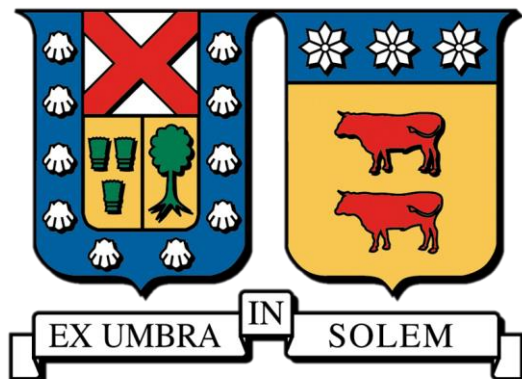


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



**DESARROLLO FOTOQUÍMICO DE UN MATERIAL A
PARTIR DE RESIDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO
CON POTENCIAL USO EN APLICACIONES
SOSTENIBLES**

BÁRBARA CONSTANZA AVILÉS ZAPATA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO/A
CIVIL QUÍMICO/A**

**PROFESORA GUÍA: DRA. ADRIANA C. MERA
PROFESOR CO-REFERENTE: DR. ROBERTO DURÁN NOVOA**

JULIO-2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desarrollo fotoquímico de un material a partir de residuos de poliestireno expandido con potencial uso en aplicaciones sostenibles.

Nombre del candidato(a): Bárbara Constanza Avilés Zapata

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química

Campus: San Joaquín **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Adriana C. Mera, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 07-09-2026 Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07-09-2026 Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

La presente investigación aborda la problemática ambiental asociada al poliestireno expandido (EPS) en Chile, material del cual se generan aproximadamente 20.000 toneladas de residuos al año, cuya valorización se ve limitada por su baja densidad, elevado volumen y altos costos de transporte. En este contexto, el objetivo de este trabajo consiste en desarrollar y caracterizar un material de matriz polimérica obtenido mediante una ruta de curado fotoquímico, revalorizando residuos de EPS de embalaje y utilizando d-limoneno como solvente de origen natural, con potencial aplicación en el área de la construcción.

La metodología se basa en la disolución controlada del EPS en d-limoneno, seguida por la incorporación del fotoiniciador 2,2-dimetoxi-2-fenilacetofenona (DMPA) para inducir la reticulación del sistema mediante irradiación ultravioleta (365 nm). Posteriormente, se optimizan las variables de concentración de DMPA (1,5% - 5,0%) y un tiempo de exposición UV (60-120 minutos) mediante un diseño experimental factorial de superficie de respuesta implementado en el software MODDE PRO-13. El material obtenido fue caracterizado mediante ensayos mecánicos de tracción y dureza, complementados con análisis químicos y térmicos que incluyen espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) y análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés).

Los resultados evidencian que el curado fotoquímico permite transformar la resina viscoelástica en una red polimérica tridimensional estable, acelerando el proceso de consolidación al reducir el tiempo de secado desde 21 días por evaporación natural a 10 días. Las condiciones optimizadas corresponden a una concentración de 1,5 % de DMPA y 60 minutos de irradiación UV, obteniéndose una resistencia máxima a la tracción de 4,69 MPa y una tenacidad de 7,10 MPa para una concentración de 1,5 % de DMPA y 90 minutos de irradiación UV. Asimismo, los análisis térmicos confirman la formación de una estructura reticulada mediante la desaparición de la temperatura de transición vítrea en DSC, mientras que el TGA evidencia una elevada estabilidad térmica y ausencia de residuos inorgánicos significativos.

El material desarrollado supera la tensión admisible de 4,1 MPa establecida por la Norma Chilena NCh1990 para la madera de grado estructural de grado N°4 clase f7 y demuestra un desempeño mecánico superior al del EPS convencional, estos resultados son favorables, pero no una validación definitiva para reemplazar estos materiales. Para validar esta opción, se recomienda complementar esta investigación mediante ensayos mecánicos de fluencia, fatiga y compresión a largo plazo, con el fin de validar su desempeño y fortalecer su contribución a estrategias de economía circular.

Abstract

This research addresses the environmental challenge associated with expanded polystyrene (EPS) in Chile, where approximately 20,000 tons of EPS waste are generated annually. The valorization of this material is hindered by its low density, high volume, and elevated transportation costs. In this context, the objective of this study is to develop and characterize a polymeric matrix material obtained via photochemical curing from revalorized post-consumer EPS packaging waste, using d-limonene as a bio-based solvent, with potential applications in the construction sector.

The proposed methodology is based on the controlled dissolution of EPS in d-limonene, followed by the incorporation of the photoinitiator 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPA) to induce polymer network crosslinking under ultraviolet irradiation (365 nm). Subsequently, the effects of DMPA concentration (1.5–5.0 wt.%) and UV irradiation time (60–120 minutes) were optimized using a factorial experimental design coupled with response surface methodology implemented in MODDE Pro 13 software. The resulting materials were characterized through tensile and hardness mechanical tests, complemented by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), and thermogravimetric analysis (TGA).

The results demonstrate that photochemical curing transforms the viscoelastic resin into a stable, three-dimensional, crosslinked polymeric network, significantly accelerating consolidation by reducing drying time from 21 days under natural evaporation to 10 days. The optimal processing conditions were 1.5 wt.% DMPA and 60 min of UV irradiation, yielding a maximum tensile strength of 4.69 MPa. The highest toughness, 7.10 MPa, was obtained using the same DMPA concentration with 90 min of UV irradiation. Furthermore, DSC analysis confirmed the formation of the crosslinked structure through the disappearance of the glass transition temperature, while TGA results revealed high thermal stability and the absence of significant inorganic residues.

The developed material exceeds the allowable tensile stress of 4.1 MPa established by the Chilean Standard NCh1990 for Grade No. 4, F7 structural timber, and exhibits superior mechanical performance compared with conventional EPS. Although these findings demonstrate the material's potential as a sustainable alternative for low-load structural applications in the construction sector, they do not constitute definitive validation of its use as a replacement for conventional construction materials. Therefore, further studies involving long-term compression, creep, fatigue, and durability testing are recommended to validate its in-service performance and strengthen its contribution to circular economy strategies.

Agradecimientos

Primero que todo, quisiera agradecer a mi familia. A mi mamá Estefanía y a mi papá Jorge, cuyo apoyo incondicional ha sido el pilar de mi vida y mi mayor fortaleza durante mi paso por la universidad. A mi hermano Jorge, quien siempre está ahí junto con mi cuñada Fali para darme un consejo y una sonrisa o sacarme de la rutina, haciendo que estos años fueran mucho más llevaderos. Y, por supuesto, a mi perrito Loki, a quien adopté durante la pandemia y se convirtió en mi fiel acompañante durante largas noches realizando trabajos e informes.

A mi pareja Álvaro, quien ha sido mi familia durante estos años lejos de casa y pronto cumpliremos 9 años juntos. Has estado a mi lado desde el momento en que elegí esta carrera, dándome ánimos y siendo mi apoyo tanto en los buenos como en los malos momentos. Sin ti, este camino habría sido mucho más difícil. Extiendo este agradecimiento a mi suegra Delia, por entregarme siempre palabras de aliento, refuerzo y contención cada vez que ha podido.

A mis amigos de Rancagua, Vale, Leo, Abby, Pipe, Rolo y Carli, porque sin importar que todos estuviéramos estudiando carreras distintas siempre sacamos el tiempo para vernos, recordar viejos momentos y crear nuevos. A los grandes amigos que me regalaron estos años de estudio Cata, Anto, Catita, Javi, Diego, Seba, Cris, Garay y Peña, se me hizo difícil encontrarlos, pero llegaron en el momento que más lo necesitaba. Un reconocimiento especial a Jesús, quien me ha acompañado desde las clases online hasta el final, siempre dispuesto a ayudarme y a explicarme con paciencia cada vez que lo necesité.

Finalmente, deseo expresar mi más sincera y profunda gratitud a mi profesora guía, Adriana Mera. Su respaldo ha sido absolutamente fundamental en cada etapa de todo este proceso. Gracias por su entrega, por su dedicación, por confiar ciegamente en mis capacidades y por brindarme la guía y la motivación necesarias para no rendirme nunca. Su compromiso y calidad humana fueron claves para que yo pudiera crecer y consolidarme como profesional, y por ello le estaré eternamente agradecida. Agradezco también al profesor Roberto Durán, por confiar en mí y darme la valiosa oportunidad de desarrollar esta investigación. Por último, pero no menos importante, infinitas gracias a María Victoria Riquelme, nuestra querida Vicky, por su incondicional disposición y apoyo dentro del laboratorio, los cuales fueron indispensables para materializar con éxito este trabajo.

Índice

1. Exposición del problema	1
1.1. Contexto global y crisis de los plásticos de origen fósil	1
1.2. Desafíos logísticos e impactos del poliestireno	2
1.3. Realidad nacional y marco regulatorio en Chile	3
1.4. Propuesta de solución	3
2. Marco teórico	4
2.1. Polímeros y plásticos	4
2.2. Fundamentos de sostenibilidad y economía circular	5
2.3. Materiales compuestos	7
2.4. El poliestireno expandido	7
2.5. El d-limoneno. Solvente, ligante y agente natural	10
2.6. Principios de la fotoquímica y radiación UV	12
2.7. Mecanismos de secado y curado por fotoactivación	14
2.8. Propiedades para aplicaciones en construcción	16
2.9. Técnicas de caracterización de materiales compuestos	20
3. Estado del arte	21
3.1. Gestión y revalorización de residuos de poliestireno expandido (EPS)	21
3.2. Desarrollo de materiales compuestos basados en EPS y solvente natural	24
3.3. Tecnologías de curado acelerado en materiales poliméricos y compuestos	25
4. Hipótesis	26
5. Objetivos	26
5.1. Objetivo general.	26
5.2. Objetivos específicos	26
6. Materiales y métodos	27
6.1. Recolección del EPS de embalaje y acondicionamiento	27
6.2. Ensayos preliminares y optimización de las variables críticas del proceso	29
6.3. Procedimiento de obtención del material y diseño experimental factorial	34
6.4. Validación del modelo factorial	37
6.5. Caracterización del material polimérico obtenido bajo condiciones optimizadas	38

6.5.1.	Caracterización mecánica del material	38
6.5.2.	Caracterización química del material	40
6.6.	Posibles aplicaciones sostenibles del material obtenido.....	41
7.	Análisis de resultados	42
7.1.	Análisis de los ensayos de tracción preliminares	42
7.2.	Análisis estadístico del modelo MODDE PRO-13	44
7.3.	Análisis de efectos del modelo	45
7.4.	Superficie de respuesta y región optimizada de predicción	46
7.5.	Validación experimental de los parámetros optimizados en el rango de estudio	48
7.6.	Caracterización del material compuesto.....	51
7.6.1.	Análisis de propiedades mecánicas	51
7.6.2.	Análisis químico mediante espectroscopía FITR	56
7.6.3.	Análisis térmico mediante DSC y TGA	60
8.	Conclusiones y recomendaciones	68
8.1.	Conclusiones.....	68
8.2.	Recomendaciones	69
9.	Referencias.....	71
10.	Anexos	78
	Anexo A. Datos de ensayos de tracción.....	78
A.1.	Material compuesto optimizado (1,5% DMPA, 90 minutos UV)	78
A.2.	Material compuesto optimizado (1,1% DMPA, 90 minutos UV)	79
A.3.	Material de control (Sin DMPA).....	79
A.4.	Material acrílico.....	80
A.5.	Material MDF	80
A.6.	Material silicona vegetal.....	81
	Anexo B. Metodología cálculos mecánicos	81
B.1.	Cálculo del Módulo de Elasticidad (Módulo de Young)	81
B.1.1.	Obtención del módulo de young 1,5% DMPA y 90 minutos UV	82
B.1.2.	Obtención del módulo de young 1,1% DMPA y 90 minutos UV	82
B.1.3.	Obtención del módulo de young sin DMPA.....	83
B.2.	Cálculo de la Tenacidad.....	83

B.2.1. Obtención de la tenacidad 1,5% DMPA y 90 minutos UV	84
B.2.2. Obtención de la tenacidad del acrílico	84
B.2.3. Obtención de la tenacidad del MDF	85
B.2.4. Obtención de la tenacidad de la silicona vegetal.....	85
Anexo C. Datos de dureza.....	86

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de plásticos según estándar internacional ASTM D7611/D7611M...	6
Tabla 2. Propiedades físicas y químicas del d-limoneno.....	10
Tabla 3. Matriz de condiciones para ensayos preliminares de tracción.....	33
Tabla 4. Matriz de diseño experimental factorial para la optimización del proceso.	35
Tabla 5. Parámetros evaluados y resultados de los ensayos preliminares de tracción.	43
Tabla 6. Matriz de diseño experimental factorial con resultados.	44
Tabla 7. Propiedades mecánicas predichas por el modelo (1,5% DMPA).....	48
Tabla 8. Propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente (1,5% DMPA)	48
Tabla 9. Propiedades mecánicas predichas por el modelo (1,1% DMPA).....	48
Tabla 10. Propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente (1,1% DMPA).....	49
Tabla 11. Propiedades mecánicas de las probetas sometidas a ensayos de tracción.	52
Tabla 12. Comparativa de propiedades mecánicas entre el material compuesto optimizado (1,5% DMPA, 90 minutos UV) y referentes comerciales.....	54
Tabla 13. Dureza superficial promedio (Shore D) de las muestras evaluadas.	56
Tabla 14. Datos de ensayo tracción (1,5% DMPA, 90 minutos UV).....	78
Tabla 15. Datos de ensayo de tracción (1,1% DMPA, 90 minutos UV).	79
Tabla 16. Datos de ensayo de tracción (sin DMPA).....	79
Tabla 17. Datos de ensayo de tracción (Acrílico).	80
Tabla 18. Datos de ensayo de tracción (Tablero MDF).	80
Tabla 19. Datos de ensayo de tracción (Silicona vegetal).	81
Tabla 20. Valores de dureza Shore D correspondiente a los experimentos de superficie de respuesta.	86

Lista de Figuras

Figura 1. Evolución histórica y proyección del volumen de la producción global de plásticos [2].	1
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso industrial de fabricación de EPS.	8
Figura 3. Curva de esfuerzo-deformación idealizada para polímeros [55].	18
Figura 4. Geometría tipo mancuerna de las probetas para ensayo de tracción.	19
Figura 5. Residuos de EPS recolectados para el proceso de revalorización.	27
Figura 6. EPS fraccionado mediante corte por resistencia eléctrica.	27
Figura 7. Molino de impacto de rotor utilizado en la tritución del EPS.	28
Figura 8. Densificación mecánica del EPS en el molino de impacto usado.	28
Figura 9. Película delgada obtenida de la mezcla de EPS/d-limoneno.	29
Figura 10. Evidencia de degradación térmica y nucleación de burbujas en mezcla sobresaturada.	29
Figura 11. Material consolidado en el punto de saturación.	30
Figura 12. Fotoiniciador DMPA utilizado en los ensayos experimentales.	30
Figura 13. Ensayo de fotopolimerización mediante radiación UV de baja densidad.	30
Figura 14. Ensayo de fotopolimerización bajo lámparas de irradiancia fluctuante.	31
Figura 15. Molde inicial para probeta tipo IV según ASTM D638-22 en filamento TPU.	31
Figura 16. Diseño optimizado de molde perimetral bajo norma ASTM D638-22.	32
Figura 17. Probetas desarrolladas sometidas a ensayos de tracción.	32
Figura 18. Incorporación gradual de EPS en la solución de d-limoneno con fotoiniciador.	36
Figura 19. Homogeneización manual del material.	36
Figura 20. Proceso de consolidación fotoquímica de probetas bajo radiación UV controlada.	37
Figura 21. Disposición de lámpara UV para el curado del material en los moldes impresos en 3D.	37
Figura 22. Set de probetas fabricadas según matriz de diseño experimental del software MODDE PRO-13.	38
Figura 23. Posicionamiento del durómetro sobre un polímero en superficie plana [71].	40
Figura 24. Curvas de fuerza (N) vs. deformación (mm) para ensayos preliminares.	42
Figura 25. Efectos de las variables de entrada entregado por MODDE PRO-13.	46
Figura 26. Mapa de contorno de la superficie de respuesta para la resistencia a la tracción.	47
Figura 27. Distribución de los moldes 3D sobre placa de Petri.	49
Figura 28. Curvas de esfuerzo-deformación comparativas para muestras curadas y el control.	51
Figura 29. Curvas de esfuerzo-deformación comparativas para muestra 1,5% DMPA y materiales comerciales.	53

Figura 30. Espectros FTIR comparativos entre EPS virgen, muestra de control (sin DMPA) y material compuesto optimizado (1,5% DMPA, 90 minutos UV).	57
Figura 31. Espectros FTIR comparando probetas con 1,5% DMPA a 60, 90 y 120 minutos de exposición UV.	58
Figura 32. Curvas del pico característico a 695 cm^{-1} en distintas condiciones experimentales.	59
Figura 33. Curvas TGA Y DTG para EPS virgen.	60
Figura 34. Curvas DSC para el EPS virgen.	61
Figura 35. Curvas TGA y DTG para 1,5% DMPA y 60 minutos UV.	62
Figura 36. Termograma DSC para material con 1,5% DMPA y 60 minutos UV.	63
Figura 37. Curvas TGA y DTG para 1,5% DMPA y 90 minutos UV.	63
Figura 38. Termograma DSC para material con 1,5% DMPA y 90 minutos UV.	64
Figura 39. Curvas TGA y DTG para 1,5% DMPA y 120 minutos UV.	65
Figura 40. Termograma DSC para material con 1,5% DMPA y 120 minutos UV.	65
Figura 41. Curvas TGA comparativas para EPS virgen y probetas curadas (1,5% DMPA).	66
Figura 42. Ajuste lineal para determinación de modulo elástico (1,5% DMPA, 90 minutos UV).	82
Figura 43. Ajuste lineal para determinación de modulo elástico (1,1% DMPA, 90 minutos UV).	82
Figura 44. Ajuste lineal para determinación de modulo elástico (Sin DMPA).	83
Figura 45. Integración del área bajo la curva para tenacidad (1,5% DMPA, 90 minutos UV).	84
Figura 46. Integración del área bajo la curva para tenacidad (Acrílico).	84
Figura 47. Integración del área bajo la curva para tenacidad (MDF).	85
Figura 48. Integración del área bajo la curva para tenacidad (Silicona vegetal).	85

Nomenclatura

Siglas y Acrónimos

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>).	GEI	Gases de Efecto Invernadero.
ASTM	Sociedad estadounidense para Pruebas y Materiales (<i>American Society for Testing and Materials</i>).	GPPS	Poliestireno de Propósito General (<i>General Purpose Polystyrene</i>).
Can	Cantidad	HIPS	Poliestireno de Alto Impacto (<i>High Impact Polystyrene</i>).
DMPA	2,2-Dimetoxi-2-fenilacetofenona (fotoiniciador).	IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (<i>International Agency for Research on Cancer</i>).
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>).	MDF	Tablero de Fibra de Densidad Media (<i>Medium Density Fiberboard</i>).
DTG	Derivada termogravimétrica (<i>Derivative Thermogravimetric</i>)	NO_x	Óxidos de Nitrógeno.
EPP	Polipropileno Expandido (<i>Expanded Polypropylene</i>).	OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
EPS	Poliestireno Expandido (<i>Expanded Polystyrene</i>).	PA	Poliamida (Comúnmente conocida como Nylon).
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (<i>Fourier-Transform Infrared Spectroscopy</i>).	PC	Policarbonato.
		PEAD-HDPE	Polietileno de Alta Densidad (<i>High-Density Polyethylene</i>).

PEBD-LDPE	Polietileno de Baja Densidad (<i>Low-Density Polyethylene</i>).	TGA	Análisis termogravimétrico (<i>Thermogravimetric Analysis</i>).
PET	Tereftalato de Polietileno (<i>Polyethylene Terephthalate</i>).	Tie	Tiempo.
POM	Polioximetileno o Poliacetal.	TPU	Poliuretano Termoplástico (<i>Thermoplastic Polyurethane</i>).
PP	Polipropileno.	UV	Ultravioleta.
PS	Poliestireno.	UV-A	Radiación Ultravioleta de onda larga.
PVC	Policloruro de Vinilo (<i>Polyvinyl Chloride</i>).	UV-B	Radiación Ultravioleta de onda media.
REP	Responsabilidad Extendida del Productor	UV-C	Radiación Ultravioleta de onda corta.
SAN	Estireno Acrilonitrilo (<i>Styrene Acrylonitrile</i>).	XPS	Poliestireno Extruido (<i>Extruded Polystyrene</i>
SPI	Sociedad de la Industria del Plástico (<i>Society of the Plastics Industry</i>).		

Variables

A_0	Área de la sección transversal inicial de la zona útil de cada probeta.	ΔL	Elongación registrada por el equipo de ensayo de tracción.
E	Energía de un fotón.	ΔS	Variación de entropía.
E	Módulo de elasticidad (Módulo de Young).	δ	Parámetro de solubilidad de Hildebrand.
F	Fuerza aplicada.	δ_1	Parámetro de solubilidad del solvente.
h	Constante de Planck.	δ_2	Parámetro de solubilidad del polímero.
L_0	Longitud inicial de la zona útil de cada probeta.	ϵ	Deformación unitaria.
Q^2	Coefficiente de predictibilidad.	λ	Longitud de onda.
R^2	Coefficiente de determinación.	σ	Esfuerzo aplicado.
T	Temperatura.	σ_f	Esfuerzo de fractura.
T_g	Temperatura de transición vítrea.	σ_{lp}	Límite de proporcionalidad.
V	Volumen.	σ_u	Esfuerzo último.
ν	Frecuencia de la radiación.	σ_y	Límite elástico o esfuerzo de fluencia.
ΔG	Variación de la energía libre de Gibbs.	ϕ_1	Fracción volumétrica del solvente.
ΔH	Variación de entalpía.	ϕ_2	Fracción volumétrica del polímero.

Unidades

%	Porcentaje.	kN	Kilonewton.
°C	Grados Celsius.	L	Litro.
°C/min	Grados Celsius por minuto.	m³	Metro cúbico.
cm⁻¹	Centímetro recíproco.	mL	Mililitro.
g/m³	Gramo por metro cúbico.	mL/min	Mililitro por minuto.
g/mol	Gramo por mol.	mm	Milímetro.
J/(mol·K)	Joule por mol Kelvin.	mm²	Milímetro cuadrado.
J/mol	Joule por mol.	MPa	Megapascal.
J·s	Joule-segundo.	MPa^{0.5}	Megapascal raíz.
K	Kelvin.	Mt	Megatonelada.
kg	Kilogramo.	N	Newton.
kg CO₂	Kilogramo de dióxido de carbono.	nm	Nanómetro.
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico.	rpm	Revoluciones por minuto.
kJ/mol	Kilojoule por mol.	s⁻¹	Segundo a la menos uno.
		W·m⁻¹·K⁻¹	Watt por metro Kelvin.

1. EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA

1.1. CONTEXTO GLOBAL Y CRISIS DE LOS PLÁSTICOS DE ORIGEN FÓSIL

La producción global de plásticos ha experimentado un crecimiento exponencial, transitando desde 15 millones de toneladas en 1964 a 311 millones de toneladas (Mt) en 2014, fenómeno que se ha visto impulsado por la urbanización, el desarrollo económico y el aumento de la población [1]. Además, según las proyecciones actualizadas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo económicos (OCDE) se espera que la producción crezca desde 435 Mt en 2020 hasta 736 Mt en 2040 como se observa en la Figura 1 [2].

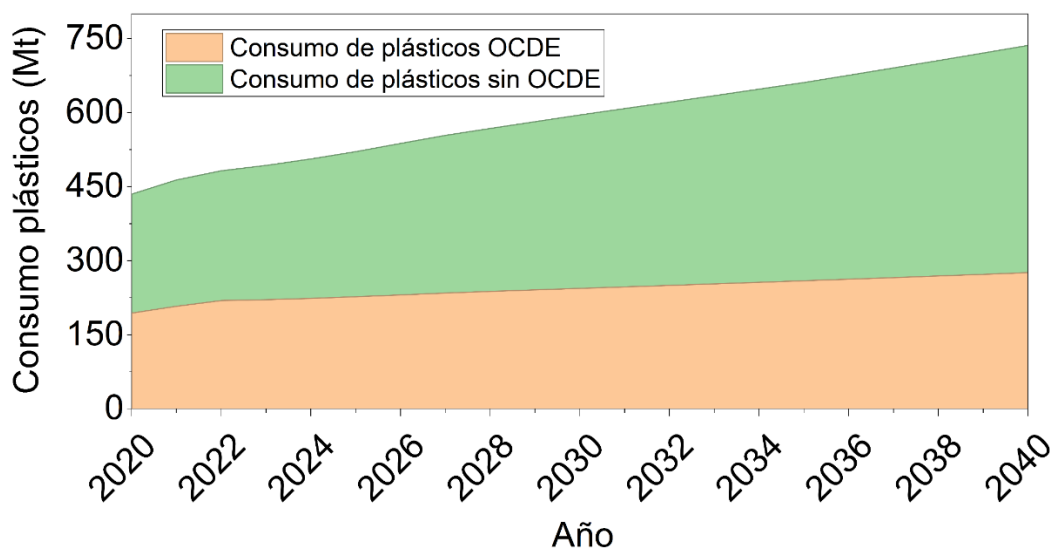


Figura 1. Evolución histórica y proyección del volumen de la producción global de plásticos [2].

En la actualidad, los residuos plásticos han adquirido mayor atención en comparación a otros tipos de desechos, principalmente por los efectos adversos que generan sobre los ecosistemas terrestres y marinos, tanto por su persistencia como por su acumulación [3]. De acuerdo con la OCDE, los avances en la gestión de residuos no igualarán este crecimiento, incluso se prevé que la generación de residuos plásticos escale a 617 Mt en 2040, con 119 Mt de residuos mal gestionados a nivel global. Esta deficiencia logística exacerbará la fuga de plásticos hacia el medio ambiente, provocando que el inventario acumulado en ríos y océanos se duplique, pasando de 152 Mt en 2020 a 300 Mt en 2040 [2].

En estos ecosistemas, se estima que, cada año 8 Mt de plásticos acaban en los océanos, los que posteriormente se fragmentan en microplásticos representando una amenaza latente en la salud humana debido a la bioacumulación de contaminantes tóxicos en la cadena trófica, situando este tipo de contaminación como uno de los principales desafíos ambientales de este siglo [4]. Dentro de esta crisis global, los plásticos de un solo uso y de difícil gestión logística, juegan un rol crítico que demanda alternativas urgentes de valorización y economía circular.

1.2. DESAFÍOS LOGÍSTICOS E IMPACTOS DEL POLIESTIRENO

La mayoría de los plásticos son fabricados a partir de materias primas derivadas de combustibles fósiles, por lo que su ciclo de vida está asociado a la extracción y consumo de recursos no renovables [5]. Dentro de esta categoría destaca el poliestireno expandido (EPS, según sus siglas en inglés), también conocido en Chile como “plumavit”. Se trata de un material termoplástico, cuya estructura está conformada en un 98% por aire y en un 2% por derivados del petróleo. Sus propiedades intrínsecas como su baja densidad, mínima absorción de agua y elevada capacidad de amortiguación, lo hacen indispensable en una variedad de productos como envases desechables, embalaje, aislamiento de viviendas y cubiertos [6].

Sin embargo, el EPS es considerado plástico de un solo uso, lo que genera problemas en su disposición final y acumulación de residuos tanto en vertederos como en ecosistemas naturales. Al ser no biodegradable, puede persistir durante siglos e incluso milenios, contribuyendo a la contaminación global y afectando a la biodiversidad. Si bien es un material reciclable, las tasas efectivas son bajas, esto se debe a su naturaleza voluminosa y bajo peso, lo que aumenta los costos logísticos de recolección y transporte [1, 7, 8].

La problemática del poliestireno expandido no se limita a su disposición final sino también a su producción, ya que esta genera impactos ambientales y para la salud humana. La producción de cada kilogramo (kg) de EPS genera aproximadamente 4 kilogramos de dióxido de carbono (kg CO₂), lo cual contribuye directamente a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) y al calentamiento global [9]. Se estima que, a escala global en el año 2019, la producción de este plástico emitió aproximadamente 48 millones de toneladas métricas de GEI, un volumen de contaminación equivalente a las emisiones generadas por 13 centrales eléctricas de carbón [10].

Adicionalmente, su síntesis depende de reacciones químicas que involucran compuestos como el benceno, etilbenceno y estireno, los cuales pueden permanecer en el producto final. El estireno, en particular, es tóxico para el sistema nervioso humano y se considera como un probable compuesto carcinógeno [11]. Además, estudios han demostrado que los químicos lixiviados del EPS pueden alterar los sistemas hormonales y metabólicos, vinculándose a enfermedades como la obesidad, cáncer, diabetes tipo 2 y problemas reproductivos [10].

Finalmente, la degradación física del EPS produce su fragmentación en microplásticos que son partículas de tamaño micrométrico, las cuales poseen la capacidad de translocarse en el cuerpo humano, habiéndose detectado en órganos como cerebro, pulmones, hígado, heces y médula ósea [1, 10]. Estas partículas no se pueden digerir, por lo que pueden causar obstrucción intestinal tanto en especies terrestres como acuáticas, además actúan como disruptores endocrinos que pueden dañar directamente las células y destruir los glóbulos rojos [12].

1.3. REALIDAD NACIONAL Y MARCO REGULATORIO EN CHILE

En Chile, se consumen aproximadamente 1,2 Mt de plástico al año, presentando una tasa de reciclaje que no supera el 10,3%, donde el poliestireno representa apenas el 1% del total de material reciclado [13, 14].

Ante este escenario, el Estado ha implementado marcos regulatorios para forzar la transición a una economía circular. En primer lugar, destaca la Ley 21.368 (conocida como la Ley de Plásticos y Productos de un Solo Uso), vigente desde el año 2021, la cual prohíbe la entrega de envases y artículos de poliestireno expandido en establecimientos de expendio de alimentos [15]. En segundo lugar, la Ley 20.920 o Ley Marco para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y Fomento al Reciclaje, obliga a los productores de envases y embalajes a organizar y financiar la gestión de los residuos derivados de sus productos tras su vida útil [16].

