

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



**“Estudio, tratamiento y revalorización de matrices
poliméricas generados por la industria agrícola de
tomates en la V región mediante métodos verdes”**

Yocelyn Magdalena Urquiola Morales

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

Profesor Guía: Dr. Henrik Hansen
Profesor Correferente: Dr. Claudio Gallardo

Septiembre 2019

Agradecimientos

A mi familia, por entregarme el apoyo desde el momento que puse en mi mente estudiar en esta universidad y pese a todo han comprendido el camino cursado.

A mis amigos y conocidos que me ha entregado esta universidad, los cuales han sido parte de mi formación en cortos y largos transcurso en estos años. Para los que espero tener a lo largo de mi vida, para los que me han apoyado en esta última etapa.

A mi profesor guía Henrik Hansen, por su confianza y apoyo en todos los años que ha sido jefe de carrera como también en la memoria actual, mostrándome su gran calidad humana.

A mi profesor correferente Claudio Gallardo, por su guía y consejo en este largo trayecto de la memoria.

Al proyecto conformado por la Asociación Weltun Mapu y Novalquimia que me han entregado la experiencia y la confianza de llevar a cabo la realización de esta memoria, que contiene un tema de gran importancia a nivel mundial que es la gestión de residuos plásticos.

Y finalmente a esta bella universidad, por acogerme y darme las herramientas profesionales de ser una sansana. Agradecida de todas las experiencias brindadas tanto en el aula con compañeros y profesores como también en lo extracurricular con los amigos.

Resumen Ejecutivo

Hace aproximadamente 150 años se creó un material formado por diversas (poli) unidades repetitivas, según el largo de cadena (monómeros) y la estructura ramificada o lineal se conforma al llamado “poli”-mero sintético, el cual proveyó de grandes soluciones a la población mundial en temas de:

- Higiene alimentaria.
- Envoltura/empaques.
- Mejoras sustanciales en vestimenta.
- Materiales de aislación (térmica, eléctrica, humedad, corrosión).
- Creación de nuevos productos, la ingente cantidad de aplicaciones y extensos e intensos usos de la vida cotidiana.

Lo anterior, debido a sus interesantes y nuevas características mejoradas tales como: peso, resistencia, economía, versatilidad; es que, los polímeros sintéticos llamados comúnmente “plásticos” han ganado terreno desde entonces hasta la actualidad convirtiéndose en los materiales más utilizados a nivel planeta. Lo anterior, en conjunto con la gran producción mundial y su uso desechable de forma indiscriminada han ocasionado que se presente una excesiva acumulación de residuos plásticos en el mundo que han generado en los océanos parches de polímeros sintéticos flotando, siendo el más grande de una superficie de $1.600.000 \text{ [km}^2\text{]}^1$, sumado a una paupérrima gestión de sus residuos y una baja responsabilidad social en los procesos de disposición final, han tenido como consecuencia irreversible que se dispongan año a año alrededor de $8.000.000 \text{ [ton]}$ en los océanos². Afectado tanto a la hidrosfera marina como a los seres vivos que habitan en ella; los polímeros sintéticos comienzan a triturarse y fragmentarse convirtiéndose en microplásticos suspendidos en el agua los cuales muchas veces son confundidos por especies marinas de toda índole como aves, peces, ballenas, entre otros que los ingieren y quedan posteriormente alojados en su sistema provocando una problemática aún sin conocimiento de la cadena trófica generada hacia los seres humanos, como también es el atascamiento y ahogamiento de las especies en los plásticos de mayor envergadura.

