PET con etiquetas adhesivas y líquidos aceitosos.
- Padronizar el tipo y color de botellas de PET empleadas como refuerzo y verificar si hay diferencias significativas en cuanto al comportamiento sin considerar la padronización.
- Estudiar maneras más eficientes de cortar la *L. cylindrica* en partículas.
- Discriminar las fibras de *L. cylindrica* según su ubicación en el fruto para su uso como refuerzos.
- Determinar la influencia de otras fracciones volumétricas de cemento Portland en el comportamiento final del bloque.
- Investigar el comportamiento del bloque cuando se aplica una estabilización por mejora de granulometría del suelo.
- Probar mayores proporciones de agregados para disminuir la densidad, y determinar hasta qué fracciones volumétricas producen mejoras en el comportamiento.
- Incorporar agregado de *L. cylindrica* en forma de fibras cortas u otras configuraciones, y estudiar el comportamiento del bloque.
- Estudiar si los tratamientos aplicados a la *L. cylindrica* influyen en el comportamiento térmico, en la durabilidad, y contra la aparición de hongos con respecto a las fibras *in natura*.
- Investigar qué otras matrices pueden ser aptas para ser reforzadas con LN, LA o LS, considerando los resultados de la morfología superficial y la compatibilidad química.

- Investigar otras posibles aplicaciones de la *L. cylindrica*, en otros ámbitos como el biomédico o el medioambiental.
- Obtener diagramas tensión deformación de los bloques para cuantificar la tenacidad.
- Realizar ensayos de flexión e impacto a los bloques.
- Realizar un análisis económico de los bloques considerando una optimización del proceso de producción.

Referencias Bibliográficas

- [1] F. Pacheco-Torgal and Said Jalali. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29:512–519, April 2012. ISSN 0950-0618. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811006039>.
- [2] B. V. Venkaratama Reddy and M. S. Latha. Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilised soil compacts. *Materials and Structures*, 47, July 2013. doi: 10.1617/s11527-013-0142-1.
- [3] Sung-Bae Kim, Na Hyun Yi, Seung Hyun Kim, Jang-Ho Jay Kim, and Young-Chul Song. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32(3):232–240, March 2010. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002.
- [4] J.M. Irwan, R.M. Asyraf, Norzila Othman, Koh Heng Koh, Mahamad Mohd Khairil Annas, and S.K. Faisal. The Mechanical Properties of PET Fiber Reinforced Concrete from Recycled Bottle Wastes. *Advanced Materials Research*, 795:347–351, September 2013. ISSN 1662-8985. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.795.347. URL <https://www.scientific.net/AMR.795.347>.
- [5] Satish Joshi, Lawrence Drzal, Amar Mohanty, and Sunil Arora. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufac-*

- turing*, 35:371–376, March 2004. doi: 10.1016/j.compositesa.2003.09.016.
- [6] Mohamad Alhijazi, Babak Safaei, Qasim Zeeshan, Mohammed Asmael, Arameh Eyvazian, and Zhaoye Qin. Recent Developments in Luffa Natural Fiber Composites: Review. *Sustainability*, 12:7683, September 2020. doi: 10.3390/su12187683.
 - [7] A. Komuraiah, N. Shyam Kumar, and B. Durga Prasad. Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties. *Mechanics of Composite Materials*, 50(3):359–376, July 2014. doi: 10.1007/s11029-014-9422-2. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014MCM....50..359K>.
 - [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 8491: Tijolo de solo-cimento – Requisitos, 2012.
 - [9] Pekka Huovila, Mia Ala-Juusela, Luciana Melchert, Stéphane Pouffary, Chin-Chin Cheng, Diana Üрге Vorsatz, Sonja Koeppel, Niclas Svenningsen, and peter Graham. Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Maker. Technical Report, United Nations Environment Program, Paris, 2009. URL <https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/unep207.pdf>.
 - [10] K. K. G. K. D. Kariyawasam and C. Jayasinghe. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 105:519–527, February 2016. ISSN 0950-0618. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.189. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815308606>.
 - [11] Weiguo Shen, Yi Liu, Bilan Yan, Jing Wang, Pengtao He, Congcong Zhou, Xujia Huo, Wuzong Zhang, Gelong Xu, and Qingjun Ding. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(C):618–628, 2017. ISSN 1364-