Sin embargo, a pesar de este avance regulatorio, la prohibición impuesta por la Ley 21.368 se restringe al sector gastronómico [17]. El EPS sigue siendo un material predominante y difícil sustitución en el sector de embalaje industrial y comercial, ya que es utilizado en la protección de equipos tecnológicos, mobiliario y en la cadena de frío [18]. La persistencia de su uso en el embalaje, sumada a las acumulaciones históricas en vertederos debido a los altos costos logísticos de su transporte, subraya la necesidad de desarrollar innovaciones para su gestión. Valorizar este material no es solo una opción ecológica, sino una exigencia para el cumplimiento de las metas impuestas por la Ley REP.

1.4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Una alternativa sostenible para el reciclaje del poliestireno expandido es la disolución química utilizando d-limoneno, un disolvente orgánico natural derivado de cítricos. Este proceso ha demostrado ser efectivo para transformar el EPS en una resina viscosa y maleable, debido a que tienen un parámetro de solubilidad de Hildebrand similar (δ) [6].

No obstante, esta ruta presenta dificultades en la cinética de solidificación, ya que el proceso actual de la mezcla de EPS y d-limoneno depende de un secado físico por evaporación gobernado por la presión de vapor. Dado que el punto de ebullición del solvente cítrico es alto (aproximadamente 177°C) [19], la energía de activación para su evaporación a temperatura ambiente es alta, resultando en una difusión lenta del solvente a través de la matriz polimérica [20], lo que ralentiza la producción y su viabilidad a gran escala.

Ante esto, la presente investigación propone una optimización basada en el curado fotoquímico. La solución consiste en incorporar un fotoiniciador, también conocido como fotoactivador directamente en la resina que se active con la radiación ultravioleta (UV) [21]. En lugar de esperar por la evaporación pasiva del solvente, la aplicación de la luz UV excita al fotoiniciador, generando radicales libres que atacan los dobles enlaces de la molécula de d-limoneno [8, 22].

Este proceso desencadena una reacción de reticulación (curado químico), permitiendo reducir los tiempos de procesamiento. Como resultado, se obtiene un material estable con propiedades mecánicas ideales para ser posiblemente implementado en el área de la construcción como revestimiento de interiores en zonas húmedas, núcleo para paneles aislantes y/o paneles decorativos [23].

2. MARCO TEÓRICO

2.1. POLÍMEROS Y PLÁSTICOS

Un polímero se define como una macromolécula, es decir una molécula de cadena larga formada por la repetición de unidades estructurales más simples llamadas monómeros [24]. Estas largas cadenas de átomos se unen mediante enlaces covalentes a través de una reacción química llamada polimerización. Esta estructura molecular, que puede repetirse desde decenas hasta miles de veces, confiere al material características como rigidez, ligereza y flexibilidad [1].

Los polímeros se clasifican según su origen en dos grandes categorías.

⇒ *Polímeros naturales*. Son macromoléculas de origen biológico, encontradas en plantas y animales, formadas por la repetición de monómeros. Son abundante en la naturaleza e incluyen la celulosa que forma las paredes celulares de las plantas, las proteínas como el ADN, la quitina y los polisacáridos como el almidón [1].

⇒ *Polímeros sintéticos*. Materiales fabricados por el ser humano mediante procesos de polimerización, reacciones químicas que transforman monómeros simples como el etileno en estructuras complejas de cadenas más largas. La mayoría de los monómeros utilizados para su síntesis son moléculas de base fósil derivadas del petróleo y el gas natural [24].

Los plásticos son polímeros a los que se le añade una serie de aditivos, como catalizadores, cargas, estabilizadores de luz y calor, antioxidantes, pigmentos, lubricantes y plastificantes, los cuales modifican sus propiedades para aplicaciones específicas y entregarle su capacidad de deformación plástica característica de estos materiales [24].

La distinción de los plásticos se basa en su comportamiento térmico y su estructura molecular interna según.

⇒ *Termoplásticos*. Son polímeros en los que las moléculas se mantienen unidas por fuerzas secundarias débiles. Su característica es que se ablandan cuando se exponen al calor y vuelven a su estado sólido cuando se enfrían. Este proceso es reversible y puede repetirse numerosas veces sin alterar significativamente la estructura química, lo que permite que sean procesados por métodos como extrusión, inyección y soplado [1].

⇒ *Termoestables*. Son polímeros que se solidifican de manera irreversible cuando se calientan, si se recalientan, se degradan o queman en vez de fluir. Poseen cadenas entrecruzadas que forman una red tridimensional rígida [1].

2.2. FUNDAMENTOS DE SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR

En la actualidad, las principales problemáticas son la degradación ambiental y el cambio climático, fenómenos que han sido acelerados por las emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero [25]. A nivel mundial, la extracción de materiales se ha duplicado desde 1980 y se proyecta que alcance las 100 gigatoneladas para el año 2030, lo que subraya la urgencia de gestionar mejor los recursos naturales [25]. Para lograr la sostenibilidad y mitigar el calentamiento global, es crucial que las naciones adopten estrategias que integren la energía verde, la innovación tecnológica y la economía circular [25].

Históricamente, la industria ha operado bajo una economía lineal, modelo que se caracteriza por no integrar los sistemas de reutilización y reciclaje, provocando un desequilibrio entre el consumo y la producción. Este enfoque de producir, usar y desechar ha generado una mayor contaminación, trayendo consigo riesgos ambientales y para la salud [25]. En contraste, la economía circular se reconoce como una herramienta esencial para la sostenibilidad, cuyo objetivo principal es “cerrar el ciclo” de los materiales, fomentando la reutilización y el reciclaje, contribuyendo a la reducción de los residuos, recortar las emisiones de GEI, conservar los recursos naturales y mejorar la calidad ambiental [25].

La economía circular busca que los productos permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo económico, transformando residuos en materia prima recuperada para evitar la extracción de recursos vírgenes. Este modelo se ha enfocado tradicionalmente en el principio de las “3R” (Reducir, Reutilizar y Reciclar), el cual ha ido evolucionando, incorporando la valorización [26]. En este contexto, la reducción es un enfoque preventivo que consiste en minimizar el uso y consumo de materias primas vírgenes y energía desde la etapa de diseño, para así disminuir la generación de residuos a lo largo del ciclo de vida del producto [27]. Por su parte, la reutilización es la acción mediante la cual un producto o componente es empleado nuevamente con la misma función o adaptado para un nuevo uso, sin involucrar un proceso productivo o transformación significativa [27]. El reciclaje, corresponde al proceso fisicoquímico o mecánico al que se somete un residuo para recuperar sus partes o elementos constitutivos con el objetivo de emplear este residuo como insumo o materia prima secundaria [27]. Por último, está la valorización, a la cual se recurre cuando las características del residuo o su nivel de contaminación impiden un reciclaje técnico o económicamente viable, otorgándole una función útil al desecho al sustituir a otros materiales que habrían cumplido dicha función [28].

No obstante, la disponibilidad y recolección de los residuos posconsumo es uno de los aspectos más críticos de la economía circular. Por ello, la identificación polimérica es necesaria y con este fin la *Society of the Plastics Industry* (SPI) desarrolló en 1988 un sistema de códigos de identificación (numerados del 1 al 7 dentro de un triángulo de Möbius), cuyo objetivo fue estandarizar la clasificación de las resinas para permitir su posterior reciclaje [29].

Actualmente, este sistema se encuentra regido bajo el estándar internacional ASTM D7611/D7611M, el cual reemplazó el triángulo de Möbius por uno equilátero sólido, esta modificación se realizó para aclarar que el estándar es para identificar resinas, no necesariamente que el producto final es reciclable [30]. Sin esta clasificación previa, los plásticos químicamente distintos se mezclarían, inutilizando el material resultante por pérdida de propiedades mecánicas y forzando un modelo de economía lineal. En la Tabla 1, se presentan los diversos plásticos con su código de identificación [31].

Tabla 1. Clasificación de plásticos según estándar internacional ASTM D7611/D7611M.

Código	Plástico
 PET	Polietileno (PET)
 HDPE	Polietileno de alta densidad (PEAD/HDPE)
 PVC	Cloruro de polivinilo (PVC)
 LDPE	Polietileno de baja densidad (PEBD/LDPE)
 PP	Polipropileno (PP)
 PS	Poliestireno (PS)
 Other	Otros. Policarbonato (PC), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), estireno acrilonitrilo (SAN), poliamida (PA), nylon y acetatos (POM).

2.3. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son el resultado de la combinación de dos o más fases con características físicas y químicas distintas, lo que da lugar a un nuevo material con propiedades superiores a las de sus componentes individuales. Las matrices principales utilizadas para desarrollar estos materiales son los polímeros, metales y cerámicas [32]. Dentro de la industria, los compuestos de matriz polimérica son los más destacados debido a su alta relación resistencia-peso y excelente resistencia a la corrosión y fatiga.

La eficacia de un material compuesto depende de la interacción entre sus dos fases fundamentales, que son.

⇒ *Matriz (Fase continua)*. Es el material que envuelve a la fase dispersa y es el responsable de la cohesión estructural. Su función principal es transferir las cargas aplicadas hacia al componente de refuerzo y protegerlo del entorno [8]. En el caso de los diluyentes, la matriz puede ser cargada con partículas como carbonato de calcio o sílice para reducir costos, aunque esto suele conllevar una disminución en la tenacidad del material resultante [33].

⇒ *Refuerzo (Fase dispersa)*. Componente que provee la alta resistencia mecánica y rigidez. Estos se clasifican en refuerzos de alto desempeño, como las fibras de vidrio o carbono, que se orientan para optimizar el comportamiento mecánico y en refuerzos de bajo desempeño, que son partículas o fibras cortas que se dispersan uniformemente, permitiendo que el material sea procesado mediante técnicas convencionales de termoplásticos [33].

En el caso de los materiales ligeros basados en EPS, la estructura celular remanente y los posibles aditivos actúan como elementos de dispersión o refuerzos [34]. Para maximizar la adhesión entre la matriz de EPS recuperado y estos agentes, se suelen utilizar agentes de acoplamiento como silanos y titanatos, los cuales mejoran la integridad estructural del compuesto [33].

2.4. EL POLIESTIRENO EXPANDIDO

El poliestireno desarrollado en la década de 1930 es un polímero aromático elaborado a partir del monómero del estireno, el cual se obtiene comercialmente mediante la reacción del benceno y etileno [35]. Al ser un termoplástico amorfo con la fórmula química repetitiva $(C_8H_8)_n$, sus cadenas moleculares no están reticuladas químicamente de forma permanente, otorgándole una temperatura de transición vítrea (T_g) entre 90°C y 100°C, esto explica su capacidad fundamental de fluir y ser moldeado al aplicarse temperatura o al interactuar con ciertos solventes [28].

Existen diferentes tipos de poliestireno dependiendo de su polimerización, destacando (por sus siglas en inglés) el poliestireno cristal o de uso general (GPPS), el poliestireno de alto impacto (HIPS) y los espumados, como el expandido (EPS) y extruido (XPS). El más utilizado es el EPS, con un consumo de 5 Mt en 2015; este material no se pudre ni se descompone y presenta una naturaleza apolar, lo que le concede una característica hidrofóbica y presenta capacidad de absorción de impactos, siendo ideal para embalaje de electrodomésticos y materiales delicados en general [36, 37].

La Figura 2 representa el proceso de transformación del EPS, que parte de sus perlas y se desarrolla en tres etapas principales que se detallan a continuación.

- ⇒ *Pre-expansión.* Las perlas de poliestireno contienen un agente expansor físico, usualmente pentano y se calienta con vapor de agua a temperaturas entre 80°C y 110°C, lo que provoca que el agente se convierta en gas y, mediante un efecto osmótico el vapor se difunde al interior de las celdas aumentando la presión interna, generando que las perlas aumenten hasta 50 veces su volumen original, reduciendo su densidad drásticamente [38].
- ⇒ *Reposo intermedio y estabilización.* Las perlas del paso anterior se almacenan en silos para estabilizarse mecánica y químicamente, ya que al enfriarse el gas de pentano se condensa y puede generar un vacío parcial que colapsaría las perlas. Durante este enfriamiento, el aire difunde dentro de las celdas, logrando que la presión interna se equilibre con la del exterior otorgando estabilidad mecánica [38].
- ⇒ *Expansión y moldeado final.* Las perlas estabilizadas se introducen en moldes y se someten nuevamente a vapor de agua para barrer el aire residual, alcanzando presiones de 0,11 MPa. El polímero se ablanda y el aire encerrado se expande, haciendo que las perlas se consoliden en un solo bloque con la forma del molde [38].

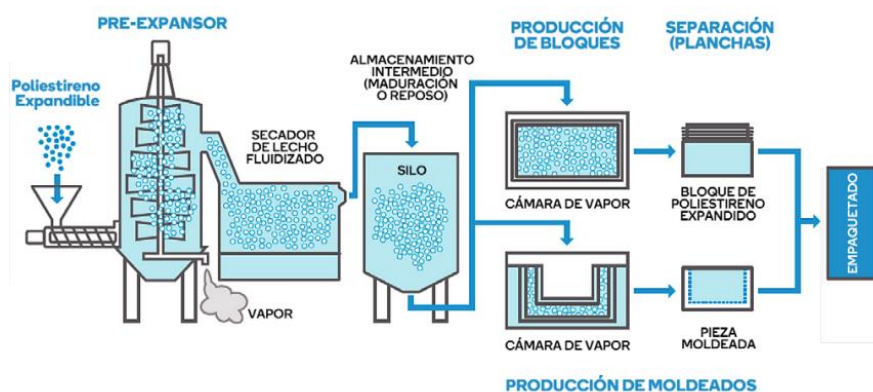


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso industrial de fabricación de EPS.

Las propiedades del EPS derivan principalmente de su estructura, compuesta en un 98% por aire. Esta característica lo convierte en un material ligero con densidades que oscilan entre 10 kg/m^3 y 35 kg/m^3 , y posee un color blanco natural [28, 38]. Debido a este alto contenido de aire, es un excelente aislante térmico y acústico, haciéndolo ideal para la construcción y cadena de frío. Asimismo, presenta una buena resistencia a la compresión y capacidad de amortiguación, absorbiendo la energía de golpes y vibraciones de 0,07 a 0,11 MPa [38, 37]. Además, químicamente es un material inerte insoluble en agua, pero es disuelto fácilmente por benceno, tolueno y varios hidrocarburos clorados [39].

Por su versatilidad, presenta diversas aplicaciones en la cadena de empaque y embalajes. Se utiliza ampliamente para proteger electrodomésticos, productos electrónicos y farmacéuticos, debido a su capacidad de absorción de impactos [38]. En la industria alimentaria, se emplea en la fabricación de vasos, platos y bandejas, por su inocuidad y capacidad de aislamiento térmico, así como también en la construcción; de hecho, el 76% del consumo mundial del EPS se destina a este uso [37]. También se utiliza como aligerante en losas de concreto y rellenos geotécnicos [38].

A pesar de sus beneficios, el poliestireno expandido presenta desafíos ambientales y logísticos. Al presentar densidades bajas, el material ocupa un gran volumen con muy poco peso, lo que encarece la eficiencia de su transporte a centros de reciclaje, generando que este sea escasamente reciclado [40]. Además, su degradación es muy lenta y su permanencia en el ambiente se estima entre 500 a 1000 años [6].

Por su ligereza es habitual que el viento y el agua transporten estos desechos de EPS, terminando en océanos y ríos, donde termina como residuo contaminante que se fragmenta en microplásticos ingeridos por la fauna marina [1]. Asimismo, el uso de este plástico en envases de comida resulta controversial debido a las preocupaciones por la posible migración de estireno y otros aditivos hacia los alimentos, ya que el estireno es un posible carcinógeno y neurotóxico [38]. Para hacer frente a estas situaciones, el Estado chileno promulgó la Ley REP que prohíbe el uso de envases de poliestireno expandido en lugares de expendio de comidas y obliga a los productores de estos envases a recolectar, gestionar y valorizar sus residuos para evitar su disposición inadecuada y termine en océanos [16].

Para su identificación y gestión de residuos, el poliestireno expandido se clasifica bajo el código de identificación de resinas con el número 6 [28]. Sin embargo, aunque el EPS es un material reciclable, las tasas de recuperación son bajas (cerca del 12% en comparación con otros materiales) [23]. Frente a esto, existen diversas rutas tecnológicas para su valorización.

⇒ *Reciclaje mecánico*. Consiste en la trituración o molienda del material para reintegrarlo en la fabricación de nuevos productos [28].

- ⇒ *Reciclaje físico/térmico*. Implica la aplicación de calor y presión para densificar el material, reduciendo su volumen para facilitar su transporte y posterior peletizado [23].
- ⇒ *Reciclaje químico*. Técnica que ha ganado relevancia por generar una reducción drástica del volumen (más de 100 veces) sin degradar las cadenas poliméricas, facilitando el transporte desde la fuente de generación. Se destaca el uso de d-limoneno, aceite esencial extraído de la cáscara de naranja [41].
- ⇒ *Reciclaje energético*. Consiste en la incineración del poliestireno expandido para recuperar energía debido a su alto poder calorífico (40 MJ/kg). Sin embargo, este método genera emisiones de contaminantes como dioxinas y hollín por lo que requiere de controles estrictos de emisiones [23].
- ⇒ *Biodegradación*. Se está explorando la capacidad de ciertas larvas como el gusano de harina y el Zophobas morio, para biodegradar y mineralizar el poliestireno gracias a las bacterias presentes en su sistema digestivo [9].

2.5. EL D-LIMONENO. SOLVENTE, LIGANTE Y AGENTE NATURAL

El d-limoneno es un compuesto orgánico natural clasificado como un monoterpeno monocíclico, constituido estructuralmente por la unión de dos moléculas de isopreno ($C_{10}H_{16}$). Es el componente principal de los aceites esenciales de los cítricos, como la naranja, el limón, la mandarina, entre otros, constituyendo aproximadamente entre el 90% y el 97% del aceite extraído de la cáscara [42]. En su estructura presenta dos insaturaciones o dobles enlaces carbono-carbono (uno endocíclico y otro exocíclico), lo que le confiere una alta reactividad para participar en posteriores procesos de polimerización o reticulación [22].

Este solvente, se caracteriza por ser un líquido de color amarillo anaranjado a transparente, con un olor cítrico distintivo. Es insoluble en agua, pero altamente miscible en alcohol, éter y otros solventes orgánicos. Debido a su origen biológico, alta biodegradabilidad y baja toxicidad en comparación con solventes derivados del petróleo, se le considera un “solvente verde” [19].

Las propiedades fisicoquímicas más relevantes se detallan en la Tabla 2 [19].

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas del d-limoneno.

Peso molecular	136,24 g/mol
Densidad	0,842 – 0,846 g/cm ³ a 20°C
Punto de ebullición	177°C
Punto de fusión	-96,7 °C
Parámetro de solubilidad	16,38 MPa ^{0,5}

El método principal de obtención a escala del d-limoneno es la destilación por arrastre de vapor a partir del epicarpio de los cítricos. El proceso inicia con la recolección y adecuación del material, para después realizar la destilación donde el material vegetal se somete a una corriente directa de vapor de agua. El calor suministrado permite vaporizar los componentes volátiles de la cáscara a una temperatura inferior a su punto de ebullición normal, evitando su degradación térmica. Después, se realiza la separación, aquí los vapores pasan por un condensador, obteniéndose una mezcla bifásica de agua y aceite, la cual se separa finalmente por decantación mediante un decantador aprovechando la diferencia de densidades [3, 19].

Si bien el d-limoneno tiene aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética como agente saborizante y aromatizante, su aplicación técnica más prometedora es en la economía circular del poliestireno expandido. Termodinámicamente, la disolución de un polímero se rige por la ecuación de energía libre de Gibbs, que se presenta en la Ecuación 1 [33].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

Donde:

ΔG . Cambio de la energía libre de Gibbs en $\frac{J}{mol}$.

ΔH . Cambio de la entalpía en $\frac{J}{mol}$.

ΔS . Cambio de la entropía en $\frac{J}{mol\ K}$.

T . Temperatura en K .

Para que el proceso de disolución ocurra de forma espontánea, el cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG) debe ser negativo. Dado que el cambio de entropía (ΔS) es pequeño al disolver un polímero, el factor limitante es el cambio de entalpía (ΔH). Según la teoría de Hildebrand, la entalpía de mezcla es proporcional al cuadrado de la diferencia entre los parámetros de solubilidad del solvente y del polímero como se presenta en la Ecuación 2 [33].

$$\Delta H = V(\delta_1 - \delta_2)^2\phi_1\phi_2 \quad (2)$$

Donde:

V . Volumen total de la mezcla en m^3 .

δ_1 . Parámetro de solubilidad del solvente en $MPa^{0.5}$.

δ_2 . Parámetro de solubilidad del polímero en $MPa^{0.5}$.

ϕ_1 . Fracción volumétrica del solvente, adimensional.

ϕ_2 . Fracción volumétrica del polímero, adimensional.

El d-limoneno posee un parámetro de solubilidad de Hildebrand de $16,38 \text{ MPa}^{0,5}$ muy cercano al del poliestireno $22,49 \text{ MPa}^{0,5}$. Al ser numéricamente similares, la diferencia entre ellos es mínima, lo que reduce la barrera de entalpía de la mezcla y permite que el ΔG del sistema sea negativo, generando una interacción fisicoquímica favorable [33, 43].

Cabe mencionar, que esta similitud en su solubilidad se respalda estructuralmente, ya que el poliestireno es apolar al igual que el d-limoneno, lo cual permite que, al entrar en contacto, el solvente penetre las cadenas poliméricas del EPS y rompa las fuerzas intermoleculares a temperatura ambiente sin degradar los enlaces covalentes de la cadena principal del polímero, lo cual libera el aire contenido en la estructura celular del EPS, reduciendo su volumen [23].

Aunque la disolución del EPS es espontánea a temperatura ambiente, la cinética del proceso mejora con el calor. Estudios han determinado que en un rango térmico de 65°C a 75°C se logra una disolución óptima y rápida, sin llegar a volatilizar excesivamente el aceite esencial [3]. Además, este proceso requiere de una energía de activación menor ($22,9 \text{ kJ/mol}$) comparado con otros solventes naturales como el aceite de eucalipto ($37,25 \text{ kJ/mol}$), lo que lo hace más eficiente energéticamente [43].

La disolución del EPS en d-limoneno no es solo una reducción de volumen, sino que genera un producto de valor agregado que actúa como resina, esto permite crear materiales donde d-limoneno tiene la capacidad de actuar como solvente y monómero reactivo, participando en procesos de curado. Esto permite crear materiales compuestos donde el poliestireno expandido actúa como una fase de refuerzo precipitada dispersa dentro de una nueva matriz polimérica derivada del d-limoneno, mejorando propiedades mecánicas del producto final [6].

2.6. PRINCIPIOS DE LA FOTOQUÍMICA Y RADIACIÓN UV

La fotoquímica es la rama de la química que se dedica al estudio de las transformaciones moleculares inducidas por la absorción de energía lumínica en el espectro electromagnético, principalmente en las regiones UV y visible. Se distingue de las reacciones térmicas, que dependen de la activación de la energía traslacional, vibracional y rotacional de las moléculas [44, 45].

Por su parte, en los procesos fotoquímicos la transición a un estado excitado se produce por la transferencia de energía de fotones hacia grupos funcionales específicos, conocidos como cromóforos. Estos componentes son los responsables de absorber selectivamente la radiación a una longitud de onda determinada (λ), permitiendo superar barreras energéticas de activación a bajas temperaturas, facilitando rutas de síntesis o polimerización que son termodinámicamente restringidas en condiciones convencionales [44, 45].

Cuando una molécula absorbe un fotón de una longitud de onda establecida, la energía de dicho fotón se transfiere a la molécula, generando que un electrón de un orbital de menor energía (estado fundamental) ascienda a un estado excitado. La energía de estos fotones está determinada por la relación de Planck-Einstein correspondiente a la Ecuación 3 [46].

$$E = h \cdot \nu \quad (3)$$

Donde:

E . Energía del fotón en J .

h . Constante de Planck, $6,626 \cdot 10^{-34}$ en $J \cdot s$.

ν . Frecuencia de la radiación en s^{-1} .

Para que este fenómeno ocurra, debe cumplirse la primera ley de la fotoquímica, conocida como ley de Grotthuss-Draper, la cual establece que solo la radiación absorbida por una molécula puede producir un cambio fotoquímico en ella, es decir, que, si la molécula es transparente a la radiación incidente, la activación no ocurrirá [46].

La energía absorbida permite superar las barreras de activación necesarias para que se produzcan transformaciones químicas que serían difíciles o imposibles de alcanzar térmicamente por vía térmica. La eficiencia de este proceso se rige por la segunda ley de la fotoquímica o ley de Stark-Einstein, la cual estipula que, en la etapa primaria, cada cuanto de luz (fotón) absorbido activa una única molécula [46].

La radiación UV, que abarca el espectro electromagnético entre aproximadamente 100 nm y 400 nm, constituye una fuente de energía eficaz para iniciar procesos fotoquímicos. Sus fotones poseen una energía igual o superior al enlace más débil de la molécula, lo suficiente para romper enlaces químicos covalentes y generar especies altamente reactivas [46].

En el contexto de polímeros y los procesos de fotopolimerización, la radiación UV se clasifica de acuerdo con su energía y longitud de onda. La región UV-A corresponde a una longitud de onda entre 315 nm y 400 nm, mientras que la región UV-B se encuentra entre 280 nm y 315 nm, ambas constituyen los espectros de mayor relevancia para aplicaciones fotoquímicas controladas, debido a su capacidad de penetración en matrices poliméricas. Por el contrario, la radiación UV-C con longitudes de onda menor a 280 nm, a pesar de que presenta una elevada energía fotónica, presenta limitaciones operativas, ya que requiere de condiciones de vacío y puede ser absorbida por el oxígeno atmosférico. Además, puede causar problemas de salud en los humanos tanto en ojos y piel en el caso de exposición directa [47].

En sistemas donde los componentes estructurales, como el poliestireno expandido, no absorben eficientemente la longitud de onda de la fuente de luz disponible, se emplean fotoiniciadores o fotosensibilizadores [48]. Estas especies actúan como cromóforos encargados de absorber la luz incidente y utilizar esa energía para generar especies reactivas iniciadoras. Existen dos mecanismos principales mediante los cuales los fotoiniciadores generan radicales libres necesarios para desencadenar la polimerización o reticulación del material [49].

⇒ *Fotoiniciadores tipo I o Norrish I*. Al absorber un fotón, la molécula del fotoiniciador experimenta una ruptura homolítica, generalmente en el enlace carbonilo. Este proceso genera de forma inmediata dos radicales libres con alta reactividad, capaces de iniciar la propagación de la cadena polimérica.

⇒ *Fotoiniciadores Tipo II o Norrish II*. El fotoiniciador excitado no se fragmenta por sí solo, sino que por un proceso bimolecular con un agente donador de hidrógeno de una amina o un alcohol. La abstracción del átomo de hidrógeno genera radicales libres que actúan como centros activos para la reacción.

2.7. MECANISMOS DE SECADO Y CURADO POR FOTOACTIVACIÓN

En el desarrollo de materiales compuestos basados en matrices poliméricas, solventes y fotoiniciadores, el proceso de consolidación ocurre mediante la convergencia de dos fenómenos fisicoquímicos, el secado y el curado [3, 21].

Por una parte, el secado se define como un proceso físico controlado por la transferencia de masa, que implica la eliminación de los componentes volátiles mediante evaporación. Este fenómeno depende de la presión de vapor del solvente y de las condiciones ambientales del entorno (temperatura y flujo de aire), resultando en la formación de una película sólida por el aumento de la concentración de sólidos [33].

Por otro lado, el curado es una transformación química irreversible que conduce a la formación de una red tridimensional reticulada (*cross-linking*). A diferencia del secado, donde existe la pérdida de masa, el curado implica la integración del solvente o monómero en la estructura del material. Este proceso de reticulación usualmente ocurre debido a la presencia de dobles enlaces que se rompen para permitir que las moléculas se unan con sus vecinas [33]. Al formarse esta red entrelazada, las moléculas pierden la capacidad de deslizarse una sobre otras, lo que ocasiona que el material pierda su fluidez y adquiera resistencia [8]. En el caso del sistema estudiado, es decir la disolución del EPS en d-limoneno y fotoiniciador, el solvente posee dobles enlaces carbono-carbono susceptibles de polimerizar, permitiendo transitar de una mezcla solvatada a una matriz polimérica sólida.

La fotopolimerización representa una vía energética eficiente para inducir el curado a temperatura ambiente, superando las limitaciones cinéticas del secado térmico convencional [48]. La radiación UV, al igual que el haz de electrones o la energía láser, constituyen fuentes de energía efectivas para activar el curado químico y la reticulación. Este mecanismo depende de la presencia de un fotoiniciador, el cual experimenta una transición a un estado electrónicamente excitado tras interactuar con longitudes de onda específicas del espectro UV [49].

Posteriormente, dependiendo de su naturaleza química, el fotoiniciador generará radicales libres altamente reactivos a través de la fragmentación directa de su estructura en el caso de ser tipo I o mediante la abstracción de un átomo de hidrógeno desde una molécula donante en el medio si este es tipo II [49]. Luego, estos radicales libres atacan las insaturaciones (dobles enlaces) presentes en el sistema, propagando la reacción de reticulación específicamente a través de los grupos isopropenilo y endocíclicos del d-limoneno [22].

La formación de enlaces covalentes intermoleculares mediante este mecanismo radicalario permite la propagación de cadenas donde los monómeros de d-limoneno se polimerizan o se injertan en las cadenas preexistentes de poliestireno. Si la formulación incluye agentes de transferencia de cadena o entrecruzantes tipo tiol, la reacción procede mediante un mecanismo de crecimiento por pasos altamente eficiente [22].

La vía fotoquímica altera drásticamente la cinética del proceso, mientras la evaporación del d-limoneno puede requerir días debido a su alto punto de ebullición (177°C) [19], el curado fotoquímico induce la solidificación en minutos. Durante este tiempo, la resina atraviesa tres fases, líquido viscoso, gel y sólido. La rápida generación de una red reticulada ocurre en la transición conocida como gelación molecular, que es cuando los enlaces covalentes logran conectar toda la resina tridimensionalmente, originando el comportamiento elástico a nivel macroscópico. Esta transformación es la que otorga resistencia mecánica inmediata y estabilidad dimensional sin la necesidad de hornos de alta temperatura, optimizando la eficiencia energética del proceso [33].