En otro escenario del orbe, actualmente en Chile, las regiones centrales se destacan por el rubro de la agroindustria siendo la producción del tomate uno de estos procesos, enfocándose en productos con denominación de origen, un tipo de tomate que se cultiva es el llamado “limachino”. Esta producción se sitúa en la biosfera de la Campana en la región de Valparaíso; realizándose en un entorno delimitado por 140 naves de invernadero y bajo determinadas especificaciones para su correcto crecimiento y producción controlada en condiciones óptimas durante todo el año. Los invernaderos tanto en su estructura exterior, soportes, así como en el interior, ya sea en la contención de las plantas de tomate por ejemplo, contienen diferentes tipos de matrices poliméricas dentro de los cuales se destacan polipropileno, poliestireno y polietileno. Estos plásticos son altamente requeridos y utilizados en esta agroindustria por un periodo de tiempo definido, cada uno de ellos, posteriormente son convertidos en residuos lo cual genera que su ciclo de vida termine de la mejor opción en un relleno sanitario; es aquí el mayor problema que ocurre a los productores de tomates y al medio ambiente en general, debido a que una mala gestión como la no aceptación de estos en los rellenos sanitarios provoca que este residuo termine en el ecosistema aldaño a la producción, siendo esto de gran impacto ambiental.

Por lo anterior, este problema es uno de los principales fundamentos de la memoria presente; revalorizar estos residuos, otorgándoles un ciclo de vida de manera circular utilizando alternativas de reciclaje de larga data. A través de la búsqueda de diferentes alternativas como lo es el introducirlos en un producto que genere un ciclo de vida mayor o realizar otro producto de gran necesidad y uso intensivo en la industria, entre otros. Destacando que una de las características principales de estos polímeros es su alto % de reciclaje y diversos usos; y que conjunto con ello al aplicar los aditivos adecuados y por medio de las reacciones y procesos se puedan crear nuevos productos con las mismas características o con otras más específicas. Todo lo anterior, con el fin de aportar al proceso productivo en la economía circular, generando una alternativa sustentable para esta industria y entregando una alternativa de ejemplo para que estos residuos no terminen en: rellenos sanitarios, medio ambiente, ni océanos; si no en una revalorización con beneficios económicos para los clientes y empresas que se destaquen por introducir el reciclaje, la valorización y la economía circular en sus procesos productivos de bienes y servicios.

Glosario

- ASIPLA: Asociación Gremial de Industriales de Plástico en Chile.
- DICTUC: Laboratorio de Obras Civiles de la Pontífice Universidad Católica.
- EVA: Sigla de etilvinilacetato, polímero termoplástico.
- HH: Forma de enunciar las Horas Hombre de trabajo.
- LEMCO: Laboratorio de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María.
- PE: Polietileno.

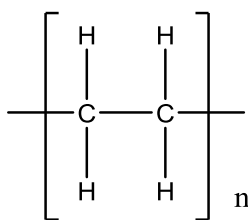


Figura 1. Estructura química Polietileno.

- PEAD: Polietileno de Alta Densidad.
- PEBD: Polietileno de Baja Densidad.
- Pelet o Pellet: Pequeña porción de material aglomerado en forma cilíndrica y de pocos milímetros de diámetro; utilizado de materia prima para la creación de productos. Haciendo referencia a pelet de polímeros sintéticos.
- PET: Polietileno de Tereftalato.

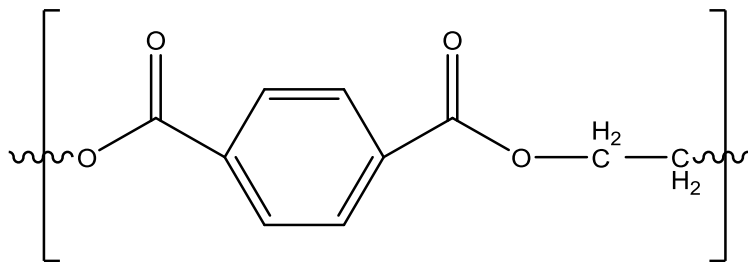


Figura 2. Estructura química Polietileno de Tereftalato.

- PMMA: Polímero termoplástico llamado polimetilmetacrilato.
- PP: Polipropileno.

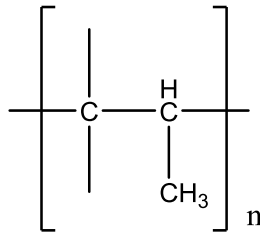


Figura 3. Estructura química Polipropileno.

- PS: Poliestireno.

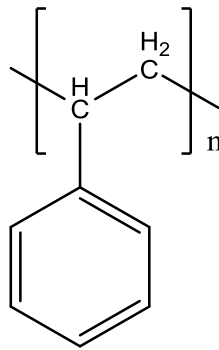


Figura 4. Estructura química Poliestireno.