0321. URL https://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a75_3ay_3a2017_3ai_3ac_3ap_3a618-628.htm. Publisher: Elsevier.
- [12] F. R. Arooz and R. U. Halwatura. Mud-concrete block (MCB): mix design & durability characteristics. *Case Studies in Construction Materials*, 8:39–50, June 2018. ISSN 2214-5095. doi: 10.1016/j.cscm.2017.12.004. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509517301250>.
- [13] Eduardo da Silva Pinto. *Solo-cimento compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica*. Mestre, Universidad Estadual Paulista, September 2016. URL <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/147987>. Accepted: 2017-01-12T16:15:50Z Publisher: Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- [14] Ellis M. Gartner and Donald E. Macphee. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(7):736–749, July 2011. ISSN 0008-8846. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.006. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611000822>.
- [15] Alaa M. Rashad. A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(2):278–306, December 2015. ISSN 2212-6090. doi: 10.1016/j.ijbsbe.2015.10.002. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609015000369>.
- [16] David J. M. Flower and Jay G. Sanjayan. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5):282, May 2007. ISSN 1614-7502. doi: 10.1065/lca2007.05.327. URL <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>.
- [17] Cristina Branquinho, Gisela Gaio-Oliveira, Sofia Augusto, Pedro Pinho, Cristina Máguas, and Otilia Correia. Biomonitoring spatial and temporal impact of atmospheric dust from a cement industry. *Environmental Pollution*, 151(2):292–299, January 2008. ISSN 0269-7491.

doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.014. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749107002886>.

- [18] Khaqan Zeb, Yousaf Ali, and Muhammad Khan. Factors influencing environment and human health by cement industry: Pakistan a case in point. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 30, November 2018. doi: 10.1108/MEQ-06-2018-0112.
- [19] Mohsen M. El-Sherbiny, Ali I. Ismail, and Mohamed E. EL-Hefnawy. A preliminary assessment of potential ecological risk and soil contamination by heavy metals around a cement factory, western Saudi Arabia. *Open Chemistry*, 17(1):671–684, January 2019. ISSN 2391-5420. doi: 10.1515/chem-2019-0059. URL <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/chem-2019-0059/html>. Publisher: De Gruyter Open Access Section: Open Chemistry.
- [20] Arshad H. Rahmani, Ahmad Almatroudi, Ali Yousif Babiker, Amjad A. Khan, and Mohammed A. Alsahly. Effect of Exposure to Cement Dust among the Workers: An Evaluation of Health Related Complications. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 6(6):1159–1162, June 2018. ISSN 1857-9655. doi: 10.3889/oamjms.2018.233. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6026423/>.
- [21] Saima Jadoon, Abdulfattah Amin, Dr Malik, and Hamza Kamal. Soil Pollution by the Cement Industry in the Bazian Vicinity, Kurdistan Region. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 06, January 2016. doi: 10.4172/2161-0525.1000413.
- [22] R. Eugene Lamare and O. P. Singh. Effect of cement dust on soil physico-chemical properties around cement plants in Jaintia Hills, Meghalaya. *Environmental Engineering Research*, 25(3):409–417, June 2020. ISSN 1226-1025, 2005-968X. doi: 10.4491/eer.2019.099. URL <http://www.eeer.org/journal/view.php?number=1060>. Publisher: Korean Society of Environmental Engineers.

- [23] Instituto Nacional de Tecnología y Normalización. INTN NP 104: Ladrillos cerámicos- Definiciones, 1974.
- [24] Agostino Walter Bruno, Domenico Gallipoli, Céline Perlot, and J. Mendes. Optimization of bricks production by earth hypercompaction prior to firing. *Journal of Cleaner Production*, 214:475–482, March 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.302.
- [25] Paola Moreno Murguía. *Estimación de riesgos ambientales causados por la industria ladrillera*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 2004. URL <http://132.248.9.195/ppt2004/0337915/Index.html>.
- [26] B V Venkatarama Reddy. Pressed soil-cement block: an alternative building material for masonry. In *Sustainable Construction*, pages 425–433, Tampa, 1994. University of Florida.
- [27] Derek Hull and T. W. Clyne. *An introduction to composite materials*. Cambridge University Press, Cambridge, second edition edition, 1996.
- [28] Autar Kaw. *Mechanics of Composite Materials*. Taylor & Francis, Boca Ratón, second edition edition, 2006. URL https://www.academia.edu/8764844/_Autar_K_Kaw_Mechanics_of_Composite_Materials_S_Book_Fi_org_.
- [29] Krishan K. Chawla. *Composite Materials Science and Engineering*. Springer-Verlag, New York, 2012.
- [30] Q. Qin and J. Ye. *Toughening Mechanisms in Composite Materials*. Elsevier, May 2015. ISBN 978-1-78242-291-4. Google-Books-ID: p0edBAAAQBAJ.
- [31] Robert Jones. *Mechanics of Composite Materials*. Taylor & Francis, Philadelphia, second edition edition, 1999.
- [32] P. Ehrburger, J. B. Donnet, A. R. Ubbelohde, J. W. Johnson, M. O. W. Richardson, and R. A. M. Scott. Interface in Composite Materials