No obstante, se debe tener en consideración que, a medida que la viscosidad del medio de reacción aumenta, el desplazamiento difusivo de los radicales libres se ve limitado, favoreciendo las reacciones de recombinación de radicales entre sí en lugar de iniciar nuevas cadenas, provocando que la eficiencia del fotoiniciador disminuya progresivamente conforme la matriz se solidifica [50].

2.8. PROPIEDADES PARA APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN

Un material de construcción se define como cualquier producto manufacturado capaz de formar parte de una obra de ingeniería o arquitectura, que mediante sus propiedades intrínsecas garantice la estabilidad estructural y durabilidad del sistema a lo largo de su vida útil [51]. Para que un material sea catalogado como tal, debe demostrar una respuesta mecánica predecible y cumplir con umbrales mínimos de desempeño regulados por estándares internacionales, como los establecidos por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM), o por normativas nacionales [51].

En el contexto chileno, los materiales convencionales están estrictamente regulados por normativas específicas. El hormigón se rige por la Norma NCh170, que define los requisitos generales y lo clasifica según su resistencia mecánica a la compresión o tracción por flexión [52]. Por su parte, los ladrillos cerámicos se rigen por la Norma NCh169, la cual define los grados y clases basados en valores de resistencia a la compresión, adherencia y límites máximos de absorción de agua [53]. Por último, la madera estructural se regula bajo la Norma NCh1990, que la clasifica en categorías según las tensiones admisibles para flexión, compresión, tracción y cizalle, y el módulo de elasticidad, dependiendo de la especie y contenido de humedad [54].

Al carecer de una normativa chilena para el material desarrollado a partir de residuos de EPS se debe evaluar con la misma precisión que los materiales convencionales para justificar su viabilidad estructural. Para que este nuevo material logre insertarse en el sector de la construcción sus propiedades deben ser comparables con los requerimientos de las normativas ya mencionadas. Por ello, la matriz polimérica debe someterse a ensayos estandarizados internacionales.

Independiente de su naturaleza, la caracterización fundamental de un material se basa en la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante. En el régimen elástico, esta relación se describe mediante la ley de Hooke correspondiente a la Ecuación 4 [33].

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4)$$

Donde:

σ . Esfuerzo aplicado en $\frac{N}{m^2}$.

E . Módulo de Young o de elasticidad en $\frac{N}{m^2}$.

ϵ . Deformación unitaria, adimensional.

Aunque la ley de Hooke aproxima el comportamiento lineal inicial, los compuestos poliméricos no siguen una teoría de elasticidad lineal perfecta, sino que presentan un comportamiento viscoelástico. Esto implica que la rigidez y resistencia del material dependen de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga [33]. Al superar el límite elástico, el material deja de cumplir el criterio de proporcionalidad directa e ingresa al régimen plástico, donde la tensión aplicada induce deformaciones permanentes. En los polímeros, una vez sobrepasado el punto de fluencia, el esfuerzo suele decaer, desencadenando la estricción, que consiste en una reducción localizada del área transversal [33].

Posteriormente, ocurre el estiramiento en frío, durante el cual la estructura interna del material se deforma y se fragmenta, creando regiones donde las moléculas quedan altamente orientadas en la dirección de la deformación. Durante esta fase plástica irreversible, las tensiones internas pueden provocar la formación de microgrietas manifestadas como un blanqueamiento por tensión, lo que advierte un daño estructural permanente antes de la fractura final [33].

De acuerdo con la Figura 3, se pueden observar los siguientes puntos críticos que definen el comportamiento del material [55].

1. *Límite de proporcionalidad* (σ_{lp}). Corresponde a la región inicial de la curva donde la deformación lineal y directamente proporcional a los esfuerzos aplicados, cumpliendo con la aproximación de Hooke.
2. *Límite elástico*. Después del límite de proporcionalidad, el material experimenta una deformación aún elástica, lo que significa que puede recuperar su forma, pero es un punto cercano al punto de fluencia.
3. *Esfuerzo de fluencia* (σ_y). Es el esfuerzo máximo en el cual comienzan a aparecer o desarrollarse deformaciones plásticas o irreversibles.
4. *Esfuerzo último* (σ_u). En este punto, el material ha alcanzado su capacidad máxima de resistir al esfuerzo que actúa sobre él.
5. *Esfuerzo de fractura* (σ_f). Es la tensión exacta en el instante en que las fibrillas y la estructura interna colapsan, y el material sometido al esfuerzo se fractura de forma permanente.

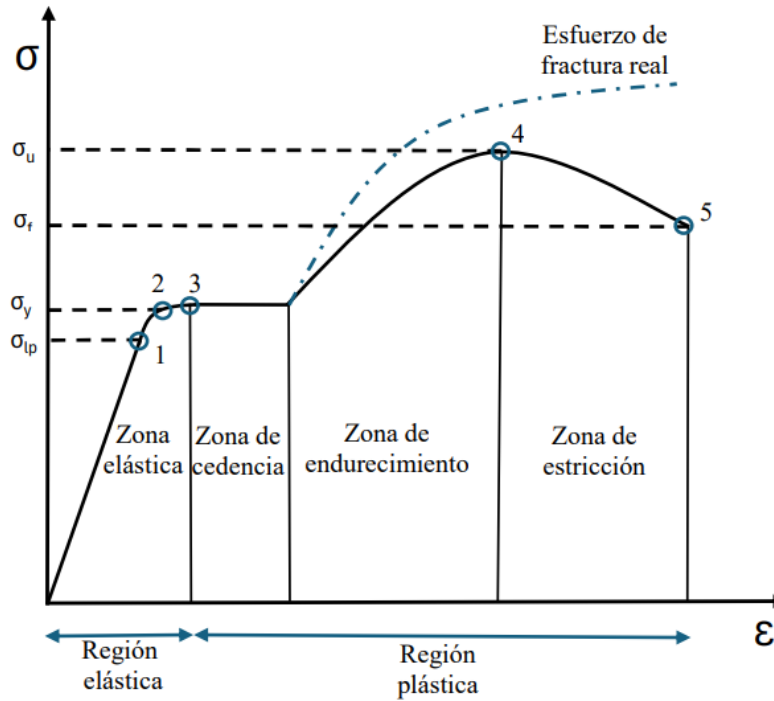


Figura 3. Curva de esfuerzo-deformación idealizada para polímeros [55].

Cabe destacar, que el área bajo la curva de esfuerzo-deformación representa la energía absorbida por unidad de volumen hasta la fractura. Esto quiere decir, mientras mayor y más alta sea esa área, mayor será la cantidad de energía que el material es capaz de absorber antes de fallar, propiedad conocida como tenacidad [33].

La viabilidad técnica del material compuesto desarrollado a partir de residuos de poliestireno expandido para su integración en el sector de la construcción depende estrictamente del cumplimiento de propiedades físico-mecánicas que aseguren su desempeño estructural y durabilidad [51]. Dado que el EPS posee una estructura celular compuesta de un 98% aire, el material obtenido mediante la ruta fotoquímica debe evaluarse bajo criterios rigurosos. Estos criterios se alinean con las normas ASTM, estándares internacionales diseñados caracterizar las propiedades de los materiales [33]. Dicha evaluación es indispensable para garantizar la seguridad estructural, optimizar el rendimiento funcional y asegurar el cumplimiento de los requisitos técnicos en su aplicación.

La integridad estructural del nuevo material se determina principalmente por su comportamiento bajo cargas, que puede ser evaluado mediante la resistencia a la tracción según la norma ASTM D638. Este ensayo, se realiza sobre probetas en forma de mancuerna como se observa en la Figura 4, lo que permite determinar propiedades que definen la calidad de la reticulación fotoquímica a través de parámetros como [56, 33].

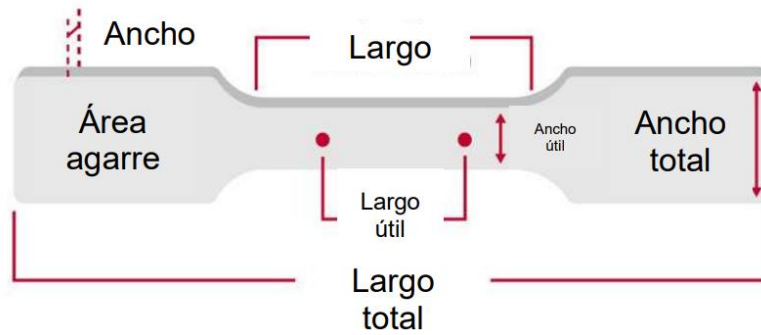


Figura 4. Geometría tipo mancuerna de las probetas para ensayo de tracción.

- ⇒ *Resistencia a la tracción.* Representa el esfuerzo máximo que el material puede soportar antes de fallar, ya sea en el punto de fluencia o en la ruptura. Este valor es vital para asegurar que el material no se disgregue o agriete bajo tensiones internas o movimientos estructurales.
- ⇒ *Módulo de elasticidad.* Determinado a partir de la pendiente de la región lineal inicial de la curva esfuerzo-deformación. Este parámetro indica la rigidez intrínseca del material solidificado.
- ⇒ *Elongación y ductilidad.* La medida de la deformación porcentual antes de la ruptura permite clasificar al material según su ductilidad, indicando su capacidad para absorber energía antes de fracturarse. En aplicaciones de construcción, es preferible un comportamiento dúctil que permita la redistribución de esfuerzo antes del colapso estructural. Dependiendo de las características del compuesto, la falla puede ser frágil (ocurriendo con elongaciones mínimas, usualmente menores al 1% y acompañadas de microgrietas) o dúctil (caracterizada por alcanzar un punto de fluencia máximo, seguido de una reducción de área y un posterior estiramiento en frío antes de colapsar).

Otra propiedad importante para este tipo de materiales es la dureza, la cual se determina con la norma ASTM D2240, que evalúa la resistencia del material al desgaste por agentes externos. Este método a partir del uso de un durómetro mide la profundidad de penetración de un indentador específico en el material bajo condiciones controladas [57].

Dado que el material propuesto es un compuesto polimérico derivado del EPS, se utiliza típicamente la escala Shore D, diseñada para plásticos más duros y gomas de alta resistencia. Ese valor está inversamente relacionado con la penetración que depende del módulo elástico y el comportamiento viscoelástico del material [57].

Un índice de dureza Shore D adecuado permite garantizar que los elementos desarrollados resistan a impactos accidentales, rayaduras y la abrasión, lo cual es vital para proteger la integridad del núcleo del material [57].

De acuerdo con los procedimientos establecidos por la norma ASTM D2240, la toma de datos debe realizarse posicionando la probeta sobre una superficie de soporte rígida, plana y paralela. El durómetro se aplica perpendicularmente sobre el material de manera firme, asegurando el contacto total del pie de presión sin inducir impacto o choque mecánico. Debido al comportamiento de fluencia o relajación de los polímeros, la lectura de dureza se registra dentro de un margen estricto de 1 segundo tras el cese del recorrido inicial del indentador, tomando el valor máximo indicado por el instrumento.

2.9. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Además, en este trabajo para validar las propiedades optimizadas del material y asegurar la replicabilidad del proceso de síntesis, se emplearán metodologías analíticas estandarizadas. Estas permitirán obtener resultados para cuantificar la eficiencia de la fotoiniciación y evaluar la integridad estructural del material resultante. A continuación, se describen algunas de las técnicas usuales para caracterizar las propiedades de los materiales.

⇒ *Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés).* Esta técnica constituye una herramienta analítica para estudiar la cinética de la reacción. Su principio de funcionamiento se basa en la interacción de la materia con la radiación electromagnética en el espectro infrarrojo, dicha radiación estimula a los átomos de la molécula para que vibren a una frecuencia determinada, generando un espectro que sirve como una "huella dactilar" química del polímero [58].

A través del monitoreo espectral, se rastrea la evolución de las bandas, específicamente la disminución o desaparición de las señales correspondientes a los dobles enlaces carbono-carbono del d-limoneno en el caso del material obtenido a partir de residuos de EPS. Además, con el fin de establecer un parámetro de control y validar la eficacia del proceso, esta metodología también se aplicará al poliestireno expandido virgen y al material sin fotoiniciador de manera comparativa para verificar cuantitativamente el grado de conversión de monómeros a polímero y la eficiencia del fotoiniciador tras la exposición a la radiación UV [59].

⇒ *Calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés).* Esta técnica se utiliza para determinar las transiciones térmicas en los polímeros mediante la evaluación de la diferencia en el flujo de calor de la muestra respecto a una referencia [33].

En este estudio, se utilizará para determinar la temperatura de transición vítrea (T_g) del material resultante. Un desplazamiento en la T_g respecto al EPS virgen, indicará el grado de interacción molecular entre las fases. Un incremento en la T_g es indicativo de una restricción en la movilidad de los segmentos de las cadenas poliméricas debido al entrecruzamiento fotoquímico; por el contrario, un descenso podría sugerir la presencia de solvente residual no polimerizado actuando con un efecto plastificante sobre el material [59].

⇒ *Análisis Termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés)*. Esta técnica evalúa la estabilidad térmica de los materiales y su resistencia a la degradación registrando de manera continua la variación de su masa en función de la temperatura o del tiempo, mientras la muestra es sometida a un calentamiento controlado [33].

En este estudio, el TGA se utilizará para identificar las distintas zonas de degradación térmica del material resultante y estos resultados se contrastarán con el EPS virgen para determinar si la red tridimensional generada por el entrecruzamiento fotoquímico otorga al nuevo material una mayor estabilidad frente a la descomposición por calor.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. GESTIÓN Y REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS).

El poliestireno expandido, es un material polimérico espumado derivado del petróleo, caracterizado por ser liviano, económico y resistente. Compuesto en un 98% por aire y en 2% por derivados del petróleo, esto lo convierte en un material utilizado ampliamente en la construcción y en embalaje [23].

Sin embargo, al no ser biodegradable y poseer una naturaleza voluminosa, se convierte en un contaminante significativo al final de su vida útil. Además, su prolongada exposición a la intemperie provoca su degradación en fragmentos diminutos contribuyendo a la formación de microplásticos. Esta situación genera un problema en Chile, donde anualmente se producen cerca de 30.000 toneladas de EPS, de las cuales se estima que 20.000 toneladas son desechadas sin tratamiento [60, 61].

Si bien el alto volumen del EPS producto de su alto contenido de aire, complica el almacenamiento y las operaciones de reciclaje convencionales, es importante destacar que existen diversas vías para su valorización. Se han desarrollado cuatro tipos de tratamiento para su gestión, se define cada uno a continuación [28, 23].

⇒ *Tratamiento primario*. Consiste en operaciones mecánicas como trituración y compactación para obtener un producto con características similares al producto original. Su ventaja radica en su bajo costo, pero no reduce volumen de transporte.

- ⇒ *Tratamiento secundario.* Consiste en el proceso de fusión, es decir, el material se somete a altas temperaturas para reducir el volumen y convertirlo en un producto con un mayor espectro de aplicaciones diferentes al plástico original. Su ventaja es que reduce el volumen; sin embargo, existe riesgo de degradación térmica.
- ⇒ *Tratamiento terciario o reciclaje químico.* Se basa en el uso de solventes para disolver el material, puede reducir el volumen sin degradar la cadena polimérica, permitiendo una separación eficiente de impurezas.
- ⇒ *Tratamiento cuaternario.* Se basa en la recuperación energética mediante la incineración, aprovechando su alto poder calorífico (40 MJ/kg), pero este proceso está condicionado a la implementación de costos y estrictos controles de emisiones atmosféricas.

Actualmente, los procesos de reciclaje del EPS más utilizados son los mecánicos y químicos. Mientras el reciclaje primario consiste en obtener perlas trituradas que se pueden utilizar para fabricar nuevos productos plásticos o reintegrarse en el proceso de producción de nuevos bloques de poliestireno, el reciclaje terciario corresponde a uno de los procesos más económicos y eficientes, donde se disuelve el EPS mediante solventes transformando el residuo en una resina ofreciendo una oportunidad para el desarrollo de productos con valor agregado como lo son los adhesivos, pinturas y recubrimientos aislantes [19].

No obstante, el desafío principal del tratamiento terciario radica en el uso de solventes convencionales como el benceno, tolueno, xileno, tetrahidrofurano, cloroformo y acetona que conllevan riesgos operativos y sanitarios, pues son solventes aromáticos altamente volátiles que poseen una alta presión de vapor, lo que facilita su inhalación y la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs) al ambiente [40].

El benceno es clasificado como un carcinógeno del grupo 1 por la *International Agency for Research on Cancer* (IARC) vinculado directamente con la leucemia mieloide, mientras que el tolueno y el xileno actúan como depresores del sistema nervioso central causando neurotoxicidad crónica, mareos y daños en órganos tras exposiciones prolongadas [62, 63]. Adicionalmente, los COVs reaccionan con óxidos de nitrógeno (NOx) que bajo la radiación solar generan ozono troposférico O₃, un contaminante secundario que contribuye al smog fotoquímico que daña la salud respiratoria de la población [64].

La alternativa a estos solventes aromáticos altamente volátiles, son los solventes de fuente natural. Entre ellos destaca el d-limoneno, un aceite esencial extraído del epicarpio de los cítricos, que exhibe una alta capacidad de diluir el EPS y que, además presenta baja toxicidad, es biodegradable y garantiza la seguridad ocupacional y medioambiental del proceso de recuperación [23, 41].

El sector de la construcción es uno de los principales receptores de residuos de EPS debido a sus propiedades de ligereza y aislamiento. Se han realizado estudios sobre la sustitución parcial de agregados finos por perlas de EPS trituradas en mezclas de concreto, determinando que un reemplazo del 0,25% es el punto óptimo para obtener concretos ligeros con una resistencia adecuada para aplicaciones no estructurales como molduras decorativas, particiones internas y pisos sólidos, ofreciendo un aislamiento térmico superior al concreto convencional mejorando la eficiencia energética, esto se debe a la baja conductividad térmica del poliestireno ($0,032 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} - 0,038 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) [65, 66].

Por otro lado, se han realizado paneles 3D donde una lámina de EPS de forma ondulada actúa como un núcleo aislante térmico y acústico. Este núcleo se recubre por ambas caras con una malla de acero, una vez que estos se erigen en el sitio de construcción, son recubiertos con una capa de concreto. El concreto no solo protege el acero de la corrosión, sino que también proporciona la capacidad de soportar fuerzas de compresión, permitiendo la aplicación de estos paneles en elementos tanto estructurales como no estructurales. En el ámbito estructural, los paneles se utilizan como muros de carga que transfieren fuerzas verticales y horizontales y para la construcción de losas que soportan cargas vivas y muertas. En el ámbito no estructural, pueden funcionar como aislamiento para techos y emplearse como muros divisorios, proporcionando aislamiento acústico entre habitaciones [66].

El EPS se utiliza ampliamente como material de relleno ligero en proyectos de infraestructura como carreteras, estribos de puentes y suelos compresibles, ya que por su peso unitario significativamente menor que el relleno de tierra tradicional permite reducir la presión y el asentamiento, además permite mantener propiedades intactas incluso después de décadas sin deterioro significativo del material [65].

En el contexto chileno, específicamente en la Región Metropolitana la empresa “Idea-Tec” ha logrado transformar el poliestireno expandido en pintura para cubrir superficies. Este proceso se basa en la disolución del EPS con solventes orgánicos (cetonas, ésteres, bencenos, alcanos, etc.), a los que se le añade un agente dispersante y pigmentos. La pintura obtenida es descrita como más brillante e impermeable al agua en comparación con un óleo tradicional. A pesar de que es un proceso enfocado en la economía circular, el uso de solventes de origen fósil presenta un punto de contraste en cuanto a la sostenibilidad [67].

Por otro lado, la empresa “Recollect”, ubicada en Puerto Montt, Región de Los Lagos, se especializa en el reciclaje de plásticos residuales como el EPS, donde el resultado de sus procesos son bandejas de plástico reciclado, bloques de EPS reciclado y pellet de poliestireno cristal de origen reciclado, que es utilizado como materia prima en la fabricación de nuevos productos plásticos [68].

3.2. DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS BASADOS EN EPS Y SOLVENTE NATURAL

El d-limoneno, junto con otros terpenos como el p-cimeno derivado de plantas como el tomillo y el comino, actúan como solventes verdes eficaces para el EPS debido a la similitud en sus parámetros de solubilidad de Hildebrand con respecto al polímero [43]. Esto representa una estrategia de valorización que trasciende el reciclaje mecánico tradicional, pues esta ruta aprovecha la capacidad de solvatación de los terpenos para transformar la estructura celular del poliestireno expandido en una resina o fase termoplástica que puede ser integrada en nuevas matrices poliméricas o para generar un nuevo material.

El d-limoneno y el EPS poseen parámetro de solubilidad de Hildebrand cercanos, 16,38 MPa^{0,5} y 18-22 MPa^{0,5} respectivamente, lo que permite una interacción termodinámica favorable donde el solvente penetra la cadena polimérica, rompiendo las fuerzas intermoleculares y liberando el 98% del aire contenido en el material. La viscosidad de la solución resultante aumenta exponencialmente a partir de concentraciones de polímero superiores al 42% [43].

En un estudio previo se logró obtener un barniz a partir de EPS y d-limoneno, donde se optimizaron los parámetros clave del proceso de disolución. Se determinó que la temperatura ideal es de 65°C, ya que a esta temperatura se maximiza la solubilidad y se reduce la viscosidad sin volatizar excesivamente el solvente natural, temperaturas superiores podrían ser contraproducentes por la evaporación del aceite esencial. Asimismo, se estableció una velocidad de mezclado de 300 rpm para asegurar la homogeneidad de la mezcla. La dilución ideal se obtuvo con una relación volumétrica/peso de 1:0,5 (10 ml de d-limoneno por 5 g de EPS), demostrando ser la formulación que mejor cumplió con los criterios de recubrimiento, adherencia y brillo en madera, alcanzando propiedades comparables a las de barnices convencionales [3].

Dentro de los antecedentes para la valorización del EPS mediante d-limoneno, destaca la síntesis de redes poliméricas avanzadas, específicamente elastómeros, que son aquellos polímeros elásticos que pueden deformarse considerablemente y recuperar su forma original al retirar la fuerza [8].

El mecanismo se basa en la reactividad del d-limoneno, el cual contiene dos dobles enlaces de carbono-carbono que le permite reaccionar con compuestos que contienen múltiples grupos tiol (-SH) en un proceso conocido como reacción tiol-eno. La síntesis se lleva a cabo en dos fases, primero el EPS se disuelve completamente en el d-limoneno. Luego, se añade el politiol y un fotoiniciador que mediante la aplicación de luz UV, el limoneno y el tiol polimerizan para obtener como resultado una matriz de caucho [8]. Estos compuestos permiten fabricar desde recubrimientos flexibles hasta objetos rígidos moldeables o filamentos para impresión 3D que requieren cierta viscosidad.

Si bien esta ruta es un antecedente relevante para la ingeniería de nuevos materiales funcionales, la presente investigación busca simplificar el sistema mediante la homopolimerización radicalaria de las insaturaciones del d-limoneno. De esta manera, se prescinde de agentes entrecruzantes adicionales, utilizando únicamente el fotoiniciador para consolidar la matriz, lo que reduce la complejidad de la formulación y los costos asociados. Este desarrollo demuestra que la combinación de EPS reciclado y solventes naturales permite transitar desde la reducción de volumen hacia la ingeniería de nuevos materiales funcionales, cerrando el ciclo de vida del poliestireno expandido usado para embalajes de manera sostenible.

3.3. TECNOLOGÍAS DE CURADO ACELERADO EN MATERIALES POLIMÉRICOS Y COMPUESTOS

La necesidad de incrementar la eficiencia productiva y reducir la huella de carbono en la manufactura de materiales ha impulsado el desarrollo de diversas tecnologías de curado acelerado. El curado, que corresponde a la etapa donde el material pasa de un estado líquido o viscoso a uno sólido y estable mediante la formación de una red polimérica entrecruzada, tradicionalmente se logra mediante calor, pero este proceso puede ser lento y energéticamente costoso [33].

Las tecnologías aceleradas buscan reducir este tiempo a través de la aplicación controlada de energía específica. Entre estas, destacan el curado por microondas, que utiliza energía electromagnética para calentar y activar la reacción; el curado mediante haz de electrones, que ofrece altísimas velocidades de reticulación, pero requiere equipos complejos y el curado por radiación UV [32].

De estas alternativas, destaca el curado por radiación ultravioleta, el cual se ha consolidado como una de las tecnologías más eficientes, especialmente para recubrimientos y compuestos delgados, debido a sus altas velocidades de reacción y poseer un requerimiento energético bajo, el cual representa entre un 10% y un 20% del consumo de un curado térmico tradicional [33, 69]. Esta tecnología, es la base de la presente investigación, permite la activación selectiva del curado a temperatura ambiente, minimizando el consumo energético y evita la degradación térmica de los componentes del material compuesto de EPS con d-limoneno [48].

4. HIPÓTESIS

La incorporación de un fotoactivador UV al material obtenido a partir de residuos de poliestireno expandido (EPS) y d-limoneno acelerará significativamente la cinética de reticulación del material, reduciendo el tiempo de solidificación en comparación con la evaporación natural del solvente, permitiendo así obtener un material sólido cuyas propiedades físicas y mecánicas viabilizarán su uso en aplicaciones sostenibles.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar y caracterizar, mediante una ruta fotoquímica, un material elaborado a partir de residuos de poliestireno expandido (EPS) y d-limoneno, optimizando el proceso de solidificación mediante la incorporación de un fotoactivador UV y evaluar sus propiedades resultantes para determinar su viabilidad de uso en aplicaciones sostenibles.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- ⇒ Definir una metodología para la fabricación de un material a partir de residuos de poliestireno expandido, d-limoneno y un fotoactivador UV.
- ⇒ Optimizar el tiempo de la radiación UV y la concentración de fotoactivador para obtener un material con propiedades adecuadas para su potencial uso en aplicaciones sostenibles.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de alcanzar los objetivos, se desarrolló la metodología a continuación descrita.

6.1. RECOLECCIÓN DEL EPS DE EMBALAJE Y ACONDICIONAMIENTO

Esta investigación se inició con la recolección del poliestireno expandido a nivel domiciliario en la comuna de Rancagua y Graneros, durante un período de un mes, asegurando que el EPS recuperado proviniera de embalaje. Posteriormente los trozos de material fueron almacenados en el domicilio del estudiante en Santiago para poder trasladarlos al laboratorio de la universidad. En la Figura 5, se muestra parte del EPS recolectado.



Figura 5. Residuos de EPS recolectados para el proceso de revalorización.

Una vez que se encontraba el poliestireno expandido en la universidad, se prosiguió con el acondicionamiento del material, donde se realizó el cortado preliminar usando un cortador eléctrico (Figura 6), obteniendo dimensiones aproximadas de 3 cm x 2 cm x 2,5 cm. Este paso de reducción se realizó para asegurar el correcto ingreso del material a la tolva del equipo de trituración, que posteriormente se usó para obtener el EPS triturado.



Figura 6. EPS fraccionado mediante corte por resistencia eléctrica.

Luego, el EPS cortado en el paso anterior fue triturado utilizando un molino de impacto de rotor (Retsch, modelo SR300) como se observa en la Figura 7. La operación se configuró a una velocidad rotacional de 5000 rpm, parámetro seleccionado para inducir un esfuerzo cortante suficiente para romper las paredes de las celdas del polímero, liberando parte del aire atrapado.



Figura 7. Molino de impacto de rotor utilizado en la trituración del EPS.

Para la obtención del EPS triturado se empleó un tamiz con una abertura de malla de 4 mm, la selección de este diámetro fue para optimizar el tiempo de residencia en la cámara de molienda, pues el uso de una malla con aperturas más pequeñas incrementaría la fricción interna y, en consecuencia, la temperatura interior.

Durante la operación, el EPS cortado fue introducido de forma gradual para evitar la saturación del equipo de triturado. Se observó que el depósito receptor presentaba una capacidad limitada de 2 L, lo que exigió ciclos de vaciado frecuentes. Esta medida fue necesaria para prevenir la contrapresión del material hacia el rotor, ya que, de no ser controlado, podría derivar a la compactación sólida irreversible (Figura 8). Finalmente, el material fue almacenado en cajas de polipropileno de 28 L.



Figura 8. Densificación mecánica del EPS en el molino de impacto usado.

6.2. ENSAYOS PRELIMINARES Y OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES CRÍTICAS DEL PROCESO

Antes de establecer la metodología definitiva, se realizaron etapas de prospección para determinar el punto de saturación de la mezcla de EPS y d-limoneno, la eficiencia de los agentes fotoactivos y la compatibilidad de los moldes en impresión 3D.

Para la determinación del punto de saturación de la mezcla se evaluaron diversas relaciones másicas de EPS con d-limoneno para identificar la transición del material a una matriz con potencial estructural. A continuación, se describen las relaciones realizadas.

⇒ *Relación 2.1.* Basada en literatura [3], el uso de 10 ml de solvente por 5 g de polímero resulta ser la proporción ideal para la fabricación de un barniz. Al realizar esta muestra en laboratorio se obtuvo una película delgada tras secado atmosférico por 38 minutos como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Película delgada obtenida de la mezcla de EPS/d-limoneno.

⇒ *Pruebas de sobresaturación.* Se realizaron ensayos con una relación extrema de 17,6 g de EPS con 7,8 g de d-limoneno. El secado térmico a 120°C durante 3 horas evidenció una degradación por nucleación de burbujas y oxidación térmica como se observa en la Figura 10, concluyendo que existe un exceso de soluto impidiendo la formación de una matriz homogénea.



Figura 10. Evidencia de degradación térmica y nucleación de burbujas en mezcla sobresaturada.

⇒ *Punto de saturación optimizado.* Se determinó que una mezcla de 10,7 g de EPS y 7,8 g de d-limoneno, sometida a 105°C por 3 horas, permite una eliminación eficiente del aire ocluido sin generar defectos morfológicos superficiales, estableciéndose como la base para el material compuesto (Figura 11).