- PVAC: o de siglas PVA, es el termoplástico llamado acetato de polivinilo.
- PVC: Policloruro de Vinilo.

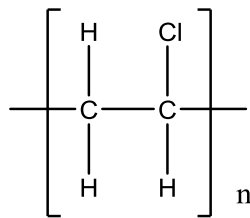


Figura 5. Estructura química Policloruro de Vinilo.

- REPOLGON: Nombre utilizado para llamar a la mezcla generada al reciclar polímeros sintéticos con hormigón en el proyecto Plastitomate.
- WPC: Sigla en inglés “Wood Polymer Composites” referida a la madera producida a través de la aleación de polímeros sintéticos con “harina” de madera.

Índice

Agradecimientos	2
Resumen Ejecutivo	3
Glosario	5
Índice	7
Índice de Figuras	10
Índice de Tablas	12
Introducción.....	13
Objetivo general	15
Objetivos específicos.....	16
Capítulo I . Estado del arte de los plásticos.....	17
1.1 Polímeros Sintéticos	17
1.1.1 Clasificación.....	17
1.1.2 Polímeros de adición	21
1.1.3 Ramificación en la polimerización.....	22
1.1.4 Polimerización aniónica y catiónica.....	24
1.2 Polímeros Sintéticos más utilizados.....	24
1.2.1 Polietileno.....	24
1.2.1.1 Tipos de polietileno.....	25
1.2.1.2 Aplicaciones.....	26
1.2.2 Poliestireno.....	27
1.2.2.1 Tipos de poliestireno	27
1.2.2.2 Aplicaciones.....	28
1.2.3 Polipropileno	28
1.2.3.1 Tipos de polipropileno	29
1.2.3.2 Aplicaciones.....	29
1.3 Métodos de reciclaje	30
1.3.1 Reciclaje Mecánico	30

1.3.2 Reciclado Químico	33
1.3.2.1 Polímeros de adición	34
1.3.2.2 Polímeros de Condensación	34
1.3.3 Degradación de plásticos.....	35
1.3.4 Análisis de Ciclo de Vida.....	36
1.4 Problemática Ambiental.....	37
1.4.1 Polímeros a nivel mundial.....	37
1.4.1.1 Áreas de utilización.....	37
1.4.1.2 Producción y demanda mundial	39
1.4.1.3 Reciclaje mundial.....	41
1.4.1.4 Disposición de los polímeros sintéticos	42
1.4.1.5 Impacto oceánico	44
1.4.1.6 Nueva visión para los polímeros	47
1.4.1.7 Pilares de la Organización de las Naciones Unidas	48
1.4.2 Polímeros sintéticos a nivel país	49
Capítulo II. Antecedentes Generales	51
2.1 Identificación del problema	51
2.1.1 Producción de tomates en Limache.....	51
2.1.2 Utilización de polímeros en la agricultura	52
2.1.3 Cantidades utilizadas de polímeros sintéticos	53
2.2 Proyecto Plastitomate	54
2.2.1 Objetivo del proyecto	55
2.2.2. Objetivos específicos del proyecto.....	57
2.2.3 Justificación e importancia del proyecto	58
2.2.4 Alcances del proyecto	58
Capítulo III. Materiales y Métodos.....	60
3.1 Análisis de Solubilidad	60
3.2 Estudio de Soluciones	63
3.1.1 Madera Plástica	64

3.1.2 Envases reciclados para protección y transporte de fruta.....	65
3.1.3 Hormigón ligero para aceras, veredas y fachadas	66
3.1.4 Solución a seguir	67
3.3 Hormigón con Polímeros.....	69
3.3.1 Plan de ejecución.....	69
3.3.2 Materia Prima.....	69
3.3.3 Preparación de la muestra y Equipos utilizados.....	71
3.3.4 Metodología: Ensayos Civiles.....	72
3.3.4.1 Ensayo de Reología.....	72
3.3.4.2 Ensayo de Densidad Aparente.....	73
3.3.4.3 Ensayo Densidad Aparente y Relativa e Índice de porosidad.....	74
3.3.4.4 Ensayo de Conductividad Térmica	75
3.3.4.5 Ensayo de Modulo de Elasticidad	76
3.3.4.6 Ensayo de Flexo-tracción.....	78
3.3.4.7 Ensayo de Compresión.....	80
Capítulo IV. Resultados y discusión	82
4.1 Resultados de Reología.....	82
4.2 Resultados Densidad Aparente	82
4.3 Resultados Densidad aparente y relativa e Índice de porosidad	83
4.4 Resultados Conductividad Térmica	85
4.5 Resultados Modulo de Elasticidad.....	87
4.6 Resultados Ensayo de Flexo-tracción	89
4.7 Resultados Ensayo de Compresión.....	90
Conclusiones.....	92
Bibliografía.....	94
Anexos	97