- [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 294(1411):495–505, 1980. ISSN 0080-4614. URL <https://www.jstor.org/stable/36374>. Publisher: The Royal Society.
- [33] Lorenzo Miccoli, Urs Müller, and Patrick Fontana. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61:327–339, June 2014. ISSN 0950-0618. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814002566>.
- [34] Célia Maria Martins Neves, Obede Borges Faria, Rodolfo Rotondaro, Patricio S. Cevallos, and Márcio Vieira Hoffmann. Seleção de solos e métodos de controle para construção com terra - Manual de seleção, 2010. URL https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/05/2b_PP-Selecao-de-solos_2010.pdf.
- [35] U. S. Army Corps of Engineers. EM 1110-3-137: Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction - Engineer Manual, 1984. URL <https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM.1110-3-137.pdf>.
- [36] Jean-Claude Morel, Abalo Pkla, and Pete Walker. Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, pages 303–309, February 2007. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021.
- [37] Fetra Venny Riza. *Formulation of compressed stabilized earth brick using black uncontrolled burnt rice husk ash as full cement replacement*. Doctoral, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2017. URL <https://core.ac.uk/download/pdf/159127851.pdf>.
- [38] Andrew Heath, Pete Walker, C. Fourie, and Mike Lawrence. Compressive strength of extruded unfired clay masonry units. *Proceedings*

- of The Ice - Construction Materials*, 162:105–112, August 2009. doi: 10.1680/coma.2009.162.3.105.
- [39] Fetra Venny Riza, Ismail Abdul Rahman, and Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi. A brief review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). In *2010 International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010)*, pages 999–1004, Kuala Lumpur, Malaysia, December 2010. IEEE. ISBN 978-1-4244-8987-9. doi: 10.1109/CSSR.2010.5773936. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/5773936/>.
 - [40] Tom Morton. *Earth Masonry: Design and Construction Guidelines*. Bracknell, Berkshire, February 2008. ISBN 978-1-86081-978-0.
 - [41] Daniel Maskell, Andrew Heath, and Pete Walker. Appropriate structural unfired earth masonry units. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 169:1–10, October 2016. doi: 10.1680/jcoma.15.00034.
 - [42] B. V. Venkatarama Reddy, Richardson Lal, and Kenkere Najunda Rao. Optimum Soil Grading for the Soil-Cement Blocks. *Journal of Materials in Civil Engineering - J MATER CIVIL ENG*, 19:139–148, February 2007. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(139).
 - [43] B. M. Das. *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 7th edition edition, 2009. URL <https://www.cengage.co.uk/books/9781133108672>.
 - [44] American Society of Testing and Materials. ASTM E11: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves, 2011.
 - [45] Nicole B. Trujillo. Mix design and mechanical characterization of stabilized compressed earth blocks and assemblies for the Jemez pueblo in New Mexico. Master’s thesis, The University of New Mexico, Albuquerque, December 2016. URL https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds/147.