Figura 11. Material consolidado en el punto de saturación.

Para la consolidación fotoquímica del material, el fotoiniciador seleccionado fue 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPA). La elección se fundamenta por su alta eficiencia en la generación de radicales libres reportada en patente US 20140303268A1 sobre reciclaje de EPS [8]. Este se clasifica como un fotoiniciador tipo Norrish I, que al ser expuesto a una radiación UV en el rango de 285 nm a 370 nm experimenta una fotofragmentación homolítica.

A nivel experimental, se utilizará el reactivo suministrado por la marca Sigma Aldrich (Figura 12) con una pureza al 99%. Debido a su alta reactividad fotoquímica, su manipulación requiere el uso de recipientes opacos para evitar fotólisis prematura por exposición a la luz ambiental. Las pruebas iniciales utilizando el fotoiniciador de la Figura 12 se realizaron con lámparas de baja intensidad estilo manicura que resultaron en un curado semisólido, como se muestra en la Figura 13.



Figura 12. Fotoiniciador DMPA utilizado en los ensayos experimentales.



Figura 13. Ensayo de fotopolimerización mediante radiación UV de baja densidad.

Se identificó que el espesor de la muestra y la estabilidad de la irradiancia son variables críticas. En este contexto, se desarrollaron ensayos donde el curado se realizó con linternas a batería durante 2 horas como se observa en la Figura 14. En el primero caso, no se efectuó un cambio de baterías, mientras que en el segundo se reemplazaron tras una hora de secado. Como resultado, la muestra con cambio de batería presentó una matriz más dura.



Figura 14. Ensayo de fotopolimerización bajo lámparas de irradiancia fluctuante.

Al detectar fluctuaciones de potencia en el dispositivo a batería y observar que la luz no abarcaba todo el material dentro de la placa Petri, se optó por una lámpara de 365 nm con interruptor, asegurando la coincidencia con el espectro de absorción del fotoactivador.

Al obtener la lámpara se diseñaron moldes específicos bajo la norma ASTM D638-22 con el programa *Autodesk Fusion 360*, para fabricar moldes mediante impresión 3D en poliuretano termoplástico (TPU) flexible. El primer molde impreso se observa en la Figura 15.



Figura 15. Molde inicial para probeta tipo IV según ASTM D638-22 en filamento TPU.

Como se observa en la Figura 15, el material se adhería al molde dificultando el desmolde por lo que se procedió a imprimir moldes perimetrales sin base, facilitando el desmolde mecánico de las probetas como se muestra en la Figura 16.

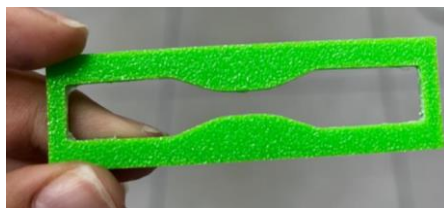


Figura 16. Diseño optimizado de molde perimetral bajo norma ASTM D638-22.

Para las pruebas de curado realizadas bajo lámpara de 365 nm, se utilizó el molde de la Figura 16. Las primeras experimentaciones se realizaron con una dosificación inicial de 0,1 g de DMPA; sin embargo, esta concentración resultó en una matriz de comportamiento elástico con rigidez insuficiente para aplicaciones estructurales. Por esta razón, se incrementó la dosificación del fotoiniciador a 0,3 g, parámetro que contribuyó en la obtención de un material más rígido.

Posteriormente, se evaluó la adición de monoestireno, en concentraciones específicas de 1,1 g y 1,7 g con el propósito de utilizarlo como agente de entrecruzamiento para la red polimérica. No obstante, esta ruta metodológica fue descartada por criterios de seguridad y salud. El estireno es reconocido como potencial carcinógeno [63] y, además, su adición alteraba la estequiometría de la mezcla, pues este al ser un monómero líquido, su presencia desplazó el punto de saturación de la mezcla, incrementando la fracción volumétrica de la fase líquida frente a la sólida (EPS) lo que a su vez dificultó la consolidación de un material con estabilidad.

Luego, las probetas consolidadas fueron sometidas a ensayos mecánicos de tracción con el objetivo de determinar sus esfuerzos máximos. Para ello, se utilizó la máquina de ensayo universal marca ZwickRoell, equipada con una celda de carga Xforce P con una capacidad nominal de 5 kN (Figura 17).

Durante la configuración del ensayo mecánico, cada probeta se fijada en las mordazas del equipo, asegurando su correcta alineación para evitar deslizamientos o esfuerzos no deseados.



Figura 17. Probetas desarrolladas sometidas a ensayos de tracción.

Una vez montada la probeta en el equipo, se configuró la máquina con una velocidad de ensayo de 5 mm/min, determinada según los lineamientos de la norma ASTM D638. Durante el procedimiento se aplicó una carga axial creciente, registrando de manera continua la fuerza y la deformación hasta provocar la fractura del material.

Antes de desarrollar el diseño estadístico definitivo, se llevó a cabo una fase de ensayos preliminares para delimitar las variables de entrada. Los datos presentados en la Tabla 3, especifican las formulaciones preliminares realizadas con el objetivo de determinar su esfuerzo de tracción máximo bajo condiciones variables.

Tabla 3. Matriz de condiciones para ensayos preliminares de tracción.

Probeta N°	DMPA (g)	EPS (g)	d-limoneno (g)	Monoestireno (g)	Tiempo curado (min)
1	0,3	10,7	7,8	0	120
2	0,3	10,7	7,8	0	120
3	0,3	10,7	7,8	0	60 UV 60 horno
4	0,3	10,7	5,0	1,1	60
5	0,3	10,7	5,0	1,1	120
6	0,3	10,7	5,0	1,1	90
7	0,3	10,7	7,8	1,7	90
8	0,3	10,7	7,8	1,7	60
9	0,3	10,7	7,8	0	60 horno 60 UV

Esta matriz de ensayos preliminares se estructuró con el propósito de aislar y evaluar 3 efectos. En primer lugar, el efecto de incorporar monoestireno como monómero reactivo adicional; en segundo lugar, el efecto de combinar un secado térmico con fotopolimerización UV; y, por último, el comportamiento frente a diferentes tiempos de exposición lumínica. Los resultados de esta fase permitieron descartar las variables que no aportaban un incremento significativo a la resistencia estructural, justificando así la selección exclusiva de la concentración de fotoiniciador y el tiempo de radiación UV como las únicas variables independientes para la optimización final del material.

6.3. PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DEL MATERIAL Y DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL

La fabricación de las probetas y la posterior obtención de datos se rigen bajo un diseño factorial estadístico robusto para garantizar la validez de los resultados. Para optimizar las propiedades mecánicas del material, se empleó el software MODDE PRO-13, mediante un diseño factorial de superficie de respuesta. Se definieron dos variables independientes con sus respectivos rangos de operación.

⇒ Variable 1. Tiempo de exposición bajo luz UV de 365 nm definido entre 60 y 120 minutos [8, 70].

⇒ Variable 2. Concentración de fotoactivador definido entre 1,5% y 5% p/p respecto a la masa total de la mezcla [8].

Los tiempos de irradiación y las concentraciones necesarias para la fotopolimerización con DMPA varían dependiendo del sistema químico. En la literatura, para la síntesis de películas de polímeros anisotrópicos con cristales líquidos requieren tiempos de curado entre 10 minutos y 60 minutos [70].

Para el caso específico de los sistemas de reciclaje para la creación de materiales a partir de EPS y d-limoneno, los tiempos de curado varían entre 30 minutos y 1 hora, hasta 2 horas en el caso de querer utilizarlo para filamentos de impresión 3D. Por ello, la variable 1 se eligió entre 60 minutos y 120 min, permitiendo evaluar la transición de un curado estándar y uno para sistemas de alta viscosidad o con cargas [8].

Respecto a la concentración de DMPA, las formulaciones transparentes de EPS y D-limoneno inician su polimerización eficientemente con un 1% p/p. No obstante, la incorporación de rellenos estructurales exige aumentar la cantidad de fotoiniciador hasta un 5% p/p para asegurar un curado adecuado. Se seleccionó un límite inferior de 1,5% para garantizar una iniciación robusta en probetas opacas, y un límite superior del 5% para evitar apantallamiento lumínico, un fenómeno que impide el curado homogéneo en el fondo de la probeta [8].

Considerando los rangos definidos para las variables independientes, el software comercial MODDE PRO-13 generó una matriz de 11 corridas experimentales aleatorias. Con el propósito de minimizar los errores sistemáticos y garantizar la reproducibilidad de los resultados, cada condición se ejecutó por triplicado, consolidando un tamaño muestral total de 33 probetas. En la Tabla 4 se detalla la matriz de diseño con las configuraciones específicas de los experimentos realizados.

Tabla 4. Matriz de diseño experimental factorial para la optimización del proceso.

N° Exp	ORDEN	Tiempo (min)	Tiempo por lado (min)	Cantidad de DMPA (%)	Cantidad DMPA (g)
1	2	60	30	1,50	0,28
2	8	120	60	1,50	0,28
3	4	60	30	5,00	0,93
4	3	120	60	5,00	0,93
5	9	48	24	3,25	0,60
6	1	132	66	3,25	0,60
7	10	90	45	0,78	0,14
8	11	90	45	5,73	1,06
9	5	90	45	3,25	0,60
10	7	90	45	3,25	0,60
11	6	90	45	3,25	0,60

Para la preparación del material, y previo a la manipulación de los reactivos, es indispensable el uso de los Elementos de Protección Personal (EPP), los cuales incluyen mascarilla de protección, guantes de látex grado médico, calzado de seguridad y vestimenta protectora (delantal y pantalones largos gruesos). Una vez aseguradas estas medidas de seguridad, se procedió a la dosificación de los componentes empleando una balanza semianalítica (marca Boeco) con una precisión de 0,0001 g, ejecutando la siguiente secuencia.

1. Se posicionó un vaso precipitado con una capacidad de 2 L sobre la balanza para masar 10,7 g de residuos de poliestireno expandido previamente triturados.
2. En un vaso precipitado de 150 ml se masaron 7,8 g de d-limoneno.
3. Finalmente, el fotoiniciador 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone (DMPA) se masó en una pesa sustancias, dosificando la cantidad exacta definida por la matriz de diseño experimental presentado en la Tabla 4.

Una vez masados los reactivos, se inició con la disolución controlada del polímero en el d-limoneno. En primer lugar, el DMPA previamente masado se añadió al vaso precipitado de 150 ml que contiene el solvente, aplicando agitación hasta su completa homogeneización. Este paso es necesario para asegurar que el agente fotoactivo se encuentre disperso de manera uniforme en la fase líquida antes de la incorporación del polímero.

Posteriormente, el EPS se adicionó progresivamente y en pequeñas fracciones a la fase líquida como se observa en la Figura 18, manteniendo una agitación mecánica constante asistida por una varilla de vidrio, con el fin de facilitar el contacto superficial y penetración del solvente en la estructura del EPS.

El proceso de adición intermitente, seguido de agitación, debe mantenerse hasta incorporar la totalidad de la masa de EPS, proceso que se extiende aproximadamente por 1 hora. Dicha adición sucesiva, garantiza que no se sature el solvente localmente y que el proceso de disolución se complete eficientemente.



Figura 18. Incorporación gradual de EPS en la solución de d-limoneno con fotoiniciador.

Una vez completada la incorporación de la totalidad del EPS, el material compuesto resultante fue extraído del recipiente para someterlo a un proceso de amasado manual. Esta acción de amasado facilita la eliminación de las burbujas de aire residuales atrapadas durante la disolución y homogenización de la mezcla final, promoviendo la disolución completa de cualquier remanente sólido de EPS, transformando el producto en una matriz polimérica viscosa y uniforme (Figura 19).



Figura 19. Homogeneización manual del material.

Posteriormente, el material compuesto obtenido se dispuso en el interior de un molde impreso en 3D, el cual fue diseñado específicamente con la geometría requerida para los ensayos de tracción mecánica.

Para inducir el curado, los moldes impresos en 3D con el material en su interior fueron dispuestos dentro de una placa Petri y expuestos a una fuente de radiación UV con una longitud de onda de 365 nm (Figura 20). Dicha fuente lumínica se posicionó directamente sobre la placa Petri (Figura 21) con el propósito de mantener una distancia focal constante hacia los moldes, para que la radiación incidente fuera uniforme en todas las corridas experimentales. Finalmente, el tiempo de exposición de las muestras se ajustó a los valores definidos en la matriz de la Tabla 4, generada por el programa MODDE PRO-13, logrando de esta manera la consolidación estructural de cada material compuesto obtenido.

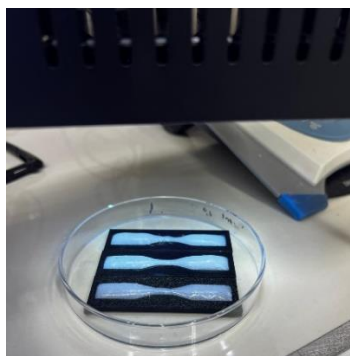


Figura 20. Proceso de consolidación fotoquímica de probetas bajo radiación UV controlada.



Figura 21. Disposición de lámpara UV para el curado del material en los moldes impresos en 3D.

Una vez las probetas alcanzaron condiciones estables y fueron desmoldadas, se procedió a verificar sus dimensiones con un pie de metro digital de alta precisión, con el cual se midieron dimensiones relevantes como longitud, ancho y espesor, asegurando sus especificaciones y registrando cada valor para su posterior caracterización mecánica.

Por último, con el propósito de establecer un parámetro de control experimental, se fabricaron probetas sin fotoiniciador. Para su elaboración, se replicó la secuencia 1 y 2 descrita anteriormente. Posteriormente, el EPS fue adicionado al solvente de forma intermitente, manteniendo una agitación mecánica constante asistida por una varilla de vidrio. La obtención de este material de control resulta fundamental para aislar el comportamiento de la resina (EPS y d-limoneno) frente a los cambios estructurales e incrementos de resistencia mecánica que son inducidos exclusivamente por la red de fotopolimerización durante la posterior etapa de curado UV.

6.4. VALIDACIÓN DEL MODELO FACTORIAL

Una vez obtenidas las 11 corridas experimentales por triplicado (33 probetas) según el diseño factorial obtenido con el software MODDE PRO-13 (Figura 22), se procedió al ingreso de los resultados de esfuerzo máximo de tracción de los ensayos en el software comercial.

Este procesamiento tuvo como objetivo modelar matemáticamente la relación entre las variables independientes, las cuales son tiempo de exposición a la radiación UV y concentración de fotoiniciador, y la variable de respuesta que corresponde al esfuerzo máximo del material. Mediante este análisis, el modelo permitió establecer la relación entre las variables que optimiza y maximiza el desempeño estructural del material dentro de los rangos de diseño estudiados en esta memoria.



Figura 22. Set de probetas fabricadas según matriz de diseño experimental del software MODDE PRO-13.

A partir de los resultados de optimización arrojados por el modelo, se determinaron las condiciones ideales de operación. Con el propósito de validar empíricamente la predicción del software comercial, se fabricaron seis nuevas probetas, siguiendo estrictamente los parámetros definidos por el modelo, con el objetivo de validar experimentalmente la predicción obtenida con el software comercial.

Posteriormente, estas probetas de validación fueron sometidas a ensayos de tracción bajo las mismas condiciones previamente establecidas, garantizando la reproducibilidad de los resultados. Los datos de las pruebas mecánicas obtenidos en laboratorio fueron contrastados con los valores teóricos predichos por el modelo generado con el software, evaluando el grado de concordancia entre ambos. Este proceso permitió verificar la capacidad predictiva del modelo y confirmar la validez de las condiciones optimizadas, contribuyendo así a la robustez y confiabilidad del análisis estadístico desarrollado.

6.5. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL POLIMÉRICO OBTENIDO BAJO CONDICIONES OPTIMIZADAS

6.5.1. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MATERIAL

Con el propósito de evaluar y comparar el desempeño mecánico del nuevo material compuesto frente a soluciones comerciales, se sometieron a ensayos de tracción probetas de referencia. Por un lado, se utilizaron probetas de acrílico y tableros de fibra de densidad media (MDF, por sus siglas en inglés), las cuales fueron obtenidas mediante corte láser. Por otro lado, las probetas de silicona, la muestra de control (compuesta por EPS y d-limoneno sin fotoiniciador) y el material compuesto optimizado bajo evaluación, fueron fabricadas mediante su vertido y consolidación en moldes impresos en 3D.

Para la ejecución de estas pruebas, las probetas fueron sometidas a ensayos de tracción utilizando una máquina universal de ensayos de la marca Zwick Roell, equipada con una celda de carga Xforce P con una capacidad nominal de 5 kN. Antes de iniciar el ensayo, cada probeta fue fijada en las mordazas de la máquina, asegurando su correcta alineación para evitar esfuerzos no deseados. Posteriormente, se aplicó una carga axial creciente bajo una velocidad constante de ensayo de 5 mm/minutos hasta provocar la fractura del material.

A lo largo del procedimiento, el equipo registró de forma continua y automática los valores de fuerza aplicada y deformación. Dado que el equipo registra estos datos en crudo, fue necesario realizar una transformación matemática para construir las curvas de esfuerzo-deformación. Esta conversión fue para independizar los resultados de la geometría de cada muestra y poder calcular las propiedades intrínsecas del material para su respectiva comparación, tales como el módulo de elasticidad de Young y la tenacidad. Para obtener los esfuerzos de tracción, se utilizó la Ecuación 5 [33].

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

Donde:

σ . Esfuerzo de tracción en MPa.

F . Fuerza axial instantánea registrada por el equipo de ensayo de tracción en N.

A_0 . Área de la sección transversal inicial de la zona útil de cada probeta en mm².

Adicionalmente, para obtener la deformación unitaria experimentada por el material, se empleó la Ecuación 6 [33].

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

Donde:

ϵ . Deformación unitaria, adimensional.

ΔL . Elongación registrada por el equipo de ensayo de tracción en mm.

L_0 . Longitud inicial de la zona útil de cada probeta en mm.

Además, se analizó la dureza superficial, una propiedad mecánica importante para evaluar la resistencia de este tipo de materiales al desgaste y la indentación, la cual se mide con durómetro siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D2240. Para la correcta ejecución del ensayo, la normativa exige que las probetas se posicionen sobre una superficie plana, dura y horizontal, y que cuenten con un espesor mínimo de 6,0 mm para evitar que la rigidez de la base de soporte interfiera en la medición [57].

El durómetro se enciende y se aplica perpendicularmente sobre el material de manera firme como se observa en la Figura 23, asegurando el contacto total del pie de presión sin inducir impacto o choque mecánico. Debido al comportamiento viscoelástico del material (inherente de los polímeros), la lectura de dureza se registra dentro de un margen estricto de 1 segundo tras el cese del recorrido inicial del indentador, tomando el valor máximo indicado por el instrumento [57].



Figura 23. Posicionamiento del durómetro sobre un polímero en superficie plana [71].

Para garantizar la validez estadística y la representatividad del ensayo, la norma exige realizar cinco determinaciones de dureza en diferentes puntos de la superficie de una misma probeta, las que fueron debidamente registradas.

Cada punto de indentación debe estar separado por una distancia radial mínima de 6,0 mm entre sí, y ubicarse a una distancia no menor a 12,0 mm de los bordes para evitar la liberación de tensiones laterales que puedan generar un error en la lectura. Finalmente, el valor representativo de dureza Shore D para cada condición experimental corresponde al cálculo de la media aritmética de estas cinco mediciones individuales.

6.5.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL

La caracterización fotoquímica y estructural se desarrolló mediante FTIR. Para validar la eficiencia del proceso, este análisis se aplicó al EPS virgen, a una muestra de EPS con d-limoneno sin fotoiniciador y al material compuesto final. Las mediciones se realizaron en el equipo JASCO FT/IR-4X1 operado mediante el software Spectra Manager 2.5.

Tras registrar un espectro de fondo (*background*) para eliminar la contribución atmosférica del sistema, se colocó un fragmento representativo de cada material directamente sobre el cristal de diamante del accesorio de reflectancia total atenuada (ATR, por sus siglas en inglés), asegurando un contacto óptimo entre la muestra y la superficie del cristal mediante la aplicación de presión mecánica controlada sobre la muestra.

Posteriormente, se realizó un barrido espectral en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} , se configuró una resolución de 4,0 cm^{-1} y un promedio de 32 escaneos por muestra para optimizar la relación señal/ruido y garantizar la precisión de las bandas de absorción.

Durante el ensayo, el equipo registró el espectro de absorbancia en función del número de onda, el cual se sometió a la herramienta *peak find* y *data dump* para identificar los números de onda correspondientes a los grupos funcionales clave. Los datos obtenidos fueron procesados y analizados, identificando los picos característicos asociados a los diferentes grupos funcionales presentes en el material, lo que permitió su caracterización química.

Finalmente, para complementar la caracterización del material obtenido bajo condiciones optimizadas, se enviaron muestras a un laboratorio externo para la realización de ensayos de DSC y TGA. Previamente al envío, las muestras fueron debidamente seleccionadas y rotuladas, asegurando su trazabilidad y evitando cualquier tipo de contaminación o alteración durante el transporte, proceso que se realizó para EPS virgen como las muestras del material compuesto que contenían 1,5% de fotoiniciador.

En el laboratorio receptor, los ensayos se llevaron a cabo bajo condiciones operacionales controladas y siguiendo protocolos estandarizados, empleando un analizador térmico modelo Perkin Elmer STA 6000.

Para el TGA, las muestras se calentaron desde los 25°C hasta los 900°C a una velocidad de calentamiento constante de 20°C/min. Este procedimiento se ejecutó bajo una atmósfera inerte de helio gaseoso con un flujo continuo de 40 mL/min, previniendo la oxidación prematura de la muestra y permitiendo evaluar exclusivamente el perfil de degradación de la matriz.

Por su parte, los ensayos de DSC requirieron un tiempo de procesamiento total de 3 horas con 44 minutos por muestra, configurados en un ciclo térmico de tres etapas. Primero, un calentamiento desde 25°C hasta 250°C a una velocidad de 5°C/min, seguido de un ciclo de enfriamiento desde 250°C hasta 25°C a 5°C/min, culminando con un segundo calentamiento desde 25°C hasta 250°C a 5°C/min. Esta técnica permitió evaluar el comportamiento térmico del material en función de la temperatura, identificando transiciones características como la temperatura de transición vítrea (T_g), así como posibles eventos endotérmicos o exotérmicos asociados a procesos de fusión, cristalización o degradación.

Los resultados obtenidos a partir de estos ensayos fueron posteriormente analizados e incorporados al estudio, permitiendo complementar la información estructural y mecánica del material.

6.6. POSIBLES APLICACIONES SOSTENIBLES DEL MATERIAL OBTENIDO

A partir de la evaluación de propiedades como la resistencia a la tracción, la tenacidad, la dureza Shore D y la estabilidad térmica del material compuesto desarrollado por la disolución de EPS en d-limoneno y su posterior curado fotoquímico UV, se proyecta la viabilidad de sus posibles aplicaciones industriales. Los resultados obtenidos en la fase de caracterización servirán como parámetro de decisión para los siguientes usos.

En primer lugar, para la fabricación de láminas y elementos de mobiliario, esta aplicación se justifica mediante los resultados de los ensayos de tracción y las pruebas de dureza. Los parámetros de resistencia a la tracción máxima y módulo de elasticidad que se obtengan permitirán determinar si la resina, una vez consolidada su red tridimensional, es capaz de soportar cargas estructurales secundarias y resistir la abrasión o el desgaste. Además, si el material final hereda la inercia química y resistencia a la humedad propia del EPS original, los datos mecánicos demostrarán si el compuesto es lo suficientemente competitivo para sustituir a materiales convencionales susceptibles al agua, como la melamina o el MDF.

En segundo lugar, en la manufactura de embalajes de alto rendimiento, para evaluar este uso se determinó la tenacidad, calculada a partir del área bajo la curva de esfuerzo-deformación en los ensayos de tracción y se analizó el perfil térmico en el TGA/DSG. Estos resultados servirán para comprobar si el nuevo material retiene la capacidad térmica y la flexibilidad de las cadenas del poliestireno para absorber energía producida por golpes y vibraciones, cualidad vital para prevenir el daño de productos frágiles [38].

Los datos mecánicos obtenidos se contrastarán con la literatura para proyectar si este compuesto logra ser una alternativa estructuralmente superior frente a las opciones convencionales del mercado, con la meta de superar la resistencia a la tracción de la espuma de polietileno (0,22 MPa) [72] y del mismo poliestireno expandido que presenta resistencias a la tracción máximas menores a 0,58 MPa [73], cerrando así su ciclo de vida útil como un embalaje seguro e impermeable.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN PRELIMINARES

Durante la ejecución de los ensayos preliminares de tracción, el equipo de ensayo de tracción registró de manera continua la fuerza aplicada y la deformación resultante de las probetas. A partir de estos datos, se construyeron curvas de comportamiento mecánico, algunas de las cuales se muestran de manera representativa en la Figura 24.

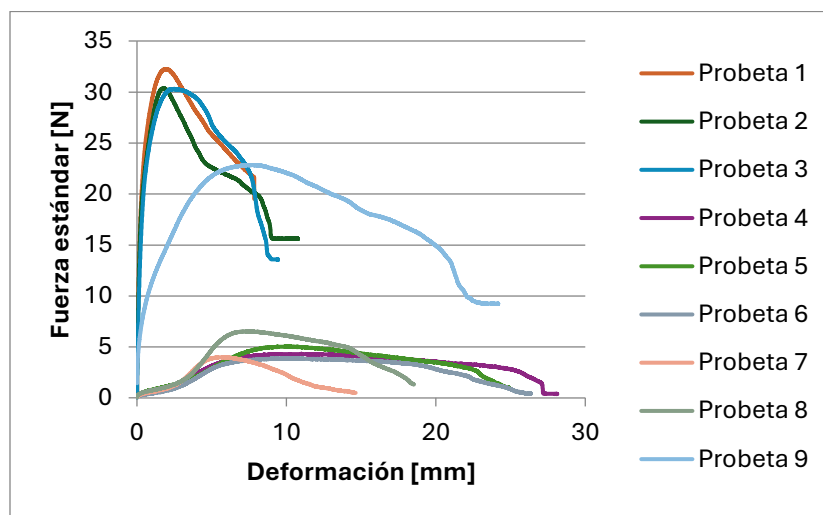


Figura 24. Curvas de fuerza (N) vs. deformación (mm) para ensayos preliminares.

Los datos presentados en la Tabla 5, especifican las formulaciones usadas y sus respectivos valores de resistencia máxima a la tracción para las probetas de la Figura 24. A partir de estos resultados, se observa un efecto negativo en las propiedades mecánicas de las probetas que contienen monoestireno, correspondientes a las Probetas 4 a 8 que no superaron los 0,36 MPa, mientras que las probetas sin este compuesto (Probeta 1, 2 y 3) alcanzaron esfuerzos máximos superiores entre 1,68 MPa y 1,79 MPa.

Este comportamiento contradice la expectativa teórica inicial de que el monoestireno mejoraría la reticulación del material. Adicionalmente a esta deficiencia mecánica, estos resultados respaldan la decisión de descartar su uso debido a los riesgos asociados a su manipulación, dado que la literatura clasifica al monómero de estireno como un compuesto de alta toxicidad y un posible agente carcinógeno [38].

Tabla 5. Parámetros evaluados y resultados de los ensayos preliminares de tracción.

Probeta N°	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)	DMPA (g)	EPS (g)	d-limoneno (g)	Monoestireno (g)	Tiempo curado (min)
1	1,79	0,3	10,7	7,8	0	120
2	1,69	0,3	10,7	7,8	0	120
3	1,68	0,3	10,7	7,8	0	60 UV 60 horno
4	0,24	0,3	10,7	5,0	1,1	60
5	0,28	0,3	10,7	5,0	1,1	120
6	0,21	0,3	10,7	5,0	1,1	90
7	0,22	0,3	10,7	7,8	1,7	90
8	0,36	0,3	10,7	7,8	1,7	60
9	1,27	0,3	10,7	7,8	0	60 horno 60 UV

En segundo lugar, al comparar el curado UV (Probeta 1) con el curado híbrido que combina la acción del horno y lámpara UV (Probeta 3), la diferencia en la resistencia a la tracción es mínima. Dado que el curado fotoquímico ocurre eficientemente a temperatura ambiente, el uso de horno representa un gasto energético innecesario que no mejora las propiedades mecánicas del material, por lo que se descarta su uso.

Es relevante destacar que en el curado híbrido el orden de los factores influye en el sistema puesto que la Probeta 9 (horno seguido de luz UV) presenta un valor de esfuerzo máximo menor que la Probeta 3 (luz UV seguido de horno), sugiriendo que el calor podría interferir negativamente con la formación inicial de la red polimérica, promoviendo la volatilización prematura del d-limoneno antes de que la radicación UV logre consolidar el entrecruzamiento de las cadenas.

Finalmente, la variabilidad en los resultados de las Probetas 4, 5 y 6 sometidas a tiempos de 60, 120 y 90 minutos, respectivamente, permite confirmar que el tiempo de exposición a la radiación UV es una variable crítica en el proceso, la cual condiciona las propiedades mecánicas finales del material.

7.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO MODDE PRO-13

Para evaluar la influencia de la cantidad de fotoactivador y el tiempo de radiación UV sobre la resistencia a la tracción del material compuesto por EPS, d-limoneno y fotoiniciador DMPA, los datos experimentales se procesaron mediante el software MODDE PRO-13 utilizando una metodología de superficie de respuesta. Se empleó un diseño experimental circunscrito central compuesto con un modelo polinomial cuadrático, el cual permite capturar curvaturas en la respuesta y efectos de interacción complejos. El ajuste del modelo se realizó mediante el método de mínimos cuadrados parciales, para que la estimación de los coeficientes de regresión sea robusta. En la Tabla 6, se presenta la matriz de diseño experimental factorial con su respectiva variable de respuesta.

Tabla 6. Matriz de diseño experimental factorial con resultados.