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura química Polietileno.	5
Figura 2. Estructura química Polietileno de Tereftalato.	5
Figura 3. Estructura química Polipropileno.	6
Figura 4. Estructura química Poliestireno.	6
Figura 5. Estructura química Policloruro de Vinilo.	6
Figura 6. Esquematización de copolímero de bloque.	18
Figura 7. Esquematización de copolímero de injerto.	18
Figura 8. Esquematización de copolímero al azar.	18
Figura 9. Crecimiento de polímeros por cadena.	18
Figura 10. Crecimiento de polímeros por cadena múltiple.	19
Figura 11. Estructura Lineal.	19
Figura 12. Estructura Ramificada.	19
Figura 13. Estructura Entrecruzada.	20
Figura 14. Ejemplo de mecanismo de sustracción intramolecular	23
Figura 15. Ejemplo de mecanismo de sustracción intermolecular	24
Figura 16. Estructura química del polietileno.	25
Figura 17. Estructura química del poliestireno.	27
Figura 18. Estructura química del polipropileno.	29
Figura 19. Tipos de reciclaje de plásticos.	30
Figura 20. Esquema reciclado químico.	33
Figura 21. Gráfico de las áreas en porcentajes que utilizan plásticos.	39
Figura 22. Porcentajes Productores de Polímeros Sintéticos	40
Figura 23. Producción mundial de polímeros (en millones de toneladas métricas)	40
Figura 24. Producción global de plásticos.	41
Figura 25. Pronóstico del crecimiento del plástico y el consumo realizado.	42
Figura 26. Gráficos de composición en mares	43
Figura 27. Islas de plásticos en el planeta	44
Figura 28. Recreación del futuro hábitat marino.	45
Figura 29. Efectos de los plásticos en la salud	46
Figura 30. Ambiciones de la nueva economía de los plásticos	47

Figura 31. Objetivos de desarrollo sostenible.	48
Figura 32. Tres estrategias para transformar el mercado de envases plásticos	50
Figura 33. Fotografías de producción de tomate en Limache	52
Figura 34. Esquema general lineal.	55
Figura 35. Esquema lineal Polietileno.	56
Figura 36. Esquema lineal Polipropileno.	56
Figura 37. Esquema lineal Policloruro de vinilo.	56
Figura 38. Esquema lineal Poliestireno.	56
Figura 39. Esquema Convergente para la producción Limachina.....	57
Figura 40. Prueba quintuplicada de ensayos de solubilidad.....	61
Figura 41. Diagrama convergente de soluciones.....	63
Figura 42. Polímero reciclado de PVC.....	70
Figura 43. Polímero reciclado de carbono.....	70
Figura 44. Bloques listos	72
Figura 45. Mortero en la mesa de sacudidas	73
Figura 46. Probeta en la mesa en la mesa de sacudidas	74
Figura 47. Equipo para el ensayo de densidad aparente y relativa e índice de porosidad....	75
Figura 48. Equipo para la medición de conductividad térmica	76
Figura 49. Equipo para el ensayo MOE	77
Figura 50. Ensayo de ultrasonido para conocer el módulo de elasticidad.....	78
Figura 51. Ensayo de Flexo tracción	79
Figura 52. Probeta para ensayo.....	79
Figura 53. Probeta en la puesta de ensaye	81
Figura 54. Probeta tras su fractura.....	81
Figura 55. Gráfico densidad aparente (kg/m^3) mezclas de mortero fresco	83
Figura 56. Gráfico densidad aparente y relativa.....	84
Figura 57. Gráfico índice de porosidad (%)	85
Figura 58. Gráfico conductividad térmica (λ) ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)	86
Figura 59. Gráfico calor específico (c_p) ($\text{J/m}^3\cdot\text{K}$).....	87
Figura 60. Gráfico de difusividad térmica (α) (m^2/s)	87
Figura 61. Gráfico módulos de elasticidad a flexión y longitudinales de cada mezcla.....	88