- [46] Andrew J. Margenot, Francisco J. Calderón, Keith W. Goyne, Fungai N. Dmukome, and S. J. Parikh. IR spectroscopy, soil analysis applications. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 2:448–454, January 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.12170-5. URL <https://experts.illinois.edu/en/publications/ir-spectroscopy-soil-analysis-applications-3>. Publisher: Elsevier.
- [47] Hugo Houben and Hubert Guillard. *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. Practical Action, London, December 1994. ISBN 978-1-85339-193-4.
- [48] Mariaenrica Frigione. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30(6):1101–1106, June 2010. ISSN 0956-053X. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10000735>.
- [49] Luis Alesmar, Nalia Rendón, and María Eugenia Korody. Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) - cemento. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 23(1):76–86, March 2008. ISSN 0798-4065. URL http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0798-40652008000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- [50] Beata Jabłońska, Paweł Kielbasa, Maroš Korenko, and Tomasz Drózdź. Physical and Chemical Properties of Waste from PET Bottles Washing as A Component of Solid Fuels. *Energies*, 12:2197, June 2019. doi: 10.3390/en12112197.
- [51] R. N. Nibudey, P. B. Nagarnaik, D. K. Parbat, and A. M. Pande. Compressive Strength and Sorptivity Properties of Pet Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 7(41):1206–1216, 2014. ISSN 22311963.
- [52] Ebrahim Rahmani, M. Dehestani, Morteza Hosseinali Beygi, Hamed Allahyari, and Iman Nikbin. On the mechanical properties of concrete

- containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47:1302–1308, October 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
- [53] Arokiaaraj David, Yamuna Thangavel, and Ramanarayan Sankriti. Recover, Recycle and Reuse: An Efficient Way to Reduce the Waste. 09: 31–42, April 2019. doi: 10.24247/ijimperdjun20194.
- [54] Charles J. Kibert. Establishing principles and a model for sustainable construction. In *Sustainable Construction*, Tampa, 1994. University of Florida. URL https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC24773.pdf.
- [55] Nabajyoti Saikia and Jorge Brito. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52:236–244, February 2014. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
- [56] Mallikarjun Puttaraj, Shanmukha Hiremath, Navaneeth Shetty, Prathima Rai, and Puttaraj Mh. Utilization Of Waste Plastic In Manufacturing Of Plastic-Soil Bricks. December 2018.
- [57] Las industrias del reciclaje se afianzan en el mercado local, 2018. URL <https://www.ultimahora.com/las-industrias-del-reciclaje-se-afianzan-el-mercado-local-n2785106.html>.
- [58] Paraguay es el mejor reciclador de botellas plásticas en América, con 65% - Economía - ABC Color, 2019. URL <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/economia/2019/08/24/paraguay-es-el-mejor-reciclador-de-botellas-plasticas-en-america-con-65/>.
- [59] Cambio en la ley permitirá crecimiento de la industria del reciclaje, June 2019. URL <http://economaviirtual.com.py/web/pagina-general.php?codigo=22710>.

- [60] Alba Delvalle. La Nación / Cerca de 100.000 paraguayos viven del reciclaje, 2019. URL <https://www.lanacion.com.py/mitad-de-semana/2019/09/04/cerca-de-100000-paraguayos-viven-del-reciclaje/>.
- [61] Joao Alexandre Paschoalim Filho, João Henrique Storopoli, and António Guerner Dias. Evaluation of compressive strength and water absorption of soil-cement bricks manufactured with addition of pet (polyethylene terephthalate) wastes. *Acta Scientiarum. Technology*, 38 (2):163, April 2016. doi: 10.4025/actascitechnol.v38i2.28458.
- [62] Nursyamsi Nursyamsi and Winner Zebua. The Influence of Pet Plastic Waste Gradations as Coarse Aggregate Towards Compressive Strength of Light Concrete. *Procedia Engineering*, 171:614–619, December 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.394.
- [63] Ángela Corvalán Rivas, Andrea Maldonado Núñez, Delia Cohenca, Magna M. Monteiro, and Belen Martinez-Pavetti. Evaluation of compressive strength in samples with cement and PET aggregate mixtures [Cartel de presentación], 2018.
- [64] V. Tserki, C. Panayiotou, and N. E. Zafeiropoulos. A Study of the Effect of Acetylation and Propionylation on the Interface of Natural Fibre Biodegradable Composites. *Advanced Composites Letters*, 14(2):1110–1118, March 2005. ISSN 2633-366X. doi: 10.1177/096369350501400202. URL <https://doi.org/10.1177/096369350501400202>. Publisher: SAGE Publications Ltd.
- [65] Wei-ming Wang, Zai-sheng Cai, and Jian-yong Yu. Study on the Chemical Modification Process of Jute Fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 3(2), June 2008. doi: 10.1177/155892500800300203.
- [66] Richard K. Cullen, Miggy Singh, and John Summerscales. Characterisation of Natural Fibre Reinforcements and Composites. *Journal of Composites*, page Article ID 416501, December 2013. doi: 10.1155/2013/416501.