Nº Exp	Tiempo (min)	Cantidad de fotoactivador (%)	Tracción (MPa)
1	60	1,50	4,69
2	120	1,50	3,86
3	60	5,00	2,41
4	120	5,00	3,37
5	48	3,25	1,75
6	132	3,25	3,50
7	90	0,78	1,29
8	90	5,73	0,54
9	90	3,25	2,94
10	90	3,25	2,72
11	90	3,25	2,50

Al procesar los resultados de los 11 experimentos presentados en la Tabla 6 en el software, el análisis de varianza (ANOVA) arrojó un indicador Q^2 negativo con un valor de -0,20. En el modelado estadístico, este parámetro representa la capacidad predictiva del modelo, donde un valor negativo significa que las ecuaciones generadas no son capaces de predecir de manera confiable nuevas respuestas dentro del espacio de diseño. Al mismo tiempo, está el coeficiente de determinación R^2 , el cual explica la variación de los datos que es capturada por el modelo, que se posicionó lejos del valor ideal de 1 con un valor de 0,45.

Con el fin de mejorar la calidad de ajuste y capacidad predictiva del modelo estadístico, se procedió a excluir los experimentos 7 y 8 del análisis final. Por un parte, el experimento N°7 constituye un punto extremo en el espacio de diseño para la variable de concentración de fotoiniciador, presentando el valor mínimo evaluado con 0,78%. Su resultado a la resistencia a la tracción fue de apenas 1,29 MPa, un valor deficiente en comparación con los otros experimentos del diseño. Estadísticamente, ese dato atípico ejerce un alto efecto de apalancamiento, alterando la tendencia general de los datos.

Por otro lado, el experimento N°8 registró la tendencia a la tracción más baja de toda la matriz presentada en la Tabla 6 con un valor de 0,54 MPa, a pesar de tener la cantidad máxima de fotoiniciador. Al contrastar este resultado con los experimentos N°3 y N°4, los cuales también presentaban altos niveles de fotoiniciador, pero presentaron resistencias a la tracción mayores de 2,41 MPa y 3,37 MPa, respectivamente, se evidencia que el valor de 0,54 MPa es una desviación o anomalía experimental. Desde el punto de vista fisicoquímico, es probable que, a concentraciones elevadas de fotoiniciador, ocurra un fenómeno de saturación, ocasionando un debilitamiento estructural.

En consecuencia, el descarte de estos datos atípicos, cuyos valores de respuesta deficientes se ubicaban en los extremos de los factores analizados y mostraban un comportamiento opuesto a la tendencia esperada, permitió un reajuste del modelo generado por el software mejorando los indicadores del ajuste. Específicamente, el R^2 ascendió a un valor de 0,87, lo que indica que el modelo reajustado logra explicar el 87% de la variabilidad experimental. Del mismo modo, el Q^2 logró revertir su estado negativo inicial, alcanzando un valor positivo de 0,25. Esta optimización estadística corrobora que el descarte de las corridas 7 y 8 fue una decisión necesaria para otorgar validez estadística al proceso de optimización del material compuesto.

7.3. ANÁLISIS DE EFECTOS DEL MODELO

Una vez validado estadísticamente el modelo, se analizaron los efectos individuales e interactivos de las variables del proceso sobre la resistencia mecánica a la tracción. Este comportamiento se muestra en la Figura 25, donde la variable Can representa la cantidad de fotoiniciador y la variable Tie corresponde al tiempo de exposición a la radiación UV.

A partir de la Figura 25, se determinó que el término cuadrático de la concentración de fotoiniciador (Can*Can) presenta el coeficiente positivo más alto. Estadísticamente, esto sugiera la existencia de una marcada curvatura convexa en la superficie de respuesta del modelo. Por el contrario, el término cuadrático del tiempo (Tie*Tie) presenta un efecto prácticamente nulo y cercano a cero, lo que indica que esta variable actúa sobre el sistema bajo una tendencia predominante lineal.

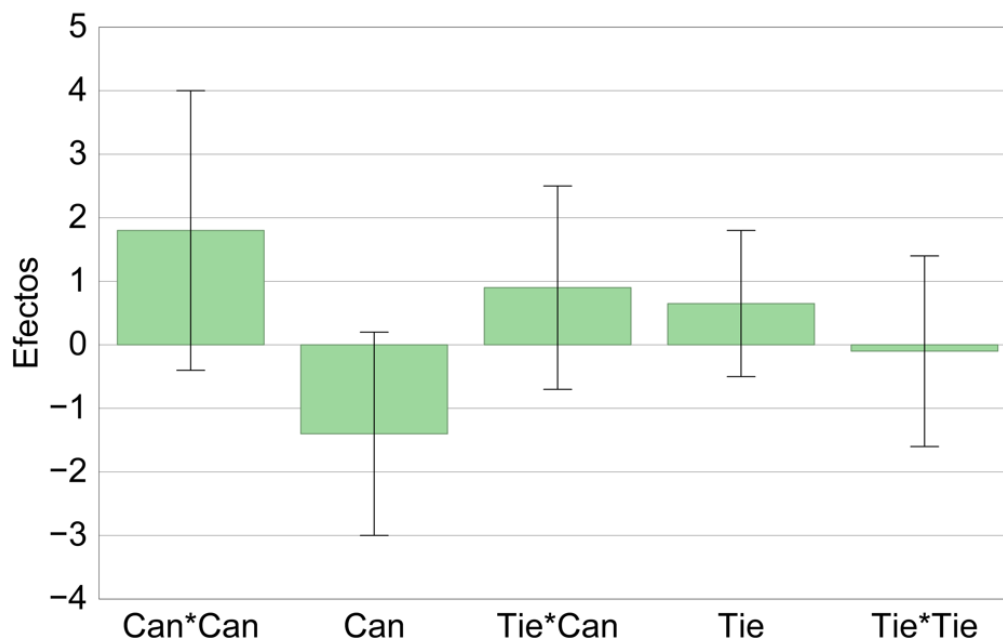


Figura 25. Efectos de las variables de entrada entregado por MODDE PRO-13.

Respecto a los factores lineales, la concentración de fotoiniciador (Can) muestra un efecto negativo. Este indicador confirma que un exceso en la dosificación del reactivo tiende a disminuir la resistencia a la tracción de las probetas, tal como se demostró empíricamente en el experimento N°8 de la Tabla 6. En contraste, la variable del tiempo de exposición (Tie) actúa de forma positiva, favoreciendo la consolidación estructural del material.

Finalmente, el término de interacción cruzada (Tie*Can) registra un valor positivo, reflejando la existencia de un leve efecto sinérgico entre ambas variables del proceso, es decir, el impacto favorable del tiempo de curado se ve ligeramente potenciado bajo configuraciones específicas de concentración de fotoiniciador.

7.4. SUPERFICIE DE RESPUESTA Y REGIÓN OPTIMIZADA DE PREDICCIÓN

Con el fin de visualizar la interdependencia de las variables operativas (cantidad de fotoactivador y tiempo de exposición a luz UV) y delimitar las condiciones optimizadas de procesamiento, se analizó el gráfico de contorno en dos dimensiones (2D) generado por el software MODDE PRO-13.

La Figura 26 presenta el mapa de contorno para la fuerza de tracción en función del tiempo de exposición y la concentración de fotoiniciador. Visualmente, se aprecia que los valores máximos de respuesta, es decir, aquellos superiores 4 MPa, son representados por la franja roja ubicada en la zona inferior del gráfico. Esta región corresponde a los niveles mínimos evaluados para la cantidad de fotoactivador (1,5%).

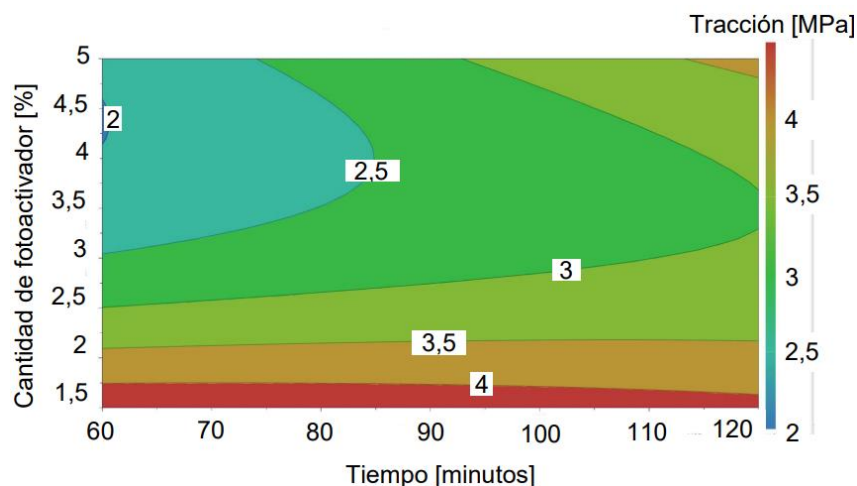


Figura 26. Mapa de contorno de la superficie de respuesta para la resistencia a la tracción.

Esta distribución indica que el sistema no posee un único punto crítico o valor óptimo absoluto dentro del espacio de diseño estudiado. Por el contrario, la respuesta optimizada se distribuye a lo largo de la región de color rojo de la Figura 26, cuya amplitud depende de la sintonía entre ambas variables.

Ante este escenario, la selección de un punto de operación optimizado dentro de esa franja roja requirió considerar las interacciones estadísticas del modelo. Previamente, el análisis de los coeficientes (Figura 25) demostró que la interacción cruzada entre el tiempo y la cantidad de fotoiniciador ($Tie*Can$) ejerce un efecto positivo sobre la resistencia a la tracción, mientras que el término cuadrático del tiempo ($Tie*Tie$) presenta un comportamiento levemente negativo. Por esta razón, para evaluar el efecto aislado de la variable temporal en esta zona de alto desempeño mecánico, se definió un punto de concentración de 1,5% de fotoiniciador y 90 minutos de exposición a la radiación UV. Esta elección permitió analizar el punto central en el eje de las abscisas correspondiente al tiempo (Figura 26), complementando el comportamiento mecánico que ya se había caracterizado a los extremos de 60 y 120 minutos bajo la misma concentración dentro de la matriz experimental inicial (Tabla 6).

Adicionalmente, al considerar que el incremento en la cantidad de fotoiniciador ejerce un efecto negativo sobre la red polimérica como se observa en la Figura 25, se procedió a aplicar la técnica analítica de escalamiento hacia el exterior de la región experimental. Con el objetivo de estudiar el comportamiento de la curvatura de primer orden, se formuló una nueva condición operando a una concentración de 1,1% de fotoiniciador, cuyo valor representa el promedio entre la menor concentración entregada por la matriz experimental inicial correspondiente a 0,78% (Tabla 6) y el límite inferior del modelo (1,5%), manteniendo el tiempo de exposición en 90 minutos. Este escalamiento resulta necesario para determinar la dirección de máximo beneficio estructural, y validar si una reducción adicional en la cantidad de fotoiniciador permite maximizar la fuerza de tracción del material compuesto.

7.5. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS OPTIMIZADOS EN EL RANGO DE ESTUDIO

Con el propósito de validar las propiedades mecánicas bajo las condiciones recomendadas por el rango optimizado del modelo, se fabricaron probetas utilizando una concentración de fotoiniciador del 1,5% y un tiempo de exposición a la radiación de 90 minutos. Para esta configuración, el software predictivo arrojó los parámetros detallados en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades mecánicas predichas por el modelo (1,5% DMPA).

Tiempo (min)	Cantidad Fotoiniciador (%)	Tracción (MPa)	Lower (MPa)	Upper (MPa)
90	1,50	4,32	2,95	5,69

Los resultados empíricos obtenidos en el laboratorio bajo las condiciones de la Tabla 7 se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente (1,5% DMPA).

Fotoactivador (%)	Probetas	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)
1,5	12.1	4,52
1,5	12.2	4,23
1,5	12.3	3,40
1,5	12.4	3,90
1,5	12.5	4,62
1,5	12.6	4,27

Paralelamente, para evaluar la técnica de escalamiento operando a una concentración reducida de fotoiniciador 1,1% y 90 minutos de radiación UV, las proyecciones del modelo se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades mecánicas predichas por el modelo (1,1% DMPA).

Tiempo (min)	Cantidad Fotoactivador (%)	Tracción (MPa)	Lower (MPa)	Upper (MPa)
90	1,10	4,94	3,12	6,76

Los resultados experimentales correspondiente al escalamiento de la Tabla 9 se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente (1,1% DMPA).

Fotoactivador (%)	Probetas	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa)
1,1	13.1	3,10
1,1	13.2	2,89
1,1	13.3	3,11
1,1	13.4	3,09
1,1	13.5	3,09
1,1	13.6	2,73

Durante la etapa de fotopolimerización, las probetas fueron dispuestas en grupos de tres unidades dentro de placas Petri (Figura 27) para su exposición a la radiación UV. Al analizar los resultados del esfuerzo máximo a la tracción de la Tabla 8 y Tabla 10, se detectó un patrón de dispersión sistemático, donde en cada lote de curado, una de las 3 probetas presentó valores de resistencia mecánica a la tracción inferiores al promedio de sus pares. Este fenómeno físico se atribuye a la distribución espacial de la irradiancia UV suministrada por la lámpara.

Las probetas ubicadas en los extremos de la placa recibieron una dosis energética menor, derivando en un grado de reticulación incompleto. Dado que estos resultados se deben al montaje experimental y no a la capacidad mecánica del material, se procedió a su exclusión para el análisis estadístico final.

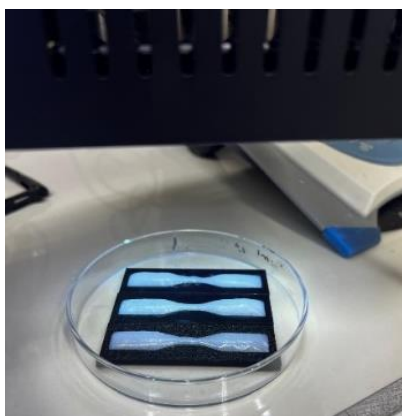


Figura 27. Distribución de los moldes 3D sobre placa de Petri.

La depuración de estos datos anómalos, específicamente las probetas 12,3 y 12,4 para la formulación de 1,5%, y las probetas 13,2 y 13,6 para la formulación del 1,1% permitió un aumento significativo en la precisión del modelo.

En términos estadísticos, la desviación estándar es el indicador que cuantifica el grado de dispersión de los datos alrededor de la media. Para las muestras con 1,5% de fotoiniciador, la corrección ajustó el esfuerzo máximo promedio de 4,16 MPa (con una desviación estándar de 0,45 MPa) a un valor más representativo de 4,41 MPa, reduciendo la desviación estándar en más de un 50% con un valor de 0,19 MPa. De manera análoga, para la condición escalada de 1,1% de fotoiniciador, el promedio corregido ascendió de 3,00 MPa con desviación estándar de 0,16 MPa a 3,10 MPa con una desviación de 0,01 MPa. Esta corrección garantiza que los valores analizados reflejen el desempeño estructural del material bajo un curado fotoquímico optimizado.

El contraste de estos valores empíricos permite validar la capacidad del modelo proporcionado por el software MODDE PRO-13. En el caso de las probetas al 1,5% de fotoiniciador la totalidad de las muestras se posicionó dentro del intervalo de confianza predicho por el software (2,95 MPa – 5,69 MPa). Aún más destacable, es que el promedio experimental de 4,41 MPa fue aún mejor que el valor teórico estimado de 4,32 MPa.

Por otro lado, al evaluar la configuración escalada correspondiente al 1,1% de fotoiniciador, el modelo estadístico predijo un intervalo de resistencia la tracción situada entre 3,12 MPa y 6,76 MPa (Tabla 9). Sin embargo, los valores empíricos obtenidos en el laboratorio oscilaron entre 3,09 MPa y 3,10 MPa, resultando en un promedio experimental de 3,10 MPa. Si bien los valores individuales no se encuentran dentro del rango predicho, la diferencia absoluta entre el promedio experimental y el límite inferior del rango es de 0,02 MPa, lo que representa un error relativo de 0,64%.

Esta variación se considera estadísticamente no significativa al contrastarla con las tolerancias habituales. De acuerdo con los estudios de precisión de la norma ASTM D638, los ensayos de tracción en matrices plásticas exhiben una alta variabilidad natural, derivados de su característica viscoelástica [56]. En consecuencia, registrar un error empírico menor al 1%, en conjunto con una dispersión de los resultados que presentó una desviación estándar de 0,01 MPa, valida la precisión predictiva del modelo y replicabilidad en la confección del material.

En términos de optimización, este comportamiento empírico corrobora que la concentración ideal de fotoiniciador para maximizar la resistencia a la tracción del material compuesto se encuentra entre el 1,1 % y el 1,75 %, correspondiente a la región máxima de respuesta como se observa en la zona roja del mapa de contorno de la superficie de respuesta en la Figura 26.

7.6. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

7.6.1. ANÁLISIS DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Las probetas formuladas con el fotoiniciador DMPA, tras ser expuestas a la radiación UV según su condición experimental establecida, requirieron un período de estabilización de 10 días para alcanzar un curado óptimo. En contraste, las muestras de control (sin fotoiniciador) necesitaron 21 días para consolidarse mediante la evaporación del solvente por difusión pasiva, lo que representa más del doble del tiempo operativo. El criterio físico para determinar este tiempo de curado y secado óptimo se estableció como el punto en el cual las probetas lograban desprenderse con facilidad del molde impreso en 3D, sin presentar adherencia residual y sin requerir la aplicación de fuerza mecánica ni el uso de herramientas auxiliares para su extracción.

Una vez desmoldadas, las muestras fueron sometidas a ensayos mecánicos de tracción. Para el presente análisis, se evaluaron y contrastaron las curvas de esfuerzo-deformación correspondientes a las probetas con las concentraciones de fotoiniciador optimizadas (1,5% y 1,1%, ambas con 90 minutos UV), la muestra de control (sin fotoiniciador) y los materiales comerciales utilizados como referencia estructural comparativa (acrílico, tableros MDF y silicona vegetal).

Los valores de esfuerzo (σ) y deformación unitaria (ϵ) fueron calculados a partir de los datos experimentales de fuerza aplicada y elongación según la Ecuación 5 y 6 (el registro de datos crudos junto con los datos tratados se encuentra detallado en el Anexo A). A continuación, la Figura 28 muestra las curvas de esfuerzo-deformación comparativas de las formulaciones optimizadas frente a la muestra de control.

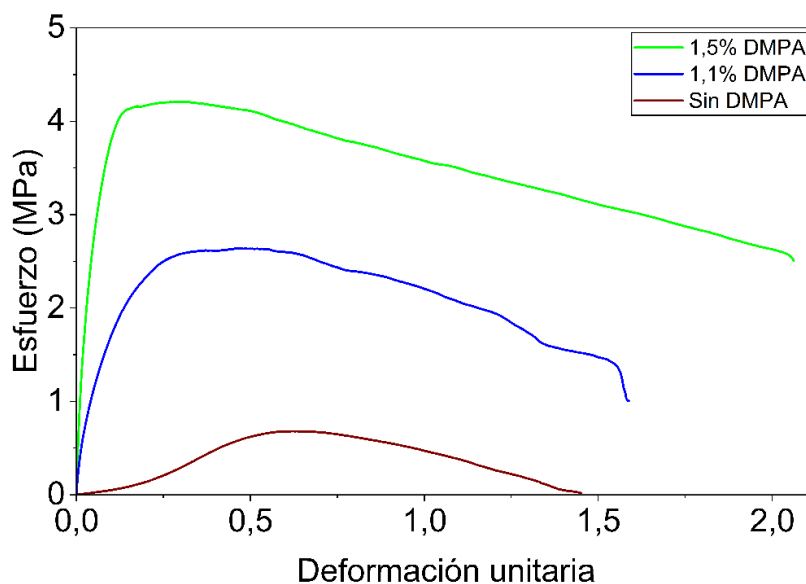


Figura 28. Curvas de esfuerzo-deformación comparativas para muestras curadas y el control.

A partir de estas curvas, se determinaron las propiedades mecánicas fundamentales de los materiales utilizando el software OriginLab. El módulo de elasticidad se calculó mediante un ajuste lineal en la región elástica de cada curva, evaluando la pendiente, la validez de este ajuste se respalda mediante el coeficiente de determinación (R^2). Asimismo, la tenacidad se obtuvo calculando el área bajo la curva de esfuerzo-deformación hasta el punto de fractura mediante integración numérica. El detalle metodológico de ambos cálculos se describe en el Anexo B. Los resultados consolidados de estas propiedades mecánicas se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Propiedades mecánicas de las probetas sometidas a ensayos de tracción.

Material	Módulo de elasticidad (MPa)	R^2 (Ajuste lineal)	Tenacidad (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
1,5% DMPA	$37,8 \pm 0,4$	0,95	7,10	4,41
1,1% DMPA	$12,84 \pm 0,08$	0,97	3,34	3,10
Sin DMPA	$1,764 \pm 0,001$	0,97	0,55	0,83

Al comparar los resultados de la Tabla 11, se evidencia que la reticulación fotoquímica mejora las propiedades mecánicas considerados de los ensayos de tracción del nuevo material. En cuanto a la resistencia máxima a la tracción, la muestra de control (sin DMPA) registró una resistencia de apenas 0,83 MPa. Por el contrario, la incorporación de un 1,5% de fotoiniciador y su posterior curado UV elevó la resistencia a 4,41 MPa, cuyo valor es 5,4 veces superior a la muestra de control. Esto sugiere que la radiación UV logró activar el DMPA para conformar una red polimérica tridimensional sólida. Gracias a este entrecruzamiento, el material incrementa su capacidad para soportar cargas mecánicas mayores antes de sufrir deformaciones plásticas irreversibles.

Adicionalmente, el módulo de Young, cuyo parámetro representa la rigidez del material en su zona elástica lineal (validada por coeficientes R^2 superiores a 0,95 en todos los casos), experimentó un salto drástico. Pasó de 1,76 MPa en el material sin curar, a 12,84 MPa en el escalamiento con 1,1% de fotoactivador, alcanzando finalmente 37,8 MPa en la formulación usando 1,5%. Esto implica que la última formulación es casi 3 veces más rígida que la de 1,1% de DMPA y 21 veces más rígida que la muestra de control. Este comportamiento indica que los enlaces covalentes generados durante la fotopolimerización restringen la movilidad y deslizamiento de los segmentos de las cadenas poliméricas cuando son sometidas a cargas axiales, ofreciendo una mayor resistencia a la deformación.

Además, la tenacidad, calculada como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación, refleja la capacidad del material para absorber energía antes de la fractura. Los datos revelan que la resina curada con 1,5% de DMPA alcanzó una tenacidad de 7,10 MPa, un valor casi 13 veces superior a los 0,55 MPa de la muestra de control. Esto indica que el nuevo compuesto requiere de un mayor trabajo mecánico para fracturarse, reduciendo la sensibilidad a fallas prematuras y sugiriendo un potencial desempeño favorable ante impactos.

Al contrastar las 2 concentraciones de fotoiniciador evaluadas, se evidencia que las propiedades mecánicas son superiores en la formulación de 1,5%. Incrementar el DMPA de 1,1% a 1,5% triplicó el módulo de elasticidad, duplicó la tenacidad y aumentó la resistencia a la tracción en un 42%. Esto señala que, dentro de los rangos estudiados, la concentración de fotoiniciador de 1,5% se aproxima a la densidad de entrecruzamiento óptima que maximiza el desempeño en tracción.

Por otro lado, se determinaron los valores de esfuerzo (σ) y deformación unitaria (ϵ) para los materiales comerciales de referencia, calculados a partir de los datos experimentales de fuerza aplicada y elongación mediante la Ecuación 5 y 6 (el registro de datos crudos junto con los datos tratados se encuentra detallado en el Anexo A). A continuación, la Figura 29 presenta las curvas de esfuerzo-deformación comparativas entre el material compuesto optimizado (1,5% DMPA) y los materiales comerciales (acrílico, tableros MDF y silicona vegetal).

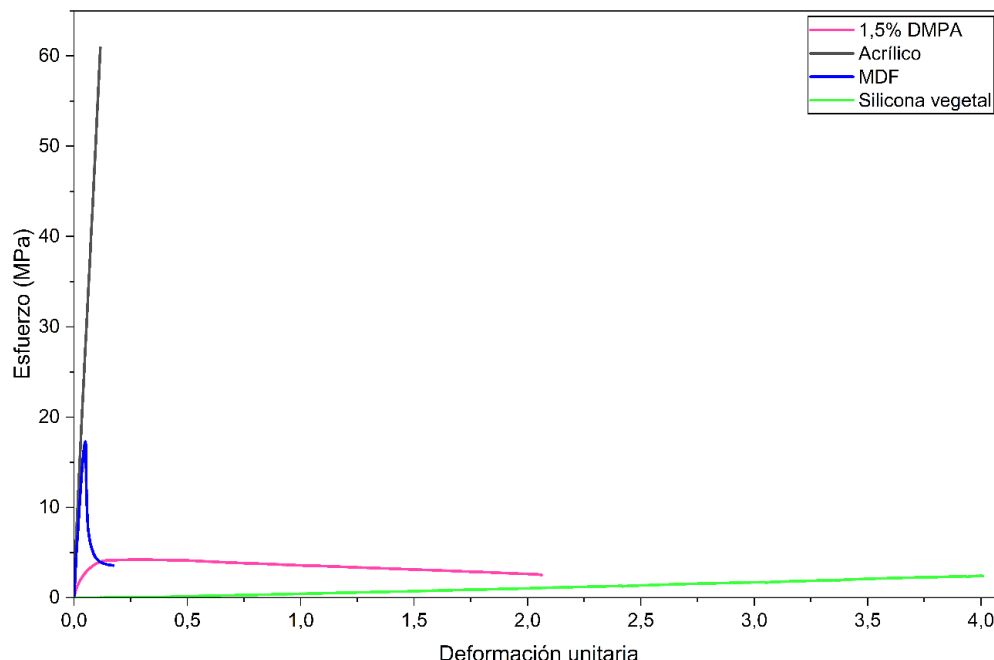


Figura 29. Curvas de esfuerzo-deformación comparativas para muestra 1,5% DMPA y materiales comerciales.

Para evaluar el desempeño del material optimizado frente a los materiales comerciales, el análisis se centró en la tenacidad y resistencia máxima a la tracción. Se omitió la comparación directa del módulo de elasticidad dado que la Ley de Hooke asume un comportamiento elástico lineal y dentro de los materiales de referencia se encuentra el MDF que está compuesto por fibras de madera aglutinadas presentando una estructura heterogénea que no se ajusta a este modelo elástico lineal. Los resultados consolidados de estas propiedades mecánicas se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparativa de propiedades mecánicas entre el material compuesto optimizado (1,5% DMPA, 90 minutos UV) y referentes comerciales.

Material	Tenacidad (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)
1,5% DMPA	7,10	4,41
Acrílico	3,66	60,92
MDF	1,12	17,29
Silicona vegetal	4,33	2,41

A partir de los datos expuestos en la Tabla 12, se observa que el material compuesto optimizado (1,5% DMPA) posee una ventaja mecánica comparativa respecto a la capacidad de absorción de energía. Si bien los materiales rígidos consolidados en la industria, como el acrílico y el tablero MDF, presentan resistencias máximas a la tracción notablemente superiores (60,92 MPa y 17,29 MPa, respectivamente), su comportamiento mecánico es frágil, fallando de forma repentina a deformaciones unitarias bajas como se observa en la Figura 29. Esta fragilidad también se refleja en los bajos índices de tenacidad (3,66 MPa para el acrílico y 1,12 MPa para el MDF), indicando que estos materiales colapsan rápidamente.

Por el contrario, el material desarrollado exhibe un módulo de tenacidad de 7,10 MPa, cuyo indicador es casi el doble que el del acrílico y 6 veces superior al MDF, lo que significa que el polímero es capaz de absorber más energía que estos materiales antes de su ruptura final en el ensayo de tracción. Este comportamiento dúctil permite proyectarlo como una alternativa para aplicaciones donde se requiera amortiguación de energía. Asimismo, al contrastarlo con un compuesto flexible de naturaleza viscoelástica como la silicona vegetal, el material optimizado muestra valores superiores tanto en resistencia máxima a la tracción como en tenacidad.

Finalmente, la resistencia máxima a la tracción del material optimizado (1,5 % DMPA), cuyo valor experimental alcanzó los 4,41 MPa, fue contrastada con valores reportados de referencia de materiales convencionales. Al evaluarlo bajo los parámetros de la Norma Chilena NCh1990 sobre madera estructural, se observa que la capacidad máxima de tracción del nuevo compuesto supera el umbral de tensión admisible exigido para la madera de grado estructural N°4 con clase f7, el cual está fijado en 4,1 MPa [54].

Sin embargo, el cumplimiento de esta propiedad mecánica bajo ensayo axiales de tracción no constituye un predictor suficiente para el comportamiento a largo plazo del material, ni permite una sustitución directa de la madera. Existe una diferencia física entre ambos materiales, pues la madera es un material fibroso cuyo comportamiento elástico se mantiene hasta que ocurre una falla localizada. Por el contrario, el material desarrollado posee una matriz polimérica viscoelástica, la cual, ante la aplicación de fuerzas sostenidas, sus cadenas macromoleculares tienden a deslizarse entre sí, provocando una deformación plástica y haciendo que el material “fluya” hasta llegar a su ruptura.

Debido a esta naturaleza viscoelástica, el comportamiento del material compuesto está ligado a fenómenos mecánicos dependientes del tiempo que no fueron medidos experimentalmente en esta investigación, por lo que su discusión se presenta como una especulación teórica y objeto de trabajo futuro. Entre estos fenómenos destaca la fluencia o *creep*, definida como la deformación progresiva que sufre un material cuando se encuentra sometido a una condición de esfuerzo constante y sostenido a lo largo del tiempo, incluso bajo la acción de su propio peso [33]. Se especula que, al igual que ocurre con estructuras poliméricas comerciales, ante una carga fija continua el material compuesto tendería a estirarse progresivamente aumentando su longitud hasta la fractura, comprometiendo su estabilidad dimensional en un uso estructural. Asimismo, bajo condiciones de fatiga provocadas por cargas cíclicas o vibraciones repetitivas, es altamente probable que el material acumule microdeformaciones residuales que alteren su geometría mucho antes de alcanzar el colapso.