Figura 62. Gráfico módulo de elasticidad longitudinal de cada mezcla (MPa)	89
Figura 63. Gráfico módulo de elasticidad de flexión de cada mezcla (MPa).....	89
Figura 64. Gráfico tensiones de rotura para la resistencia a flexo-tracción [N/mm ²]	90
Figura 65. Gráfico tensiones de rotura para la resistencia a compresión [N/mm ²]......	91

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de las características de los diferentes tipos de polietileno	26
Tabla 2. Densidades de los polímeros	32
Tabla 3. Medidas de la nave y camas del cultivo Limachino.....	53
Tabla 4. Durabilidad de los polímeros	54
Tabla 5. Cantidad de polímeros utilizados y residuos generados.....	54
Tabla 6. Objetivos planteados para el proyecto.....	58
Tabla 7. Comparación y clasificación de solubilidades	62
Tabla 8. Inversión necesaria para reparar y mantener aceras, veredas y calles en Chile (MMUS\$)	67
Tabla 9. Resultados del valor de escurrimiento de mezcla.....	82
Tabla 10. Resultados de densidad aparente (kg/m ³) de mezcla.....	82
Tabla 11. Resultados de ensayo de Densidad relativa, aparente e índice de porosidad.	84
Tabla 12. Resultados de ensayo de propiedades térmicas	86
Tabla 13. Resultados del ensayo de Módulo de Elasticidad (MOE)	88
Tabla 14. Resultados de ensayo de resistencia a flexo-tracción ([N/mm ²] [kgf/cm ²]).....	90
Tabla 15. Resultados de ensayo de resistencias a compresión ([N/mm ²] [kgf/cm ²]).....	91

Introducción

Todas las actividades del desarrollo humano inherentemente generan residuos; el crecimiento de la población y su elevada concentración en grandes centros urbanos sumados al mejoramiento de la calidad de vida, ha generado el aumento en el consumo de materias primas por parte de sus habitantes, esto ha tenido como consecuencia una gran necesidad de envases, embalaje y útiles de uso diario. Este fenómeno ha triplicado los residuos generados por la población, las industrias y el agro; los rellenos sanitarios han intentado ser la respuesta y solución para la disposición de estos residuos, pero estos residuos algunas veces tardan mucho tiempo en degradarse por lo que requieren métodos y tratamientos particulares, considerando el último eslabón de la cadena un reciclaje formal.

Uno de estos residuos de difícil degradación, fue sintetizado a finales del siglo XIX, pero no fue hasta el siglo XX que comenzó a producirse a base de petróleo desde entonces hasta el día de hoy se debe lidiar con 8.300.000.000 [ton]³ de ese material, de las cuales más de 6.300.000.000 [ton] se han convertido en residuos⁴. Pero de este total de residuos no se ha realizado una debida gestión lo que ha provocado que por su mala disposición los residuos vayan a parar en el medio ambiente; primero en la tierra o en los ríos y después por efecto del aire o agua se desplacen hacia el mar generando una gran contaminación marina lo que hoy en día se llaman islas de plásticos. Es en el mar donde los polímeros comienzan a degradarse en micro y/o nano partículas; aquí son confundidas como alimento por la fauna oceánica e impiden el viaje migratorio de varias especies marinas, formado verdaderas redes transoceánicas, obstaculizando así el ciclo de vida marino y colateralmente el ciclo de vida terrestre.

Por todo lo mencionado anteriormente a nivel país y nivel planeta, es donde recae la preocupación y conciencia por la responsabilidad de los desechos generados, enfocando la siguiente memoria en los desechos agroindustriales de la producción de tomates limachinos.