- [67] Maria Fidelis, Thatiana Pereira, Otavio Gomes, Flávio Silva, and Romildo Toledo Filho. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2:149–157, April 2013. doi: 10.1016/j.jmrt.2013.02.003.
- [68] Vishvendra Meena and Avtar Saroya. *Study of mechanical properties of hybrid natural fiber composite*. PhD thesis, National Institute of Technology Rourkela, Rourkela, 2011. URL <http://ethesis.nitrkl.ac.in/2155/>.
- [69] Daniel Pasquini, Eliangela de Moraes Teixeira, Antonio Aprigio da Silva Curvelo, Mohamed Naceur Belgacem, and Alain Dufresne. Surface esterification of cellulose fibres: Processing and characterisation of low-density polyethylene/cellulose fibres composites. *Composites Science and Technology*, 68(1):193–201. ISSN 0266-3538. URL https://www.academia.edu/30668207/Surface_esterification_of_cellulose_fibres_Processing_and_characterisation_of_low_density_polyethylene_cellulose_fibres_composites.
- [70] Sofia Lima Bessa, H. Varum, Almir Sales, and Victor Neto. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 35: 829–837, June 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127.
- [71] Mohit Sood and Gaurav Dwivedi. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4):775–783, December 2018. ISSN 1110-0621. doi: 10.1016/j.ejpe.2017.11.005. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110062117301939>.
- [72] Valcineide Tanobe, Thais Sydenstricker, Marilda Munaro, and Sandro Amico. A comprehensive characterization of chemically treated Brazilian sponge-gourds (*Luffa cylindrica*). *Polymer Testing*, 24:474–482, June 2005. doi: 10.1016/j.polymertesting.2004.12.004.

- [73] Jian Hu Shen, Mike Xie, Xiao Dong Huang, Shi Wei Zhou, and Dong Ruan. Compressive Behavior of Luffa Sponge Material at High Strain Rate. *Key Engineering Materials*, 535-536:465–468, 2013. ISSN 1662-9795. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.535-536.465. URL <https://www.scientific.net/KEM.535-536.465>. Conference Name: Advances in Engineering Plasticity XI ISBN: 9783037855485 Publisher: Trans Tech Publications Ltd.
- [74] Guillermo Guzmán Díaz. Aspectos técnicos sobre el cultivo de paste (Luffa cylindrica), 1997. URL <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-5115.pdf>.
- [75] Construcción con Esponja Vegetal y Plásticos Recicladados en Paraguay gana premio Rolex Awards, December 2008. URL <https://arquitectos.com.py/2008/12/construccion-con-esponja-vegetal-y-plasticos-recicladados-en-paraguay-gana-premio-rolex-awards/>.
- [76] Dilara Kocak, N. Merdan, Metin Yuksek, and E. Sancak. Effects of Chemical Modifications on Mechanical Properties of Luffa cylindrica. *Asian Journal of Chemistry*, 25:637–641, February 2013. doi: 10.14233/ajchem.2013.11813.
- [77] Gilberto Siqueira, Julien Bras, and Alain Dufresne. Luffa cylindrica as a lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose, and cellulose nanocrystals. *BioResources*, 5(2):727–740, February 2010. ISSN 1930-2126. URL https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_05_2_0727_Siqueira_BD_Luffa_lignocel_MFC_nanocryst. Number: 2.
- [78] Yuxia Chen, Na Su, Kaiting Zhang, Zhu Shiliu, Lei Zhao, Fei Fang, Linyan Ren, and Yong Guo. In-Depth Analysis of the Structure and Properties of Two Varieties of Natural Luffa Sponge Fibers. *Materials*, 10(5):479, April 2017. doi: 10.3390/ma10050479.