Por ello, para validar si este material puede insertarse competitivamente en el mercado técnico estructural, no es posible compararlo directamente con la madera basándose únicamente en ensayos axiales. Se requiere una caracterización complementaria que incluya ensayos de flexión, compresión y torsión. Teóricamente, se especula que ante esfuerzos de torsión el material fallaría de forma más acelerada que la madera estructural, mientras que en ensayos de compresión donde la madera tiende a pandearse de forma elástica preservando parte de su sección el polímero propuesto tendería a deformarse plásticamente, fluyendo y tomando la forma de la carga compresiva aplicada.

Adicionalmente a su potencial estructural, al contrastar el desempeño del material compuesto con las espumas de amortiguación tradicionales en el sector del embalaje, se tiene que el nuevo material bajo su formulación óptima (1,5% de DMPA) supera en más de veinte veces la resistencia a la tracción de la espuma de polietileno convencional (0,22 MPa) y sobrepasa al propio EPS de uso comercial, cuyas resistencias máximas a la tracción reportadas rondan los 0,58 MPa. Estos resultados proyectan al material desarrollado como una alternativa viable y mecánicamente superior frente a los materiales de embalaje usados actualmente, lo que implica una mayor integridad frente a la rotura.

En cuanto a la resistencia al desgaste y penetración, se evaluó la dureza superficial de las 33 probetas, cuyos valores promediados se presentan en la Tabla 13, los datos de las mediciones individuales se encuentran en el Anexo C.

Según los lineamientos de la norma internacional ASTM D2240, obtener una lectura de dureza menor a 20 indica que el dato no se considera confiable en términos absolutos. Como se observa en la Tabla 13, todas las formulaciones ensayadas presentan valores por debajo de este umbral de confiabilidad empírica.

Tabla 13. Dureza superficial promedio (Shore D) de las muestras evaluadas.

N° Exp	Tiempo (min)	Cantidad de fotoactivador (%)	Promedio Dureza
1	60	1,50	13,0 ± 1,0
2	120	1,50	11,0 ± 1,1
3	60	5,00	9,9 ± 0,5
4	120	5,00	9,7 ± 0,5
5	48	3,25	8,8 ± 0,1
6	132	3,25	9,0 ± 0,5
7	90	0,78	7,8 ± 0,2
8	90	5,73	7,4 ± 1,2
9	90	3,25	8,6 ± 0,8
10	90	3,25	9,2 ± 0,6
11	90	3,25	8,7 ± 0,3

Este fenómeno no obedece a un error humano ni instrumental, sino que revela una propiedad intrínseca del nuevo compuesto, que la retención natural de d-limoneno actúa como un agente plastificante dentro de la red tridimensional. Esto le otorga al material características más cercanas a un elastómero o plástico semirrígido, haciéndolo demasiado "blando" para la aguda geometría del indentador Shore D, el cual está diseñado para plásticos de extrema rigidez.

Por consiguiente, se debe descartar el registro definitivo en esta escala, tal como lo recomienda la norma ASTM D2240, para la correcta elaboración de la ficha técnica comercial del material, las futuras mediciones deberán ejecutarse cambiando a la escala inmediatamente inferior, utilizando un durómetro tipo Shore A

7.6.2. ANÁLISIS QUÍMICO MEDIANTE ESPECTROSCOPIA FITR

Se realizó un análisis mediante FTIR-ATR para evaluar el grado de conversión del material fotoquímico, además, identificar los grupos funcionales presentes en la matriz polimérica y correlacionar su estructura química con el desempeño mecánico. A través de este análisis, se evaluó la interacción física y química entre el EPS, el d-limoneno y el DMPA, así como la cinética de curado en función del tiempo de exposición UV.

En primer lugar, se evaluó la naturaleza de la disolución del poliestireno expandido y su posterior reacción fotoquímica. Para ello, se compararon los espectros del EPS virgen, de la muestra de control y de la formulación óptima correspondiente a 1,5% DMPA curada durante 90 minutos bajo radiación UV (Figura 30).

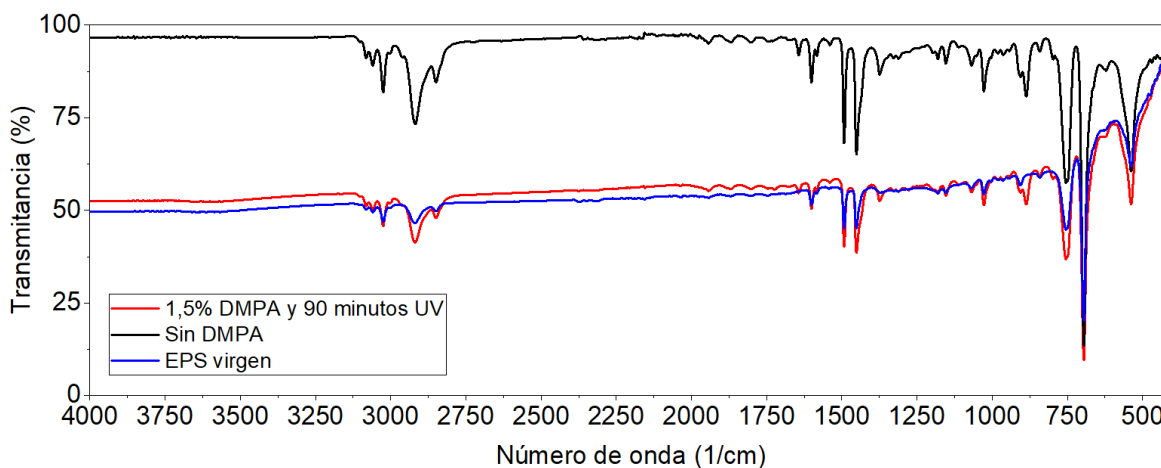


Figura 30. Espectros FTIR comparativos entre EPS virgen, muestra de control (sin DMPA) y material compuesto optimizado (1,5% DMPA, 90 minutos UV).

El análisis comparativo entre la muestra de control y el EPS virgen confirma que la disolución con d-limoneno constituye un proceso estrictamente físico. Ambas curvas comparten la huella espectral característica del poliestireno, destacando vibraciones de estiramiento de enlaces C-H alifáticos de la cadena principal (en la región de 2995 cm^{-1} a 2855 cm^{-1}) y la flexión fuera del plano característica de los anillos aromáticos (744 cm^{-1} y 699 cm^{-1}).

Las variaciones observadas en el espectro de la muestra de control corresponden a la superposición de las señales del d-limoneno residual que quedó atrapado físicamente en el núcleo de la matriz polimérica como se evidencia en la zona de 1640 cm^{-1} a 1645 cm^{-1} , donde se observa un pico en las curvas roja y negra (Figura 30) correspondiente a los dobles enlaces alifáticos que posee el d-limoneno y no así el poliestireno puro. Esta retención del solvente actúa como un plastificante, lo cual justifica el deficiente módulo de elasticidad ($1,764\text{ MPa}$) registrado en los ensayos de tracción.

Por otro lado, el espectro de la formulación con 1,5% de DMPA presenta una transformación química fundamental tras la radiación UV. La evidencia del entrecruzamiento radica en el comportamiento del doble enlace del d-limoneno (visible en la banda de 885 cm^{-1}). La disminución en la intensidad de este pico sugiere que los dobles enlaces del solvente se consumieron al reaccionar con los radicales libres generados por el fotoiniciador, logrando reticular el sistema. La consolidación de esta nueva red macromolecular explica el aumento de las propiedades del material alcanzando una resistencia a la tracción de $4,41\text{ MPa}$.

Adicionalmente, se realizó la comparación de la reacción de curado mediante FTIR para las probetas formuladas con 1,5% de DMPA sometidas a 60, 90 y 120 minutos de irradiación UV. El objetivo fue analizar el efecto aislado de la variable temporal dentro del rango óptimo de operación establecido en la superficie de respuesta (Figura 26). En la Figura 31 se presentan los espectros superpuestos para estas condiciones.

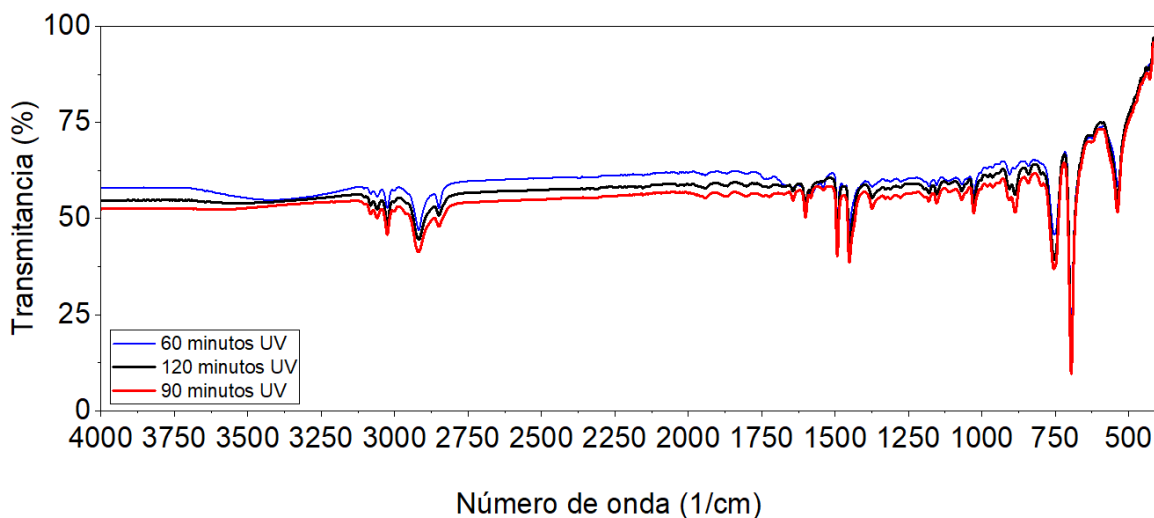


Figura 31. Espectros FTIR comparando probetas con 1,5% DMPA a 60, 90 y 120 minutos de exposición UV.

Al evaluar los espectros de la Figura 31, el grado de curado no debe inferirse a partir de la transmitancia global, la cual puede variar por factores instrumentales, sino analizando la intensidad de los picos reactivos frente a los picos inertes de referencia. Bajo este criterio, al observar la proporción de atenuación del pico del doble enlace ($885\text{-}890\text{ cm}^{-1}$) y el estiramiento alifático ($1640\text{-}1645\text{ cm}^{-1}$), correspondientes a las insaturaciones del d-limoneno, se determina que a los 60 minutos los dobles enlaces aportados por el solvente han sido consumidos casi en su totalidad.

A nivel mecánico, la consolidación de esta red a los 60 minutos maximiza la resistencia a la tracción del material, alcanzando un valor óptimo absoluto de 4,69 MPa. En contraste, la prolongación del tiempo de curado disminuye las propiedades del compuesto, a los 90 minutos, la red pierde flexibilidad y se vuelve rígido, lo que explica la leve disminución de la resistencia a 4,41 MPa. Este fenómeno empeora a los 120 minutos, donde la resistencia cae a 3,86 MPa. Esta caída mecánica se atribuye al inicio de una fotodegradación por sobreexposición a la radiación UV, la cual induce reacciones secundarias provocando que la estructura colapse prematuramente bajo tensión.

Por otra parte, el espectro de la probeta curada durante 60 minutos presenta un pico prominente en 1529 cm^{-1} en comparación con los demás tiempos, correspondiente a los subproductos fotoquímicos estables derivados de la fotólisis del fotoiniciador. La aparición de esta señal indica que el DMPA generó radicales libres para iniciar la reacción de reticulación.

Además, para comprobar la integridad del polímero base durante estos tratamientos, se compararon las probetas con 1,5% de DMPA (60, 90 y 120 minutos), la muestra de control (sin DMPA) y EPS virgen como se muestra en la Figura 32.

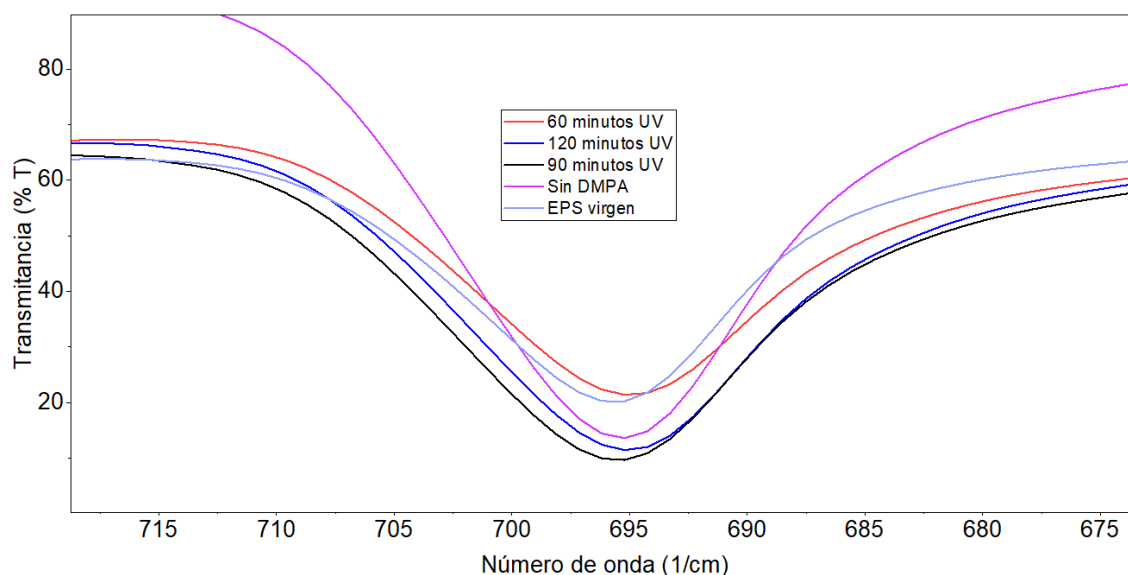


Figura 32. Curvas del pico característico a 695 cm^{-1} en distintas condiciones experimentales.

A partir de la Figura 32, se observa la señal a 695 cm^{-1} , correspondiente a la flexión fuera del plano del anillo aromático del poliestireno. En las diversas condiciones experimentales, este anillo mantiene su presencia en todas las muestras evaluadas, pero exhibe variaciones en su anchura.

En la muestra de control (sin DMPA), el pico se presenta más estrecho y agudo. Este perfil es característico de un estado de alta movilidad molecular, el solvente residual atrapado en la matriz actúa como un agente plastificante que incrementa el volumen libre del sistema, permitiendo que los anillos aromáticos vibren en un microentorno químico homogéneo, convergiendo en una frecuencia vibracional muy definida, lo que genera una disminución en sus propiedades mecánicas.

Por el contrario, en las muestras fotoquímicas con 1,5 % de DMPA, la banda de 695 cm^{-1} experimenta un ensanchamiento. Este fenómeno, conocido en espectroscopía como ensanchamiento no homogéneo, ocurre cuando la reticulación fotoquímica encadena las macromoléculas en una red tridimensional rígida. Al restringirse severamente la movilidad de las cadenas, los anillos aromáticos quedan bloqueados en una amplia variedad de conformaciones estéricas y microentornos sometidos a distintas tensiones de restricción. Esta multiplicidad de estados energéticos genera una dispersión en las frecuencias vibracionales individuales, resultando en la observada ampliación global del pico.

Finalmente, el espectro del EPS virgen exhibe una anchura intermedia, congruente con su naturaleza de termoplástico amorfo en estado sólido, el cual carece de la plasticidad extrema de la muestra de control, pero no posee las restricciones estructurales de los enlaces cruzados de la resina curada.

Este ensanchamiento espectral inducido por la radiación UV corrobora a nivel vibracional la drástica restricción de movilidad de las cadenas, lo que justifica de manera exacta el aumento exponencial de rigidez (módulo de Young) evidenciado previamente en los ensayos de caracterización mecánica.

Esto demuestra de manera concluyente que, si bien la sobreexposición UV (120 minutos) afecta los enlaces cruzados del d-limoneno mermando su desempeño mecánico, el esqueleto aromático principal del poliestireno reciclado es térmicamente estable y no sufre destrucción ni degradación fotoquímica. En conjunto, estos resultados corroboran que el tiempo ideal de irradiación para maximizar el desempeño estructural del material compuesto sin inducir fragilización térmica se encuentra entre los 60 y 90 minutos.

7.6.3. ANÁLISIS TÉRMICO MEDIANTE DSC Y TGA

Con el objetivo de evaluar la estabilidad térmica y las transiciones de fase de los polímeros, se emplearon las técnicas calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) y análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés). Por una parte, el TGA permite registrar la pérdida de masa del material en función del tiempo y la temperatura, eso permite cuantificar el efecto plastificante del d-limoneno y determinar la temperatura de degradación para definir la ventana de procesamiento seguro.

Por otra parte, la DSC se utilizó para medir los flujos de calor absorbidos generados por la muestra, identificando las transiciones endotérmicas y exotérmicas del compuesto. El propósito de esta prueba fue determinar las variaciones en la temperatura de transición vítrea de las probetas. En primer lugar, para establecer una línea base de comparación, se analizó el comportamiento térmico del EPS virgen (Figura 33).

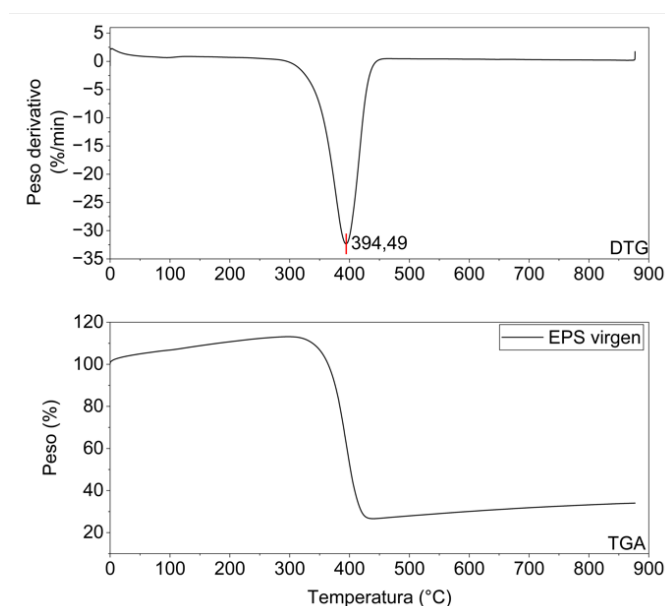


Figura 33. Curvas TGA Y DTG para EPS virgen.

Como se observa en la Figura 33, la curva TGA inferior revela la descomposición térmica del EPS virgen ocurre en un solo paso, abarcando la zona térmica de 320,0°C a 430,0°C. En esta etapa, la masa cae drásticamente desde el 100% hasta alcanzar un residuo cercado al 26%. La curva superior corresponde a la primera Derivada Termogravimétrica (DTG), indica que el pico de máxima velocidad de degradación ocurre a los 394,5°C, esto demuestra que el EPS presenta una estabilidad térmica por debajo de los 300,0°C, definiendo su límite de procesamiento. Paralelamente, el perfil de transiciones de fase para el EPS obtenido mediante DSC se presenta en la Figura 34.

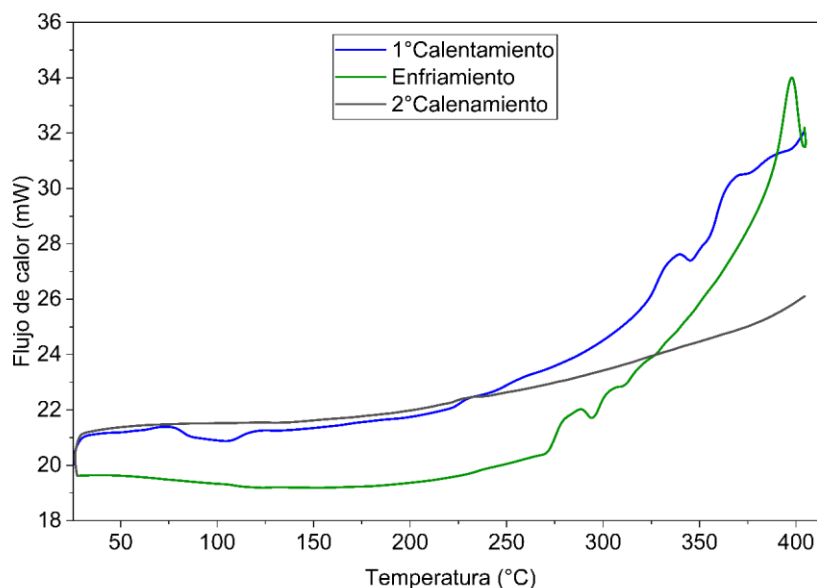


Figura 34. Curvas DSC para el EPS virgen.

En el termograma de la Figura 34, el primer calentamiento (curva azul), presenta una distorsión endotérmica entre los 90,0°C y 110,0°C. Esta variación de la capacidad calorífica corresponde a la temperatura de transición vítrea (T_g), punto en que las cadenas poliméricas adquieren movilidad. A partir de los 250,0°C, la curva comienza a subir con diversas fluctuaciones representando la volatilización de vapores remanentes, aditivos de bajo peso molecular y la desestabilización térmica del material a medida que se acerca a su temperatura de degradación.

Dado que el calentamiento sobrepasó el umbral de descomposición del EPS, la estructura molecular original colapsa, esto quiere decir, que el pico exotérmico detectado cerca de los 400,0°C en el enfriamiento (curva verde) no corresponde a una cristalización, sino a la condensación de los vapores de degradación en la cápsula y al reordenamiento térmico de los residuos.

El segundo calentamiento (curva negra), no presenta picos profundos confirmando que es un polímero 100% amorfo y que la matriz polimérica se desintegra durante el primer ciclo térmico. Por otro lado, para evaluar el efecto del tiempo de exposición UV sobre la estabilidad térmica, se realizó el mismo análisis (TGA y DSC) para las probetas del material compuesto formuladas con 1,5% de fotoiniciador e irradiadas a 60, 90 y 120 minutos. El objetivo fue corroborar térmicamente la consolidación de la red tridimensional. En primer lugar, se analizó la probeta irradiada durante 60 minutos (Figura 35).

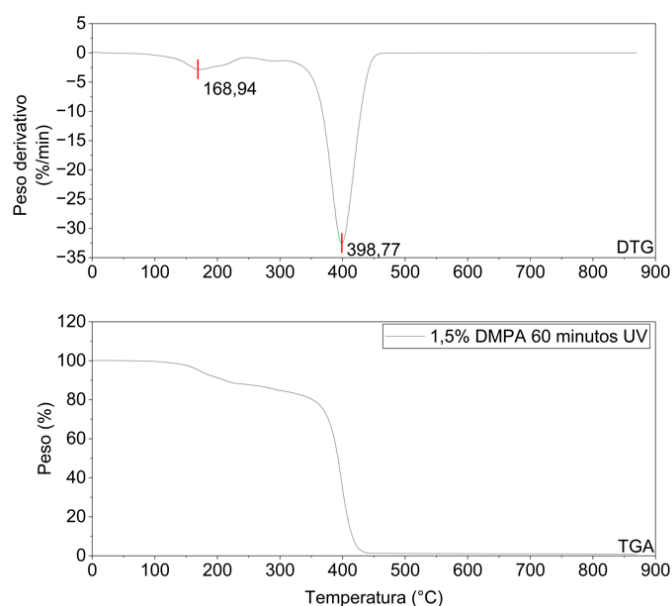


Figura 35. Curvas TGA y DTG para 1,5% DMPA y 60 minutos UV.

Al observar la Figura 35, la curva TGA (inferior) evidencia una pérdida de masa temprana en comparación con el perfil del EPS virgen, la cual se estabiliza cerca de los 200,0°C. En la curva derivada (superior) se observa un pico ancho situado entre los 160,0°C y 170,0°C, alcanzando su velocidad máxima a los 168,9°C. Este primer decaimiento representa una pérdida de entre 10% al 15% del peso inicial, esta fracción corresponder a la volatilización del d-limoneno residual que quedó confinado en la matriz, ya que el punto de ebullición de este se sitúa cercano a los 176,0°C.

Posteriormente, a partir de los 350,0°C, la masa del compuesto cae abruptamente aproximándose al 0% evidenciando la destrucción de la matriz. No obstante, se registra un pico en la curva DTG que establece la temperatura máxima de velocidad de degradación en 398,8°C. Al contrastar este valor con el del EPS virgen (394,5°C), se demuestra que la resina fotoquímica posee una mayor estabilidad térmica, lo que significa que la formación de la red tridimensional requiere de mayor energía térmica para lograr la degradación. Paralelamente, el perfil de transiciones de fase para el material fotoquímico con 1,5% DMPA y 60 minutos UV obtenido mediante DSC se presenta en la Figura 36.

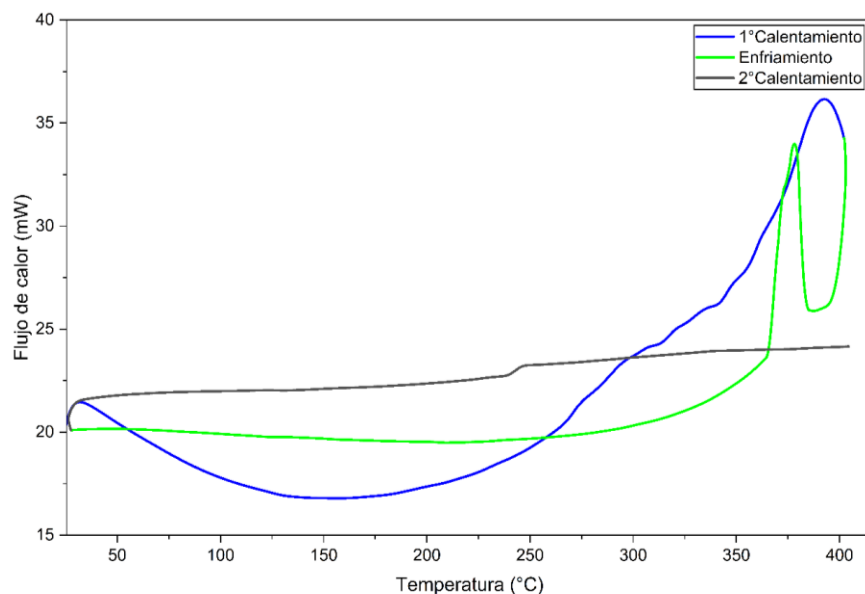


Figura 36. Termograma DSC para material con 1,5% DMPA y 60 minutos UV.

La Figura 36, en el primer calentamiento (curva azul) presenta un valle entre los 20,0°C y 250,0°C apenas comienza a calentarse la muestra, lo que confirma la evaporación del d-limoneno, ya que para romper las interacciones entre el solvente y las cadenas poliméricas se requiere de una gran cantidad de energía. Además, al llevar a los 400,0°C temperatura máxima de degradación la matriz se despolimeriza y se convierte en vapor. En segundo lugar, se analizó el comportamiento térmico de la probeta optimizada irradiada durante 90 minutos (Figura 37).

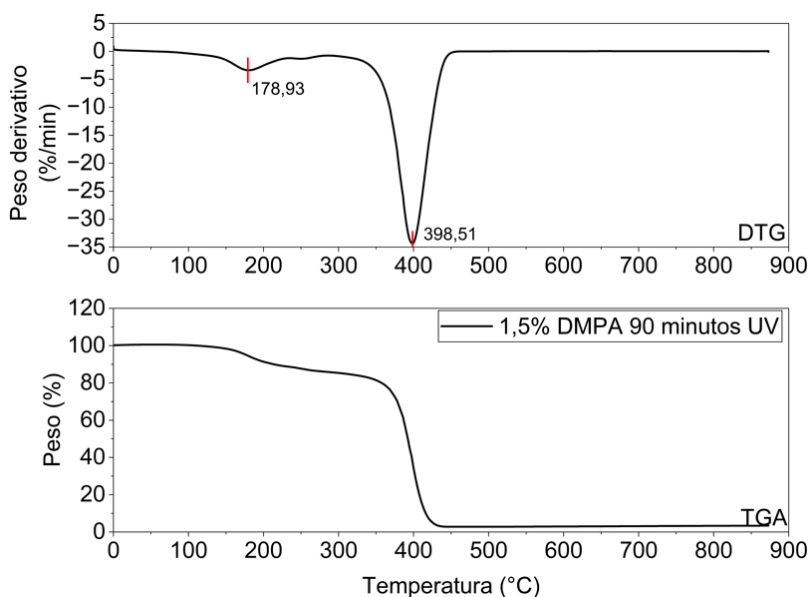


Figura 37. Curvas TGA y DTG para 1,5% DMPA y 90 minutos UV.

La Figura 37 presenta un comportamiento similar a la Figura 35, donde se observa una caída inicial suave de masa alrededor de los 160,0°C y 170,0°C, la cual alcanza una velocidad máxima de volatilización a los 178,9 °C, correspondiente a la evaporación del d-limoneno residual.

Por otro lado, en la etapa de destrucción de la matriz, el pico de máxima velocidad de degradación se registra a los 398,5 °C. Este valor, si bien sigue siendo superior a la barrera térmica del EPS virgen (394,5 °C), resulta levemente menor al de la probeta de 60 minutos (398,8 °C), lo que sugiere el inicio incipiente de un proceso de fotodegradación y ruptura de enlaces cruzados debido a la sobreexposición a la radiación UV. Paralelamente, el perfil de transiciones de fase para el material fotoquímico con 1,5% DMPA y 90 minutos UV obtenido mediante DSC se presenta en la Figura 38.