Para esta agroindustria alimenticia, los polímeros prestan una amplia gama de utilidades en la producción y cosecha de los tomates: ya sean en la construcción del invernadero (techos y paredes), en el cubrimiento de la tierra (camas para las plantas) y en la guía de

crecimiento (planta de tomate crece 2 [m] en vertical como enredadera); pero tras el intenso y estructural uso, los polímeros deben ser cambiado cada ciertos periodos de tiempo, generando gran cantidad de residuos; para los cuales, en la memoria presente, se buscará una óptima gestión involucrando la generación de nuevos productos y así alargar la data del uso de los polímeros y que vuelvan a su ciclo de vida a través del reciclaje, revalorización y economía circular.

Objetivo general

Estudio, valorización y análisis físico-químico para el reciclaje de residuos de polietileno, polipropileno, poliestireno y otros polímeros relacionados en la agroindustria limachina contenidos en malla raschell, mangueras, bolsas, empaques, guías sostenedoras, amarras, entre otros; usados en los diversos procesos de producción, pre y post-cosecha. Para abordar pre-factibilidad técnico/comercial en la utilización de ellos en un nuevo producto de larga data/uso en el reciclaje circular de la industria del plástico.

Objetivos específicos

- Identificar propiedades de comportamiento físico-químico de diferentes polímeros para establecer método óptimo de reciclado.
- Estudio y factibilidad técnica de reducción física (extrusión y granulado) para fácil manejo y almacenaje; disminución volumétrica (química), reutilización de plásticos desechados y no reciclados por la agricultura regional y nacional.
- Diseñar y configurar sistemas y métodos de reciclaje mejorando la eficiencia del proceso actual usado en el país.
- Valorar los polímeros recuperados e identificar sus posibles mejoras y aplicaciones en áreas prioritarias país (energía, salud, construcción, educación).
- Estudiar e identificar mezclas de polímeros reciclados disueltos químicamente para uso y aplicaciones en composites para la construcción.
- Proponer alternativas de mejora y ahorro transversal e integral en los procesos productivos agroindustriales del tomate limachino. Con el consecuente beneficio en proceso circular del plástico, alineado con la nueva legislación chilena y tendencias intencionales (ONU, Agenda 2030: 17 Objetivos de desarrollo sostenible), revalorización y re-circulación de materias primas en las diversas faenas agro-industriales.

Capítulo I . Estado del arte de los plásticos

Los polímeros llamados comúnmente plásticos son sustancias conformadas por macromoléculas, moléculas que contienen una cantidad muy grande de átomos con un alto peso molecular, formadas por la unión a través de enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros.

Los polímeros se dividen en dos grandes grupos que son los polímeros naturales como lo es el ADN y polímeros sintéticos como el polipropileno.

1.1 Polímeros Sintéticos

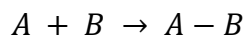
Los polímeros sintéticos se obtienen mediante la polimerización de compuestos orgánicos derivados de los hidrocarburos dándoles una estructura rígida, debido a los enlaces, redes ordenadas o entrecruzadas en diverso grado, teniendo menor flexibilidad y mayor resistencia⁵.

1.1.1 Clasificación

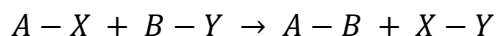
Los polímeros se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Tipo de reacción:

Polímeros de adicción: Si conservan todos los átomos de los reactivos son llamados homopolímeros, si son diferentes se llaman copolímeros. Reacciones del tipo:



Polímeros de condensación: Por medio de un enlace covalente entre monómeros provocando la pérdida de alguna molécula pequeña. Reacciones del tipo:



- Unión:

Los copolímeros de acuerdo a la secuencia de orden de los monómeros que se van uniendo en la cadena principal se clasifican como copolímero de bloque, de injerto y al azar.

Copolímero de bloque: La cadena consta de secuencias relativamente largas (bloques) de cada unidad repetitiva químicamente unidas como se puede observar en la figura 6.

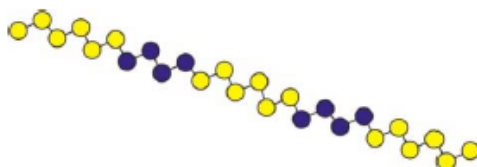


Figura 6. Esquematización de copolímero de bloque.