- [79] Jianhu Shen, Yi Xie, X. Huang, Shiwei Zhou, and Dong Ruan. Mechanical properties of luffa sponge. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 15:141–152, July 2012. doi: 10.1016/j.jmbbm.2012.07.004.
- [80] Base ECTA. » Galería » Basecta.org.py | educación, comunicación y tecnología alternativa. URL <http://www.basecta.org.py/V1/galeria/>.
- [81] Benjamin Caballero, Paul Finglas, and Fidel Toldrá, editors. *Encyclopedia of Food and Health*. Academic Press, August 2015. ISBN 978-0-12-384953-3.
- [82] K. G. Satyanarayana, J. L. Guimarães, and F. Wypych. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7):1694–1709, July 2007. ISSN 1359-835X. doi: 10.1016/j.compositesa.2007.02.006. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X07000279>.
- [83] J.L. Guimarães, Elisabete Frollini, C.G. Silva, Fernando Wypych, and K.G. Satyanarayana. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, 30: 407–415, November 2009. doi: 10.1016/j.indcrop.2009.07.013.
- [84] Elsa Zaldívar, José Garcete, Luis Lugo, and Ylse Peralta. Cultivo, manejo y cosecha de la esponja vegetal en Paraguay, 2008. URL <http://www.basecta.org.py/V1/uploads/2010/08/Cultivo-Manejo-y-Cosecha-de-la-Esponja-Vegetal.pdf>.
- [85] L. Ghali, Slah Msahli, Mondher Zidi, and Sakli Faouzi. Effect of pre-treatment of Luffa fibres on the structural properties. *Materials Letters*, 63:61–63, January 2009. doi: 10.1016/j.matlet.2008.09.008.
- [86] Nuno A. Dias, Mírian Xavier, N. G. Malaquias, E. P. Santos, and M. L. P. Silva. Isolamento da celulose de bucha vegetal (*Luffa cylindrica*) via diferentes tratamentos químicos para geração

- de material de reforço. In *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, pages 14369–14376, Florianópolis, 2014. doi: 10.5151/CHEMENG-COBEQ2014-2050-16118-155945.
- [87] CA Boynard and José Roberto D’Almeida. Morphological characterization and mechanical behavior of sponge gourd (*Luffa cylindrica*) - Polyester composite materials. *POLYM.-PLAST. TECHNOL. ENG.*, 39(3):489–499, July 2010. doi: 10.1081/PPT-100100042.
- [88] B. Nagarajaganesh and Rengarajan Muralikannan. Extraction and Characterization of Ligno-Cellulosic Fibers From *Luffa Cylindrica* Fruit. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 21, January 2016. doi: 10.1080/1023666X.2016.1146849.
- [89] Gonzalo Martínez-Barrera, Miguel Martínez-López, and Elisa Martínez-Cruz. Concreto Polimérico Reforzado con Fibras de *Luffa*. *Información tecnológica*, 24:15–16, 2013. doi: 10.4067/S0718-07642013000400008.
- [90] Maria Kalionara de Freitas Mota. *Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de bucha vegetal luffa cylindrica*. Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, February 2016. URL <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/21147>. Accepted: 2016-08-12T23:50:08Z Publisher: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [91] Mazen Alshaaer and T. Fahmy. Fabrication, microstructural and mechanical characterization of *Luffa Cylindrical Fibre* - Reinforced geopolymer composite. *Applied Clay Science*, 143:125–133, March 2017. doi: 10.1016/j.clay.2017.03.030.
- [92] Henry Colorado, S. Colorado, and Robison Buitrago-Sierra. Portland Cement with *Luffa* fibers. In *Development in Strategic Ceramic Materials: A Collection of Papers Presented at the 39th International Conference on Advanced Ceramics and Composites*, pages 103–111. The

- American Ceramic Society, Florida, December 2015. ISBN 978-1-119-21173-0. doi: 10.1002/9781119211747.ch9.
- [93] José Souza, Leila Motta, Daniel Pasquini, Júlia Vieira, and Cristiane Pires. Modificação química superficial de fibras de bucha vegetal visando à compatibilização e aplicação como reforço em matriz cimentícia. *Ambiente Construído*, 17:269–283, June 2017. doi: 10.1590/s1678-86212017000200157.
 - [94] Victor Antunes Querido. *Estudo da Inserção de Fibra de Bucha Vegetal como Reforço Estrutural em Matrizes Cimentícias*. Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
 - [95] Pâmela Cristina, Pedro Salomão, Luíza Cangussú, and Paulo Carvalho. Tijolo solo cimento com adição de fibra vegetal: uma alternativa na construção civil. *Research, Society and Development*, 7(9):01–18, May 2018. doi: 10.17648/rsd-v7i9.439.
 - [96] Asociación Paraguaya de Carreteras. Manual de Carreteras del Paraguay - Volumen 6.1: Ensayos de Suelos, 2019. URL https://apcarreteras.org.py/?page_id=2620.
 - [97] American Society of Testing and Materials. ASTM D4318: Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, 1984.
 - [98] American Society of Testing and Materials. ASTM D422: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 2007.
 - [99] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento, 2013.
 - [100] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 8492 – Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio, 2012.