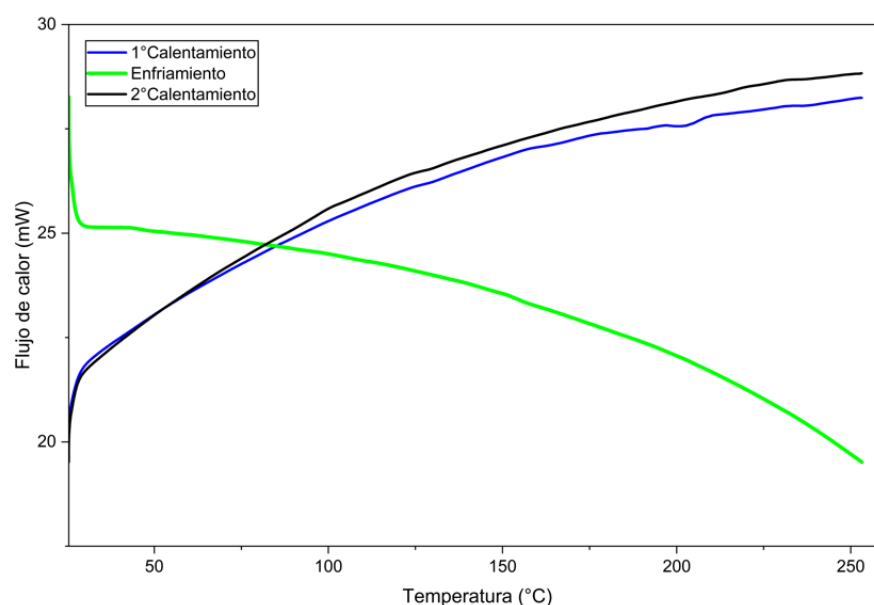


Figura 38. Termograma DSC para material con 1,5% DMPA y 90 minutos UV.

En la curva del primer calentamiento (azul) de la Figura 37, destaca la ausencia de una caída abrupta en la región de los 100,0°C, punto donde típicamente se manifiesta la temperatura de transición vítrea del poliestireno amorfo, lo que constituye una evidencia calorimétrica de que se ha logrado consolidar una red polimérica tridimensional.

Nuevamente, la curva del segundo calentamiento (negra) exhibe un perfil plano característico del residuo, dado que el material fue llevado más allá de su temperatura de descomposición térmica. Por último, se analizó la probeta optimizada irradiada durante el tiempo máximo evaluado a 120 minutos (Figura 29).

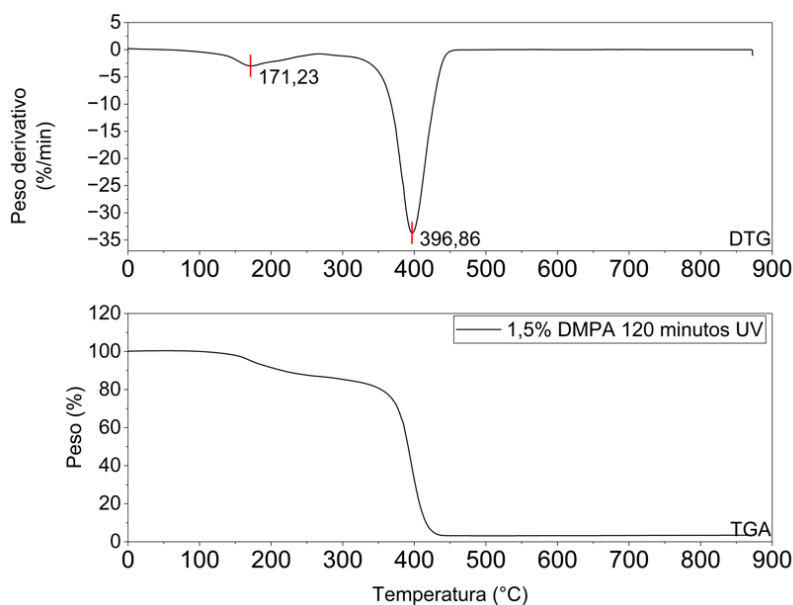


Figura 39. Curvas TGA y DTG para 1,5% DMPA y 120 minutos UV.

La Figura 39 reitera el comportamiento de la Figura 36, con la primera caída de masa alcanzando una velocidad máxima a los 171,2 °C (d-limoneno residual). Sin embargo, el pico principal de degradación de la red desciende a 396,9 °C. Esta caída térmica, inferior a los registros de 60 y 90 minutos, es congruente con la pérdida de resistencia mecánica a la tracción reportada previamente y confirma que el exceso de radiación (120 minutos) deteriora estructuralmente la matriz. Paralelamente, el perfil de transiciones de fase para el material fotoquímico con 1,5% DMPA y 120 minutos UV obtenido mediante DSC se presenta en la Figura 40.

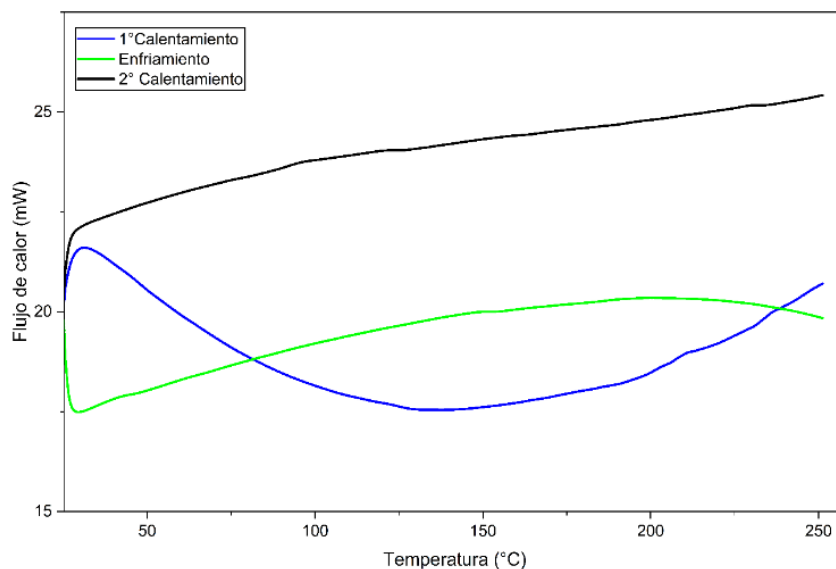


Figura 40. Termograma DSC para material con 1,5% DMPA y 120 minutos UV.

En contraste con la muestra de 90 minutos, el primer calentamiento del DSC en la Figura 39 revela la aparición de un amplio valle endotérmico extendido entre los 50,0 °C y los 150,0°C. Este fenómeno representa la considerable energía térmica necesaria para forzar la evaporación de los compuestos volátiles atrapados (d-limoneno). Para consolidar el análisis, se contrastaron los perfiles termogravimétricos de las tres probetas con 1,5% DMPA curadas durante 60, 90 y 120 minutos frente al polímero original (Figura 41).

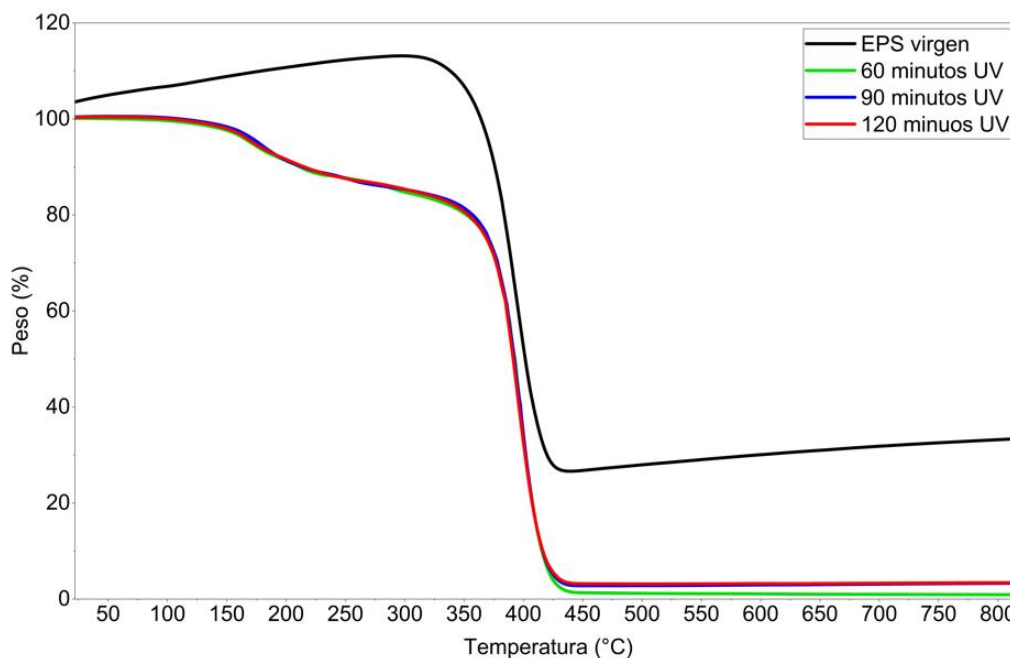


Figura 41. Curvas TGA comparativas para EPS virgen y probetas curadas (1,5% DMPA).

Al observar la Figura 41, el comportamiento de las probetas obtenidas a 60, 90 y 120 minutos es similar, por lo que el tiempo de exposición UV no altera de forma drástica la estructura térmica del material fotoquímico, pero sí evidencia una diferencia respecto al EPS comercial. El poliestireno expandido puro exhibe una única y masiva etapa de degradación térmica que ocurre cerca de los 400,0 °C, careciendo de caídas de masa intermedias debido a su naturaleza de polímero lineal puro.

Por el contrario, las tres probetas irradiadas con luz UV muestran un comportamiento térmico idéntico en su forma, caracterizado por dos etapas claramente marcadas. En la primera fase, comprendida entre los 50,0°C y 200,0°C, los nuevos materiales compuestos experimentan una pérdida de entre un 10 % y un 15 % de su masa inicial. Esta caída representa la volatilización del solvente (d-limoneno) que quedó físicamente confinado en la red tridimensional durante el curado del material.

Un aspecto destacable al correlacionar este fenómeno con la caracterización química previa es que la probeta curada por 60 minutos requiere una menor energía térmica para liberar este solvente residual en comparación con las probetas de exposición prolongada. Esto se complementa con los resultados de la espectroscopia FTIR a los 60 minutos, la conversión de los dobles enlaces del d-limoneno es óptima, consolidando una red robusta pero que conserva la flexibilidad de sus cadenas. Por el contrario, a los 90 y 120 minutos, la red sufre un grado de densificación y rigidez que restringe severamente la difusión del solvente, requiriendo mayor temperatura para forzar su evaporación.

En la segunda etapa térmica, localizada cerca de los 400,0°C, las probetas reticuladas se degradan de forma similar al EPS virgen, correspondiendo a la ruptura de la cadena principal de poliestireno. El comportamiento paralelo entre los 60, 90 y 120 minutos en esta zona crítica demuestra que la red polimérica interpenetrada ya se encuentra completamente formada desde los 60 minutos. Prolongar el tiempo bajo la radiación UV no altera favorablemente la matriz principal ni logra evaporar el solvente restante, eso quiere decir que aumentar el tiempo de irradiación UV sería un gasto energético innecesario.

Al degradarse, la masa residual correspondiente a material sólido que no se descompone en vapor ni se volatiliza es mayor en la curva de EPS virgen, dejando aproximadamente un 30%. Por lo general, el poliestireno expandido suele tener cargas inorgánicas, impurezas o aditivos pesados que no se queman ni evaporan. En cambio, los materiales fotoquímicos, terminan casi con un 0% de peso residual, eso quiere decir que el EPS se disuelve casi por completo en d-limoneno logrando que estos materiales sufran una degradación térmica completa, transformándose casi en su totalidad en compuestos volátiles sin dejar cenizas o residuo carbonoso.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

A partir de los resultados experimentales y el análisis estadístico, fisicoquímico, térmico y mecánico desarrollado en la presente investigación, se exponen las siguientes conclusiones en respuesta a los objetivos planteados.

Se logró desarrollar y caracterizar exitosamente un nuevo material compuesto a partir de residuos de poliestireno expandido (EPS) de embalaje y d-limoneno mediante una ruta fotoquímica. La incorporación de un fotoactivador UV (DMPA) demostró ser el mecanismo para disminuir el tiempo de secado de una resina que se demoraba 21 días en secarse y lograra obtener una red polimérica tridimensional sólida y reticulada en solo 10 días.

Se definió y validó una metodología secuencial para la fabricación del material. Se determinó que el proceso inicia con la disolución del fotoiniciador en el d-limoneno y posteriormente, la incorporación del EPS. Luego, al aplicar luz UV de 365 nm, se desencadena el mecanismo de fotopolimerización donde los radicales libres atacan exclusivamente las insaturaciones (dobles enlaces) del d-limoneno, interconectando las cadenas sin degradar al esqueleto aromático principal del poliestireno. La conversión de la red fue corroborada mediante análisis FTIR-ATR, evidenciando el consumo de las bandas correspondientes a los dobles enlaces carbono-carbono.

Termodinámicamente, esta metodología restringe la movilidad molecular de la resina, fenómeno confirmado por la desaparición del salto abrupto de la temperatura de transición vítrea en el DSC y la elevación de su temperatura de degradación garantizando la estabilidad del nuevo compuesto.

Mediante la evaluación estadística de las variables del proceso, se concluye que las condiciones operativas se sitúan dentro de un rango óptimo. Al evaluar experimentalmente ciertos puntos de esta región, se determinó que la formulación ideal corresponde a una concentración de 1,5 % de DMPA y un tiempo de irradiación UV de 60 minutos. Bajo estos parámetros, se logra el consumo óptimo de los monómeros reactivos aportados por el solvente, conformando una matriz rígida que a su vez conserva la flexibilidad intrínseca necesaria para evitar fallas frágiles.

A nivel mecánico, la configuración de 1,5 % de DMPA y 60 minutos de exposición UV maximiza la resistencia a la tracción del material, alcanzando un límite de 4,69 MPa. Por su parte, al ajustar el tiempo de irradiación a 90 minutos manteniendo la misma concentración, el material desarrolla una tenacidad equivalente a 7,10 MPa. Este desempeño estructural podría significar que el material puede ser implementado como una alternativa ecológica y segura en el área de la construcción, aportando una solución tangible bajo los principios de la economía circular.

Si bien el material optimizado (1,5% DMPA) irradiado con luz UV a 60 minutos y 90 minutos alcanza resistencias máximas a la tracción de 4,69 MPa y 4,41 MPa, respectivamente, superando la tensión admisible establecida por la Norma Chilena NCh1990 para la madera de grado estructural N°4 clase f7 (4,1 MPa), este resultado es favorable pero no una validación definitiva para reemplazar este material.

Debido a la naturaleza viscoelástica del polímero, su aplicación como sustituto en elementos constructivos de soporte secundario, tales como tabiquería, entramados verticales, tapajuntas y cadenas, posee un potencial prometedor, pero queda sujeto a futuras caracterizaciones mecánicas a largo plazo que evalúen su comportamiento frente a fenómenos de flexión, compresión, fatiga y fluencia.

Por otro lado, al evaluar su aplicación en el sector de embalajes, el desempeño mecánico del material desarrollado supera las exigencias actuales. Su resistencia a la tracción máxima obtenida empíricamente (4,69 MPa) sobrepasa la de la espuma de polietileno convencional con un valor de 0,22 MPa y del propio EPS de uso comercial, cuyas resistencias máximas a la tracción reportadas rondan los 0,58 MPa. Esto posiciona al nuevo compuesto como una alternativa mecánicamente superior frente a las soluciones actuales del mercado, garantizando una mayor integridad frente a la rotura y prometiendo un cierre efectivo en el ciclo de economía circular del poliestireno expandido.

8.2. RECOMENDACIONES

Con base a los hallazgos de esta investigación y con miras a la escalabilidad industrial del material desarrollado, se recomienda restringir la ventana operativa de los ensayos de exposición a radiación UV a un intervalo estricto de entre 60 y 90 minutos, ya que se demostró que tiempos inferiores no logran la conversión total de los dobles enlaces, mientras que tiempos superiores inducen fotodegradación. Adicionalmente, se sugiere reducir y evaluar la concentración del fotoiniciador (DMPA) en un rango más acotado, específicamente entre 1,1 % y 1,7 %, lo cual permitirá afinar la superficie de respuesta y optimizar los costos de la formulación sin comprometer la reticulación de la matriz.

Para futuras evaluaciones mecánicas del material, se recomienda ejecutar los ensayos de dureza superficial utilizando la escala Shore A en lugar de la escala Shore D. Debido al efecto plastificante del d-limoneno residual retenido en la matriz, el nuevo polímero presenta un comportamiento viscoelástico semirrígido que arroja valores inferiores al umbral mínimo de confiabilidad exigido por los lineamientos estrictos de la norma internacional ASTM D2240, cambiar a una escala inferior permitiría una medición válida.

Asimismo, con el propósito de determinar la viabilidad real del compuesto en el mercado, se recomienda realizar caracterizaciones mecánicas complementarias de largo plazo. Es fundamental evaluar experimentalmente el comportamiento de la matriz polimérica frente a fenómenos mecánicos dependientes del tiempo y a la aplicación de cargas sostenidas o variables, incluyendo ensayos específicos de flexión, compresión, fatiga y fluencia (*creep*), lo que permitirá modelar su estabilidad dimensional y predecir con precisión su vida útil antes de una eventual falla plástica.

Dado que el EPS y el d-limoneno son de naturaleza orgánica y el sector de la construcción exige normativas estrictas de seguridad, se recomienda investigar la incorporación de aditivos o recubrimientos retardantes de llama ecológicos que mejoren la resistencia al fuego del material sin alterar su red tridimensional. También evaluar la incorporación de refuerzos naturales para incrementar el módulo de elasticidad (rigidez) y diversificar sus aplicaciones estructurales, tales como aserrín, fibras de fique o celulosa, con el fin de desarrollar materiales compuestos híbridos de mayor resistencia mecánica.

Por último, considerando que el EPS original destaca por su baja conductividad térmica, se recomienda realizar pruebas de aislamiento térmico y acústico al nuevo polímero sólido, para explorar su viabilidad como paneles de revestimiento, baldosas o aislantes de fachadas en viviendas.

9. REFERENCIAS

- [1] Oceana Chile, «Propuesta para limitar la generación de productos desechables y regular los plásticos,» Santiago, 2019.
- [2] OECD, «Policy Scenarios for Eliminating Plastic Pollution by 2040,» OECD Publishing, París, 2024.
- [3] M. A. Lope Vichata, «Elaboración de Barniz Sostenible con Poliestireno Expandido y Dlimoneno de la Cascara Naranja,» *Revista Veritas de Difusão Científica*, vol. 5, nº 3, pp. 1225-1240, 2024.
- [4] P. N. T. Pilapitiya y A. S. Ratnayake, «The world of plastic waste: A review,» *Cleaner Materials*, vol. 11, nº 100220, 2024.
- [5] N. Karali, N. Khanna y N. Shah, «Climate Impact of Primary Plastic Production,» Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2024.
- [6] M. Mollehuara, A. Cuadrado, V. Vidal y S. Camargo, «Systematic review: Analysis of the use of Dlimonene to Reduce the Environmental Impact of Discarded Expanded Polystyrene (EPS),» Purpose-led Publishing, Huancayo, 2022.
- [7] A. Milbrandt, K. Coney, A. Badgett y G. Beckham, «Quantification and evaluation of plastic waste in the United States,» *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 183, nº 106363, 2022.
- [8] K. Hearon, L. D. Nash, J. N. Rodríguez, A. T. Lonnecker, D. J. E. Raymond, D. T. S. Wilson, P. K. L. Wooley y P. D. J. Maitland, «A High-Performance Recycling Solution for Polystyrene Achieved by the Synthesis of Renewable Poly(thioether) Networks Derived from D-Limonene,» *Adv Mater*, pp. 1552-1558, 2014.
- [9] J. Muthukumar, V. Aditya Kandukuri y R. Chidambaram, «A critical review on various treatment, conversion, and disposal approaches of commonly used polystyrene,» *Polymer Bulletin*, pp. 2819-2845, 2024.
- [10] K. Warner, C. Leavitt y E. Nuñez, «Plastic Foam Need "To Go",» 2025.

- [11] G. H. Castañeda Rojas, Y. J. Guerrero Méndez y L. N. Salcedo Díaz , «Iniciativas relacionadas con economía circular para el aprovechamiento de residuos de un solo uso (poliestireno expandido EPS),» Universitaria Agustiniiana, Bogotá, 2020.
- [12] J. Hwang, D. Choi, S. Han, . S. Jung , J. Choi y J. Hong, «Potential toxicity of polystyrene microplastic particles,» 2020.
- [13] Asipla, «RESUMEN EJECUTIVO 4° ESTUDIO SOBRE RECICLAJE Y VALORIZACIÓN DE PLÁSTICOS EN CHILE 2024,» Santiago, 2025.
- [14] FCh-PCP, «Reporte de la “Estrategia de circularidad de envases de poliestireno (PS) del alto impacto (PAI) en Chile” – Fase I,» 2024.
- [15] Biblioteca del Congreso Nacional, «REGULA LA ENTREGA DE PLÁSTICOS DE UN SOLO USO Y LAS BOTELLAS PLÁSTICAS, Y MODIFICA LOS CUERPOS LEGALES QUE INDICA,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163603>.
- [16] Biblioteca del Congreso Nacional, «Ley 20920: ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>. [Último acceso: 2026].
- [17] S. Jerez, «Advierten que envases de plumavit de la comida rápida contienen un tóxico muy peligroso para humanos,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.biobiochile.cl/especial/aqui-tierra/noticias/2025/05/11/advierten-que-envases-de-plumavit-de-la-comida-rapida-contienen-un-toxico-muy-peligroso-para-humanos.shtml>.
- [18] A. Bicer , «Investigation of waste EPS foams modified by heat treatment method as concrete aggregate,» vol. 42, 2021.
- [19] S. I. L. ALARCÓN, «RECUPERACIÓN DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) CON ACEITE ESENCIAL DE NARANJA,» Lima, 2017.
- [20] K. Hattori, S. Shikata, R. Maekawa y M. Aoyama, «Dissolution of polystyrene into p-cymene and related substances in tree leaf oils,» *Journal of Wood Science*, pp. 160-171, 2010.
- [21] A. Ricci y K. Dietliker, «Radical Photoinitiators for UV-Curing In Industrial Applications,» *The Spectrum*, vol. 19, nº 1, 2006.

- [22] M. Claudino, M. Jonsson y M. Johansson, «Thiol–ene coupling kinetics of D-limonene: a versatile ‘non-click’ free-radical reaction involving a natural terpene,» *RSC Advances*, vol. 27, nº 3, pp. 11021-11034, 2013.
- [23] L. Arthuz-López y W. Pérez-Mora, «Alternativas de bajo impacto ambiental para el reciclaje del poliestireno expandido a nivel mundial,» *Informador Técnico* 83, vol. 2, pp. 209-219, 2019.
- [24] M. Dumon, «Plastics and polymers today, some questions, a particular viewpoint,» *Waste Management Bulletin*, nº 3, 2025.
- [25] S. Tiwari y K. Si Mohammed, «Unraveling the impacts of linear economy, circular economy, green energy and green patents on environmental sustainability: Empirical evidence from OECD countries,» *Gondwana Research*, nº 135, pp. 75-88, 2024.
- [26] E. Berrio-Mesa, A. Ardila, E. Arriola-Villaseñor y S. Bedoya-Bentancur, «Gate-to-Gate Life Cycle Study and Techno-Economic Analysis of an Industrial Process for Producing Densified Polystyrene from Recycled Expanded Polystyrene,» *Polymers*, vol. 18, nº 34, 2025.
- [27] Á. Cárcamo Correa, «DESARROLLO DE UNA GUÍA Y CATÁLOGO DE APLICACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LA CONSTRUCCIÓN EN CHILE,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2022.
- [28] K. Guzmán Pico y H. Prado Restrepo, «Propuesta técnica y ambiental para el óptimo aprovechamiento del poliestireno expandido pos consumo en Colombia, a partir de las empresas localizadas en Bogotá,» Bogotá, 2019.
- [29] L. C. Narvaez Suarez y J. L. Manrique Hernández, «Formulación de una propuesta de gestión de residuos de poliestireno expandido Caso de estudio Empresa dedicada a la importación de alimentos,» Ciencia Unisalle, Bogotá, 2021.
- [30] C. Lancette, «Rigid Packaging Plastic Material Code System,» 3M, 2006.
- [31] Pacto Chileno de los Plásticos, «¿Cuáles son los distintos tipos de plástico y qué tan reciclables son?,» 2022. [En línea]. Available: <https://pactodelosplasticos.cl/consultas/cuales-son-los-distintos-tipos-de-plastico-y-que-tan-reciclables-son/>. [Último acceso: 05 2026].

- [32] M. Y. Khalid, Z. U. Arif, W. Ahmed y H. Arshad, «Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials,» *Sustainable Materials and Technologies*, nº 31, 2022.
- [33] T. Osswald y G. Menges, *Material Science of Polymers for engineers*, Munich: Hanser, 2012.
- [34] L. Sousa Leao, G. Pandolfi Spini, M. Santos de França y E. B. Carvalho Costa, «Recycled expanded polystyrene (EPS) as an eco-friendly alternative for sand in rendering mortars,» *Construction and Building Materials*, vol. 414, 2024.
- [35] V. Momoh y C. Oluwole Folorunso, «Identifying Factors Hindering the Adoption of Expanded Polystyrene for Building Construction in Akure, Nigeria,» *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 6, pp. 1-11, 2018.
- [36] J. E. Berríos Medina, «ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO,» Universidad técnica federico santa maría, Viña del Mar, 2020.
- [37] M. Gilbert, «Plastics based on styrene,» de *Brydson's plastics materials*, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 311-328.
- [38] P. T. Flores Yévenes, «ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN GENERADA POR RESIDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (PLUMAVIT) Y PROPUESTAS PARA LA GESTIÓN DE LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL SEÑALADA,» Universidad federico santa maría, Concepción, 2021.
- [39] C. Gutiérrez , J. F. Rodríguez, I. Gracia, A. de Lucas y M. T. García, «Development of a strategy for the foaming of polystyrene dissolutions in scCO₂,» *Journal of supercritical fluids*, pp. 126-134, 2013.
- [40] D. López, P. Rhenals, M. A. Tangarife, K. Vega, L. Rendón, Y. Veléz y M. Ramírez , «TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO UTILIZANDO SOLVENTES VERDES,» *Revista Investigaciones Aplicadas*, vol. 8, nº 1, pp. 1-9, 2014.
- [41] M. T. García, I. Gracia, G. Duque, A. d. Lucas y J. F. Rodríguez, «Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process,» *Waste Management* 29 , pp. 1814-1818, 2009.

- [42] V. Sessini, M. Palenzuela, J. Damián, D. Sanchez y M. Mosquera, «El limoneno: uno de los terpenos más usados y su papel en la industria de los bioplásticos,» *Revista de plásticos modernos: Cineic ay tecnología de polímeros*, 2020.
- [43] I. D. Pardo Mendoza y J. León-Pulido, «Efecto de la concentración y temperatura en la disolución de poliestireno expandido usando solventes naturales,» *vances Investigación en Ingeniería*, vol. 18, nº 2, 2021.
- [44] R. Crawford y M. Baumann, «Continuous Flow Technology Enabling Photochemistry,» *Advanced Synthesis & Catalysis*, 2025.
- [45] S. Fatima, A. Mansha, S. Asim y A. Shahzad, «Absorption spectra of coumarin and its derivatives,» *Chemical Papers*, vol. 76, nº 2, 2021.
- [46] S. I. Torri y S. I. Catán, «Las reacciones fotoquímicas en la vida diria,» *Educación en la química en línea*, vol. 24, nº 1, pp. 5-23, 2018.
- [47] N. Alessio, A. Ambrosino, A. Boggi , D. Aprile, I. Pinto, G. Galano, U. Galderisi y G. Di Bernardo, «Germicidal lamps using UV-C radiation may pose health safety issues: a biomolecular analysis of their effects on apoptosis and senescence,» *Aging*, vol. 16, nº 9, pp. 7511-7522, 2024.
- [48] J. P. Fouassier, X. Allonas y D. Burget, «Photopolymerization reactions under visible lights: principle, mechanisms and examples of applications,» *Progress in Organic Coatings*, pp. 16-36, 2003.
- [49] N. Allen, «Photoinitiators for UV and visible curing of coatings: mechanisms and properties,» *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, pp. 101-107, 1996.
- [50] «Method of Determination of Initiator Efficiency: Application to UV Polymerizations Using 2,2-Dimethoxy-2-phenylacetophenone,» *Macromolecules*, vol. 27, pp. 733-738, 1994.
- [51] R. Sastre Sastre y F. Muñoz Salinas, «Propiedades de los materiales y elementos de construcción,» Edicions UPC, Barcelona, 2019.
- [52] INN, «NCh 170 Hormigón- Requisitos generales,» 2016.
- [53] INN, «NCh169 Construcción-Ladrillos cerámicos-Clasificación y requisitos,» 2000.
- [54] INN, «NCh1990 Madera-Tensiones admisibles para madera estructural,» 1986.

- [55] E. Arrospide, I. Bikandi, G. García, G. Aldabaldetrekú y J. Zubia, «Mechanical properties of polymer-optical fibres,» de *Polymer Optical Fibres*, 2017, pp. 201-2016.
- [56] ASTM International, «Standard test method for tensile properties of plastics,» 2022.
- [57] ASTM International, «Standard test method for rubber property-durometer hardness,» 2016.
- [58] P. Wang, H. Yu, W. Jing, W. Zhang, J. Cao y C. Gao, «Research progress on the curing process and degree-of-cure monitoring techniques of UV-CIPP resin-based composites,» *Sensors and Actuators: A. Physical*, vol. 405, 2026.
- [59] H. Armando Estupiñan, D. C. Parada, D. Laverde, D. Y. Peña y C. Vásquez, «OBTENCIÓN DE ÁCIDO POLI L-LÁCTICO MEDIANTE POLICONDENSACIÓN CON CATALIZADOR DE CINCO METÁLICO,» *Scientia et Technica*, vol. XIII, nº 36, pp. 267-272, 2007.
- [60] InduAmbiente, «A Reciclar el Plumavit,» *InduAmbiente 180*, pp. 22-25, 2023.
- [61] J. B. Medina, «ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA DE RECICLAJE DE POLIESTIRENO EXPANDIDO,» Viña del Mar, 2020.
- [62] L. Asprilla Blandón y P. Córdoba Zapata, «LEUCEMIA POR EXPOSICIÓN A BENCENO EN LOS TRABAJADORES DE LAS REFINERÍAS DE PETRÓLEO,» Medellín, 2013.
- [63] Z. Pilevar, A. Bahrami, S. Beikzadeh, H. Hosseini y S. Mahdi Jafari, «Migration of styrene monomer from polystyrene packaging materials into foods: Characterization and safety evaluation,» *Trends in Food Science & Technology*, pp. 248-261, 2019.
- [64] C. Urbina Guerra, «Sensibilidad de ozono respecto de los niveles de compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno en Santiago: una aproximación numérica,» Santiago, 2024.
- [65] U. T. Igba, S. O. Ehikhuenmen, S. O. Oyeibisi y N. O. Oloyede, «An Investigation on the Use of Expanded Polystyrene as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete,» *Journal of Engineering Research*, vol. 25, nº 3, pp. 52-61, 2020.
- [66] H. Nyambara Ngugi, J. Wambua Kaluli y Z. Abiero-Gariy, «Use of Expanded Polystyrene Technology and Materials Recycling for Building Construction in Kenya,»

American Journal of Engineering and Technology Management, vol. 2, n° 5, pp. 64-71, 2017.