Copolímero de injerto o graft: Las secuencias de un monómero se injertan en la columna vertebral de otro tipo de monómero como se aprecia en la figura 7.

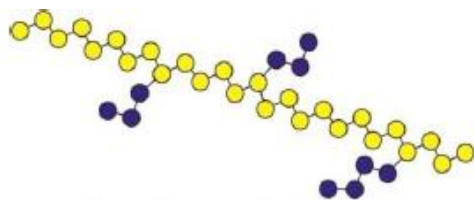


Figura 7. Esquematización de copolímero de injerto.

Copolímero al azar: Las unidades repetitivas están dispuestas aleatoriamente en la molécula, mostradas a través de la figura 8.

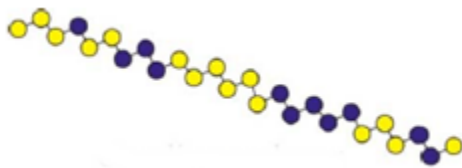


Figura 8. Esquematización de copolímero al azar.

- Crecimiento:

Otra forma de clasificación es la de crecimiento que se realiza a través de como la cadena se produce al ir adicionándose uno por uno al extremo de una cadena en crecimiento, esquematizada en la figura 9.



Figura 9. Crecimiento de polímeros por cadena.

Los procesos por etapas tienen más extremos o puntos de crecimiento como se aprecia en la figura 10, a estos se les va adicionando un grupo pequeño ya unidos (oligómeros) generando un crecimiento del tipo cadena múltiple.

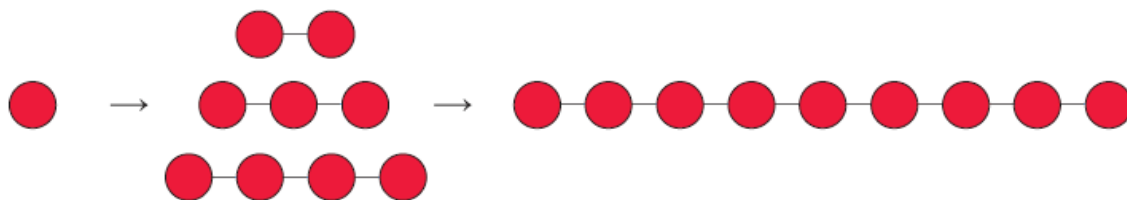


Figura 10. Crecimiento de polímeros por cadena múltiple.

- Estructura:

Las diferencias en las propiedades físicas se generan como resultado de las diferencias en la estructura general en la cadena del polímero, realizando una clasificación desde el punto de vista estructural.

Según su estructura molecular los polímeros pueden ser clasificados como lineales (figura 11), ramificados (figura 12) o entrecruzados (figura 13); hay otros tipos estructurales, más especializados: escaleras, estrellas y dendrímeros.



Figura 11. Estructura Lineal.

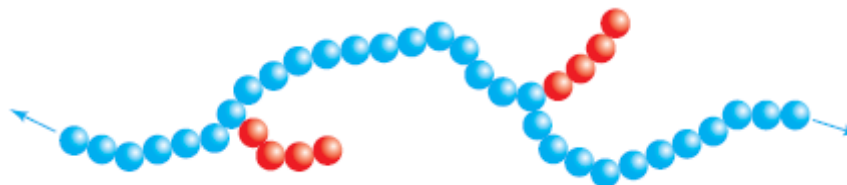


Figura 12. Estructura Ramificada.