- [101] Ángela Corvalán Rivas and Andrea Maldonado Núñez. *Elaboración y determinación de propiedades de ladrillos ecológicos de material compuesto cerámico con agregado de cemento y PET reciclado*. Grado, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, 2019.
- [102] B. V. Venkatarama Reddy and Ajay Gupta. Strength and Elastic Properties of Stabilized Mud Block Masonry Using Cement-Soil Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering - J MATER CIVIL ENG*, 18, June 2006. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(472).
- [103] P. Walker. Characteristics of pressed earth block in compression. In *undefined*, Tongji University, Shanghai, 1997. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/Characteristics-of-pressed-earth-block-in-Walker/2a1c48c6f1709486d765644b6e4350426e2d2761>.
- [104] Robert Panowicz, Marcin Konarzewski, Tomasz Durejko, Mateusz Szala, Magdalena Łazińska, Magdalena Czerwińska, and Piotr Prasula. Properties of Polyethylene Terephthalate (PET) after Thermo-Oxidative Aging. *Materials*, 14, July 2021. doi: 10.3390/ma14143833.
- [105] Cementos Yguazu. Productos – Yguazu Cementos, October 2021. URL <http://yguazucementos.com.py/productos/>.
- [106] Xiyue An, Qianqian Sui, Fangfang Sun, Zhiyuan Ma, Shu Jiang, Bing Ji, and Hualin Fan. Compression Responses of Bio-Cellular Luffa Sponges. *BioResources*, 10(4):8426–8438, 2015.
- [107] L. Segal, J.J. Creely, A.E. Martin, and C.M. Conrad. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal*, 29(10):786–794, October 1959. ISSN 0040-5175. doi: 10.1177/004051755902901003. URL <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>. Publisher: SAGE Publications Ltd STM.
- [108] Chifaa Ad, M. Benalia, Y. Laidani, Hicham Elmsellem, F. Saffedine, I. Nouacer, Djedid Mebrouk, Bennasser El Mahi, and B. Hammouti.

- Adsorptive removal of cadmium from aqueous solution by *Luffa cylindrica*: Equilibrium, dynamic and thermodynamic. *Der Pharma Chemica*, Volume 7:388–397, December 2015.
- [109] Chhatrapati Parida, Sarat Kumar Dash, and Chinmay Pradhan. FTIR and Raman Studies of Cellulose Fibers of *Luffa cylindrica*. *Open Journal of Composite Materials*, 05, January 2015. doi: 10.4236/ojcm.2015.51002.
- [110] Mizi Fan, Dasong Dai, and Biao Huang. 3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Natural Fibres. *Fourier Transform-Materials Analysis*, pages 45–68, May 2012. ISSN 978-953-51-0594-7. doi: 10.5772/35482.
- [111] Viola Hospodarova, Eva Singovszka, and Nadezda Stevulova. Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials. *American Journal of Analytical Chemistry*, 09:303–310, January 2018. doi: 10.4236/ajac.2018.96023.
- [112] Y Yang, Y Zhang, Y Lang, and M Yu. Structural ATR-IR analysis of cellulose fibers prepared from a NaOH complex aqueous solution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 213(1):012039, June 2017. doi: 10.1088/1757-899X/213/1/012039.
- [113] Diana Parada Quinayá and José Roberto d’Almeida. Nondestructive characterization of epoxy matrix composites reinforced with *Luffa lignocellulosic* fibers. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(2), January 2017. doi: 10.1590/s1517-707620170002.0181.
- [114] Jie Gong, Jun Li, Jun Xu, Zhouyang Xiang, and Lihuan Mo. Research on cellulose nanocrystals produced from cellulose sources with various polymorphs. *RSC Adv.*, 7:33486–33493, June 2017. doi: 10.1039/C7RA06222B.