- [67] C. L. A. Rougier y C. Cifuentes, «PROCESO PARA FABRICAR PINTURAS A PARTIR DE DESECHOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS).». Chile Patente 201700013, 2017.
- [68] Recollect, «Recollect recycling.» [En línea]. Available: <https://www.recollect.cl/que-reciclamos/>. [Último acceso: 2025].
- [69] X. Yang, X. Fang y Z. Yang, «Application of UV LED light-curing resin in wood field - A review,» *Progress in organic coatings*, 2026.
- [70] K. Suk Jang, S. Hoon Kang y J. Young Chang, «Synthesis and Characterization of Photopolymerizable Liquid Crystalline Compounds Having Two Reactive Sites,» *Bull. Korean Chem. Soc.*, vol. 28, n° 10, 2007.
- [71] PROIMEQ, «Durometro digital tester dureza madera shore tipo D 0-100 HD,» [En línea]. Available: <https://proimeq.cl/producto/durometro-digital-tester-dureza-cauchogoma-shore-tipo-d-0-100-hd/?srsltid=AfmBOopQV3g-bg5CzapmhXZO9vKCVkiJcMymOMi7pJOVleLm1YRPfMcK>. [Último acceso: 2026].
- [72] Xerri espumas, «Ficha técnica espuma de polietileno,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.xerriespumas.com/wp-content/uploads/2021/01/FICHA-TECNICA-7114-ESPUMA-DE-POLIETILENO-RUGOSO.pdf>. [Último acceso: 2026].
- [73] ANAPE, «Propiedades físicas del poliestireno expandido,» 2004. [En línea]. Available: <https://www.serina.es/escaparate/verpagina.cgi?idpagina=2947&refc>. [Último acceso: 2026].
- [74] U. Omeiza Aroke, I. Misau, L. Hamidu y O. Osha , «A REVIEW OF POLYSTYRENE WASTE DISPOSAL FOR ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY,» 2024.

10. ANEXOS

ANEXO A. DATOS DE ENSAYOS DE TRACCIÓN

El presente anexo detalla los datos obtenidos directamente por la máquina universal de ensayos Zwick Roell durante la aplicación de la carga axial y los datos tratados. Dado que el equipo registra los parámetros en bruto, fue necesario utilizar la Ecuación 5 y 6 para transformar la fuerza y la elongación para independizar los resultados de la geometría específica de cada muestra a esfuerzo de tracción y deformación unitaria, respectivamente.

A continuación, se presentan extractos de las tablas de datos experimentales para cada formulación y material de referencia. Cabe mencionar, que debido al volumen de datos generados por el registro continuo del software de la máquina Zwick Roell, se presentan los 10 valores más cercanos al punto de resistencia máxima.

A.1. MATERIAL COMPUESTO OPTIMIZADO (1,5% DMPA, 90 MINUTOS UV)

⇒ Área transversal inicial (A_0): 12,30 mm²

⇒ Longitud inicial (L_0): 10,54 mm

Tabla 14. Datos de ensayo tracción (1,5% DMPA, 90 minutos UV).

Deformación (mm)	Fuerza estándar (N)	ϵ	Esfuerzo (MPa)
1,88	45,69	$1,53 \cdot 10^{-1}$	4,33
1,89	45,69	$1,53 \cdot 10^{-1}$	4,34
2,06	45,90	$1,67 \cdot 10^{-1}$	4,35
2,06	45,90	$1,68 \cdot 10^{-1}$	4,36
2,56	46,11	$2,08 \cdot 10^{-1}$	4,37
2,56	46,11	$2,08 \cdot 10^{-1}$	4,38
2,84	46,30	$2,31 \cdot 10^{-1}$	4,39
3,10	46,37	$2,52 \cdot 10^{-1}$	4,40
3,32	46,43	$2,70 \cdot 10^{-1}$	4,41

A.2. MATERIAL COMPUESTO OPTIMIZADO (1,1% DMPA, 90 MINUTOS UV)

⇒ Área transversal inicial (A_0): 12,30 mm²

⇒ Longitud inicial (L_0): 10,54 mm

Tabla 15. Datos de ensayo de tracción (1,1% DMPA, 90 minutos UV).

Deformación (mm)	Fuerza estándar (N)	ϵ	Esfuerzo (MPa)
3,45	31,70	$2,80 \cdot 10^{-1}$	3,01
3,60	31,88	$2,93 \cdot 10^{-1}$	3,02
3,60	31,89	$2,93 \cdot 10^{-1}$	3,03
3,87	32,09	$3,14 \cdot 10^{-1}$	3,04
3,87	32,09	$3,15 \cdot 10^{-1}$	3,05
4,30	32,30	$3,50 \cdot 10^{-1}$	3,06
4,30	32,31	$3,50 \cdot 10^{-1}$	3,07
5,45	32,51	$4,43 \cdot 10^{-1}$	3,08
5,45	32,52	$4,43 \cdot 10^{-1}$	3,09

A.3. MATERIAL DE CONTROL (SIN DMPA)

⇒ Área transversal inicial (A_0): 11,70 mm²

⇒ Longitud inicial (L_0): 12,58 mm

Tabla 16. Datos de ensayo de tracción (sin DMPA).

Deformación (mm)	Fuerza estándar (N)	ϵ	Esfuerzo (MPa)
9,64	9,31	$8,24 \cdot 10^{-1}$	0,74
9,79	9,50	$8,36 \cdot 10^{-1}$	0,75
9,79	9,50	$8,37 \cdot 10^{-1}$	0,76
10,03	9,75	$8,57 \cdot 10^{-1}$	0,77
10,03	9,75	$8,57 \cdot 10^{-1}$	0,78
10,30	10,00	$8,81 \cdot 10^{-1}$	0,79
10,31	10,00	$8,81 \cdot 10^{-1}$	0,80
10,67	10,25	$9,12 \cdot 10^{-1}$	0,81
10,67	10,25	$9,12 \cdot 10^{-1}$	0,82

A.4. MATERIAL ACRÍLICO

⇒ Área transversal inicial (A_0): 11,00 mm²

⇒ Longitud inicial (L_0): 8,99 mm

Tabla 17. Datos de ensayo de tracción (Acrílico).

Deformación (mm)	Fuerza estándar (N)	ϵ	Esfuerzo (MPa)
1,26	540,32	$1,15 \cdot 10^{-1}$	60,10
1,27	541,00	$1,15 \cdot 10^{-1}$	60,18
1,27	542,03	$1,15 \cdot 10^{-1}$	60,29
1,27	542,73	$1,15 \cdot 10^{-1}$	60,37
1,27	543,45	$1,16 \cdot 10^{-1}$	60,45
1,27	544,53	$1,16 \cdot 10^{-1}$	60,57
1,28	545,24	$1,16 \cdot 10^{-1}$	60,65
1,28	545,95	$1,16 \cdot 10^{-1}$	60,73
1,28	547,00	$1,16 \cdot 10^{-1}$	60,85

A.5. MATERIAL MDF

⇒ Área transversal inicial (A_0): 11,00 mm²

⇒ Longitud inicial (L_0): 8,99 mm

Tabla 18. Datos de ensayo de tracción (Tablero MDF).

Deformación (mm)	Fuerza estándar (N)	ϵ	Esfuerzo (MPa)
0,53	154,50	$4,85 \cdot 10^{-2}$	17,19
0,54	154,69	$4,88 \cdot 10^{-2}$	17,21
0,54	154,78	$4,89 \cdot 10^{-2}$	17,22
0,54	154,88	$4,91 \cdot 10^{-2}$	17,23
0,54	155,03	$4,93 \cdot 10^{-2}$	17,24
0,54	155,11	$4,94 \cdot 10^{-2}$	17,25
0,55	155,18	$4,96 \cdot 10^{-2}$	17,26
0,55	155,28	$4,98 \cdot 10^{-2}$	17,27
0,55	155,34	$5,00 \cdot 10^{-2}$	17,28

A.6. MATERIAL SILICONA VEGETAL

⇒ Área transversal inicial (A_0): 11,00 mm²

⇒ Longitud inicial (L_0): 8,99 mm

Tabla 19. Datos de ensayo de tracción (Silicona vegetal).

Deformación (mm)	Fuerza estándar (N)	ϵ	Esfuerzo (MPa)
43,40	20,90	3,95	2,32
43,40	20,91	3,95	2,33
43,47	21,07	3,95	2,34
43,47	21,08	3,95	2,35
43,55	21,26	3,96	2,36
43,55	21,26	3,96	2,37
43,67	21,44	3,97	2,38
43,67	21,44	3,97	2,39
43,91	21,62	3,99	2,40

ANEXO B. METODOLOGÍA CÁLCULOS MECÁNICOS

El presente anexo detalla el procedimiento computacional y matemático ejecutado en el software de análisis de datos OriginLab (versión 2026), utilizado para determinar el módulo de elasticidad (módulo de Young) y la tenacidad de los materiales evaluados a partir de las curvas experimentales de esfuerzo-deformación.

B.1. CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (MÓDULO DE YOUNG)

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez de un material en su régimen elástico, y gráficamente corresponde a la pendiente de la porción lineal inicial de la curva de esfuerzo-deformación, de acuerdo con la Ley de Hooke. Para su determinación en OriginLab, se siguió la siguiente metodología:

- ⇒ Importación y gráfico de datos: Se importaron los valores tratados de deformación unitaria al eje de las abscisas (Eje X) y de esfuerzo de tracción (en MPa) al eje de las ordenadas (Eje Y). Se generó un gráfico de dispersión con líneas conectadas.
- ⇒ Selección del rango elástico: Mediante la herramienta de selección de datos (Data Selector), se aisló exclusivamente la región lineal inicial de la curva, descartando cualquier desviación que indicara el inicio de la fluencia o deformación plástica.
- ⇒ Ajuste lineal: Se aplicó la herramienta de regresión lineal del software navegando a través de la ruta Gadgets > Quick > Linear Fit.

⇒ Extracción de parámetros: En el cuadro de diálogo de resultados, el software entregó el valor de la pendiente, el cual equivale directamente al módulo de elasticidad en MPa. Adicionalmente, se extrajo el coeficiente de determinación (R^2) para validar la calidad del ajuste, aceptándose únicamente valores de 0,95 para confirmar el comportamiento elástico lineal reportado en el estudio.

B.1.1. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG 1,5% DMPA Y 90 MINUTOS UV

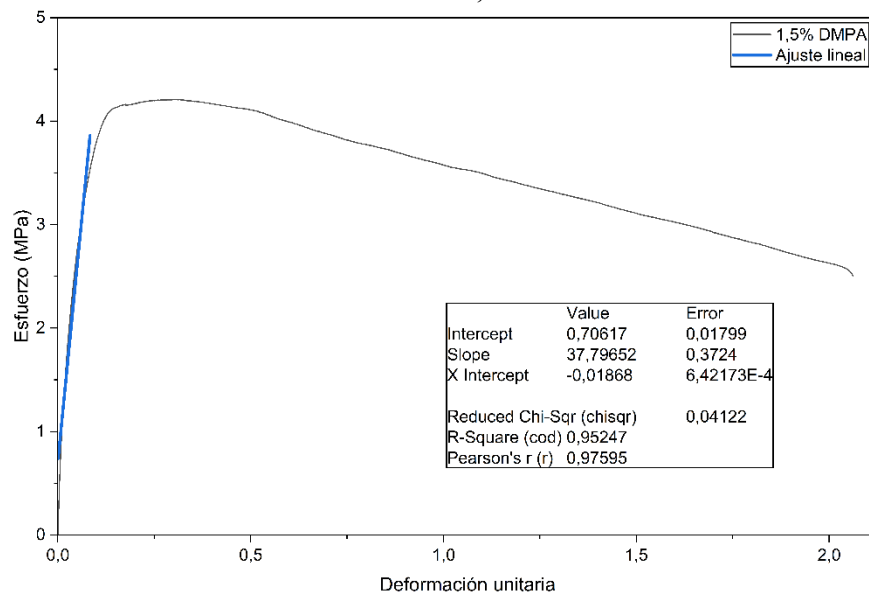


Figura 42. Ajuste lineal para determinación de modulo elástico (1,5% DMPA, 90 minutos UV).

B.1.2. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG 1,1% DMPA Y 90 MINUTOS UV

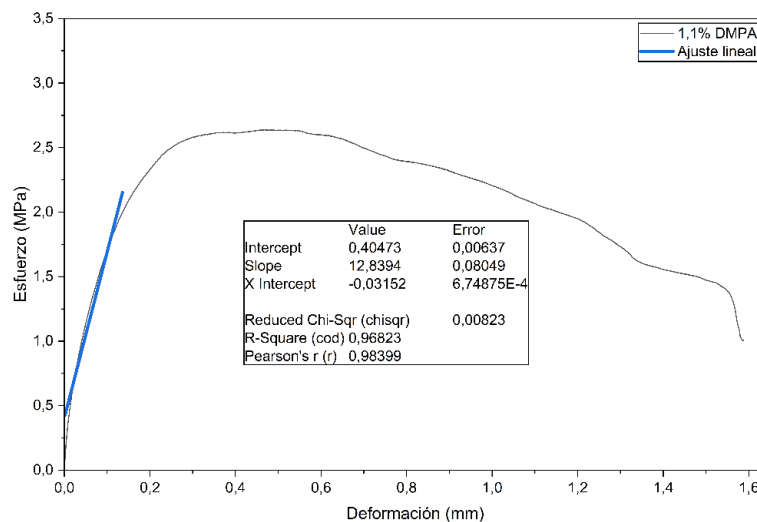


Figura 43. Ajuste lineal para determinación de modulo elástico (1,1% DMPA, 90 minutos UV).

B.1.3. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG SIN DMPA

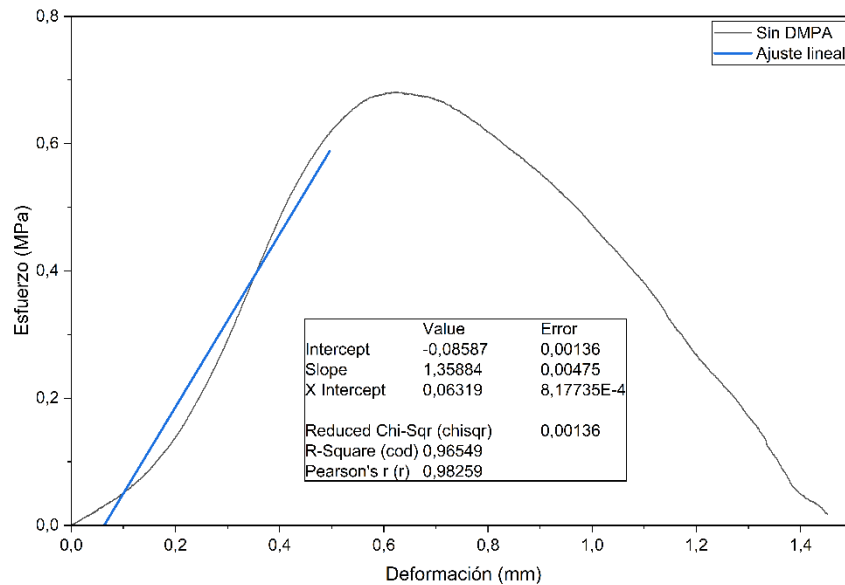


Figura 44. Ajuste lineal para determinación de modulo elástico (Sin DMPA).

B.2. CÁLCULO DE LA TENACIDAD

La tenacidad representa la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. Físicamente, esta propiedad se define como la integral del esfuerzo respecto a la deformación, desde el estado de reposo hasta el punto de ruptura, lo que geoméricamente equivale al área total bajo la curva de esfuerzo-deformación:

Dado que las variables de los ejes son esfuerzo en MPa y deformación unitaria (adimensional), el área resultante se expresa en unidades de energía por unidad de volumen (MPa). El procedimiento en OriginLab fue el siguiente:

- ⇒ Delimitación de la curva: Se utilizó la curva de esfuerzo-deformación completa de cada probeta, asegurando que el último punto de datos correspondiera exactamente al instante de la fractura macroscópica del material.
- ⇒ Integración numérica: Se utilizó la herramienta de integración matemática del software mediante la ruta Gadgets > Integrate.
- ⇒ Resultados: El software calculó el área bajo la curva (color gris) mediante el método numérico de la regla del trapecio continuo. El valor entregado de área en la ventana de resultados fue extraído y tabulado directamente como la tenacidad del material evaluado.

B.2.1. OBTENCIÓN DE LA TENACIDAD 1,5% DMPA Y 90 MINUTOS UV

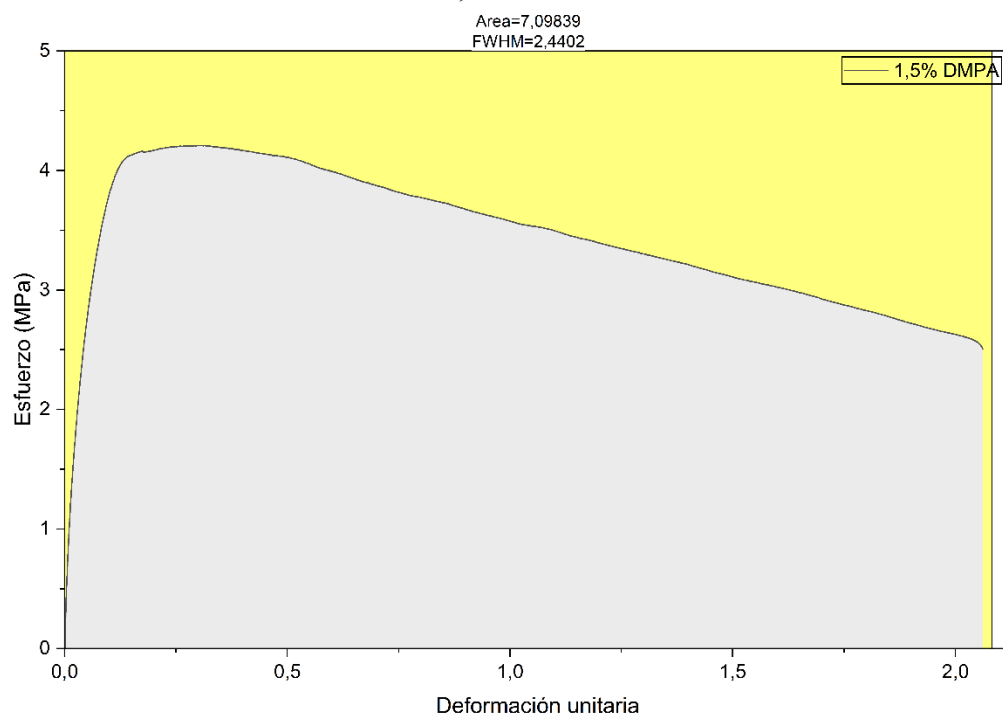


Figura 45. Integración del área bajo la curva para tenacidad (1,5% DMPA, 90 minutos UV).

B.2.2. OBTENCIÓN DE LA TENACIDAD DEL ACRÍLICO

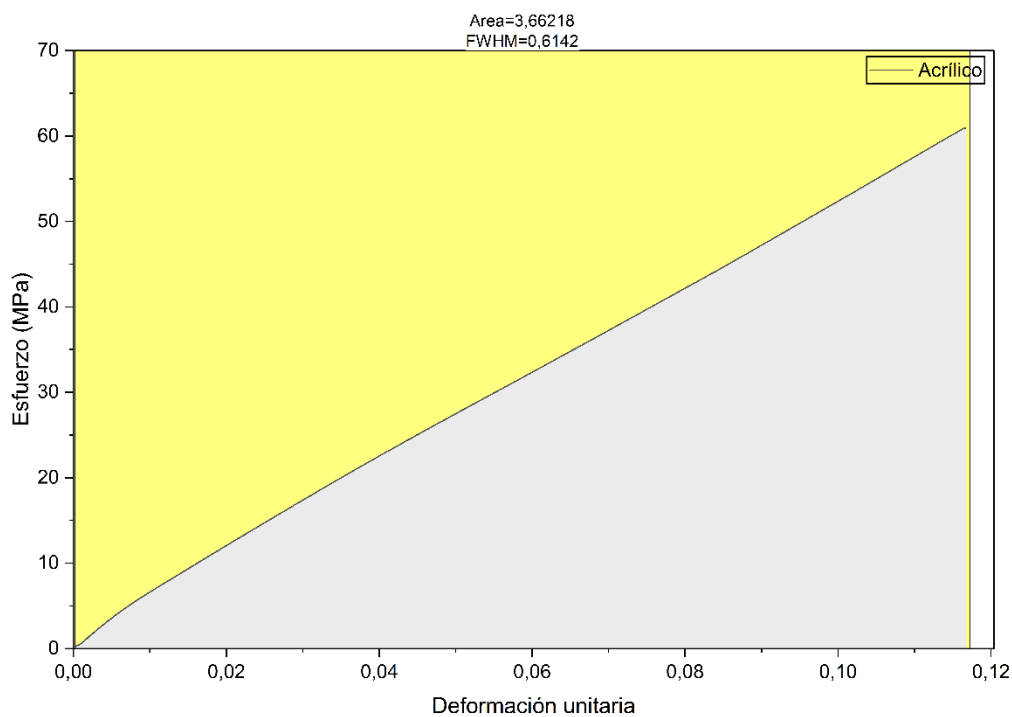


Figura 46. Integración del área bajo la curva para tenacidad (Acrílico).

B.2.3. OBTENCIÓN DE LA TENACIDAD DEL MDF

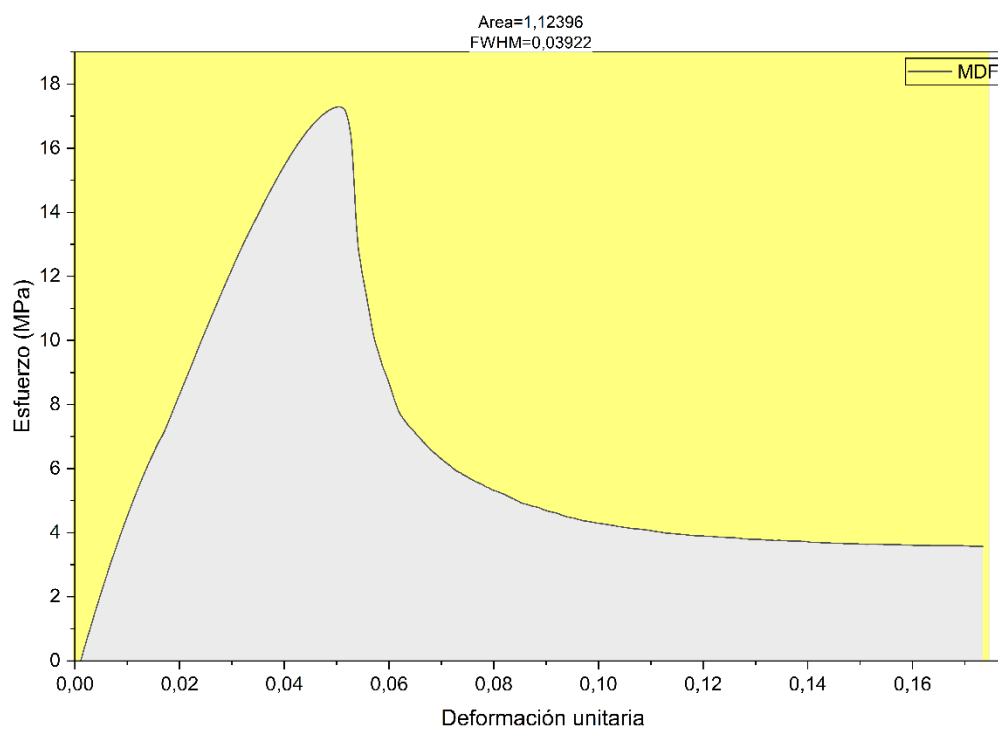


Figura 47. Integración del área bajo la curva para tenacidad (MDF).

B.2.4. OBTENCIÓN DE LA TENACIDAD DE LA SILICONA VEGETAL

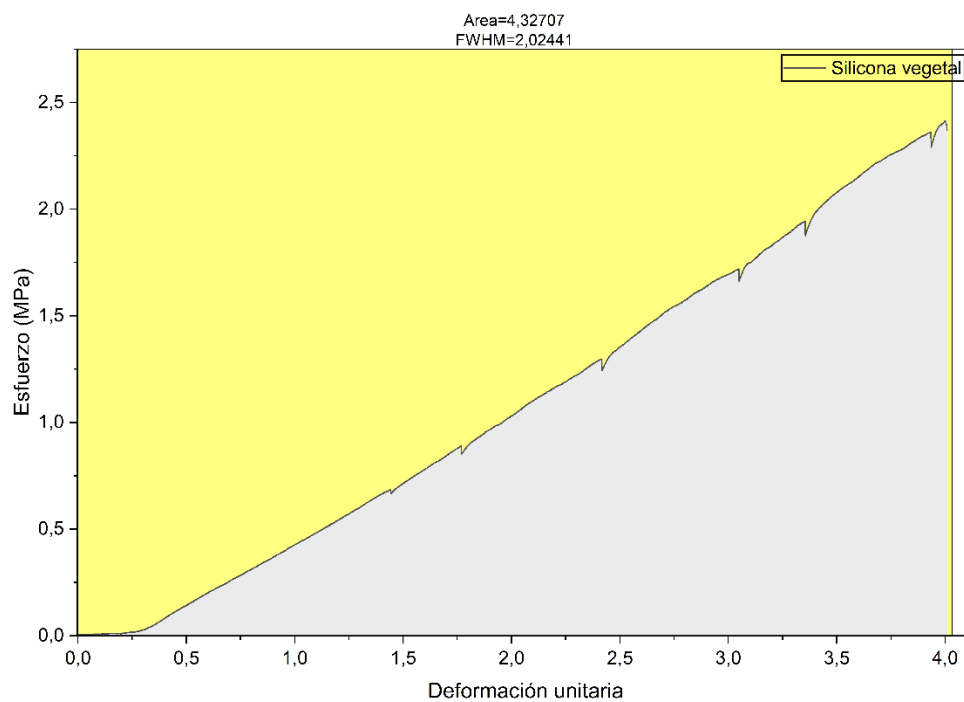


Figura 48. Integración del área bajo la curva para tenacidad (Silicona vegetal).

ANEXO C. DATOS DE DUREZA

La siguiente tabla presenta los cinco valores capturados para cada experimento del diseño de superficie de respuesta (MODDE PRO-13), junto con su respectiva media aritmética.

Tabla 20. Valores de dureza Shore D correspondiente a los experimentos.

Material	Fotoactivador %	Tiempo UV	Dureza	Dureza	Dureza	Dureza	Dureza	Promedio
1.1	1,50	60	13,0	14,0	16,0	12,5	14,5	14,0
1.2	1,50	60	14,0	13,0	11,5	12,5	13,5	12,9
1.3	1,50	60	13,0	10,5	11,5	13,5	11,5	12,0
2.1	1,50	120	11,5	12,0	11,5	12,0	14,5	12,3
2.2	1,50	120	9,5	11,5	9,5	10,5	10,5	10,3
2.3	1,50	120	11,0	10,0	7,5	13,0	11,0	10,5
3.1	5,00	60	11,0	11,0	9,5	10,0	10,5	10,4
3.2	5,00	60	10,0	10,5	8,5	9,0	10,5	9,7
3.3	5,00	60	10,5	9,0	8,5	8,5	11,0	9,5
4.1	5,00	120	10,5	10,5	9,5	10,5	10,0	10,2
4.2	5,00	120	10,0	9,0	7,5	10,5	9,0	9,2
4.3	5,00	120	10,5	9,0	7,5	12,0	9,5	9,7
5.1	3,25	48	9,0	8,0	6,5	10,0	10,5	8,8
5.2	3,25	48	9,5	8,0	7,5	10,5	8,5	8,8
5.3	3,25	48	9,5	9,5	5,5	9,0	10,0	8,7
6.1	3,25	132	10,0	8,0	7,0	9,5	8,5	8,6
6.2	3,25	132	9,5	9,5	9,0	9,0	11,0	9,6
6.3	3,25	132	10,5	8,0	8,0	8,0	9,5	8,8
7.1	0,78	90	9,0	7,0	7,0	7,0	10,5	8,1
7.2	0,78	90	6,5	9,0	7,0	9,5	6,5	7,7
7.3	0,78	90	6,0	8,5	6,5	8,5	9,0	7,7
8.1	5,72	90	9,0	7,0	6,0	8,5	7,0	7,5
8.2	5,72	90	9,5	8,5	5,5	8,5	10,5	8,5
8.3	5,72	90	8,0	5,0	5,5	5,5	6,5	6,1
9.1	3,25	90	8,0	7,5	6,5	8,5	9,0	7,9
9.2	3,25	90	10,0	8,5	6,5	8,5	9,5	8,6
9.3	3,25	90	11,0	11,0	7,5	9,5	8,0	9,4
10.1	3,25	90	10,0	9,0	10,5	10,5	9,0	9,8
10.2	3,25	90	9,0	8,5	7,5	8,5	9,5	8,6
10.3	3,25	90	9,5	8,8	9,0	9,5	9,3	9,2
11.1	3,25	90	10,0	5,5	8,5	9,5	9,5	8,6
11.2	3,25	90	9,0	8,5	6,5	9,5	8,5	8,4
11.3	3,25	90	8,5	8,5	8,5	10,0	9,5	9,0