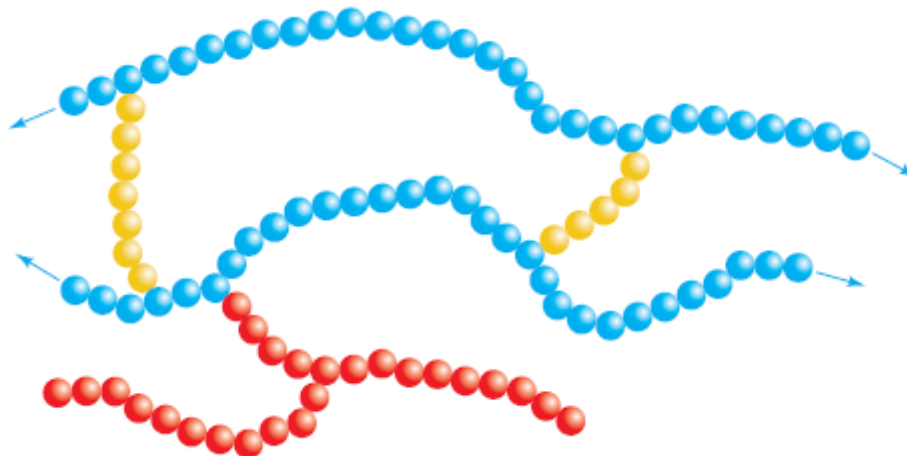


Figura 13. Estructura Entrecruzada.

La conformación más simple es la lineal, basada en la polimerización por adición de grupos vinilo (CH_2), estos tienen una cadena continua de unidades que se repiten. El conjunto de cadenas puede variar de forma aleatoria. Los polímeros que pertenecen al extremo aleatorio se llaman amorfos, y los del extremo ordenado, cristalinos.

Los polímeros ramificados poseen grupos voluminosos o cadenas cortas adheridas a la cadena principal, lo que conlleva la disminución de la movilidad de la cadena por lo cual estos polímeros son menos flexibles que los lineales y por lo general tendrán una temperatura mayor de fusión.

Cuando cadenas principales se unen con otras vecinas a través de cadenas de igual o diferente naturaleza por enlaces covalentes se obtiene una red tridimensional, se habla entonces de polímeros entrecruzados o reticulados los cuales son insolubles y no se funden. Esta estructura hace a estos polímeros resistentes a altas cargas mecánicas y físicas, sin embargo, debido a sus entrecruzamientos tienen baja elasticidad por lo cual son frágiles.

- Propiedades:

De acuerdo a las propiedades que presentan los polímeros se pueden clasificar en tres clases; destacándose los polímeros termoplásticos que son polímeros lineales no entrecruzados los cuales se reblandecen al calentarlos así pudiendo fundirse y procesarse reversiblemente, por lo tanto, son reciclables.

Por otro lado, los polímeros termofijos o termoestables debido a su estructura entrecruzada la energía térmica no conduce a una extensa movilidad de las cadenas por lo cual el polímero no se suaviza con el calor, es decir pasan por un estado líquido, y después se solidifican al calentarlos en forma continua.

Finalmente los elastómeros son polímeros flexibles que se pueden estirar y retornan a su estado original cuando cesa la fuerza de alargamiento. Los entrecruzamientos en los elastómeros limitan el grado en que se pueden deformar estos materiales y después regresar a su forma original cuando se les suelta.

1.1.2 Polímeros de adición

Otros puntos importantes de los polímeros hacen referencia con los polímeros de adición, los más conocidos porque se relacionan con la polimerización de los alquenos (rompimiento de doble enlace), a como estos inician y terminan el proceso de polimerización.

Esta polimerización se realiza por radicales libres o por coordinación que depende principalmente de la sustancia que se use para iniciar la reacción. Se presenta cuando hay un compuesto que experimenta una ruptura homolítica de enlace al calentarla. Los catalizadores de polimerización por coordinación son complejos de los metales de transición; uno de ellos es el catalizador original de Ziegler-Natta, una mezcla de tetracloruro de titanio y cloruro de dietilaluminio, que se ha diversificado con numerosos compuestos organometálicos, como el diclorobis (ciclopentadienil) zirconio(IV)⁶.

Posteriormente los principales procesos de terminación de cadena en la polimerización por radicales libres son combinación y desproporción (desmutación). En una combinación, el apareamiento del electrón impar de una cadena radical en crecimiento, con el de otra, forma una macromolécula estable. En la desproporción reaccionan dos radicales alquilo con transferencia de átomo de hidrógeno. El resultado son dos moléculas estables; una termina en un grupo metilo y la otra en un enlace doble.

Tanto la combinación como la desproporción consumen radicales libres y hacen disminuir la cantidad de cadenas en crecimiento. Debido a que requieren una reacción entre dos radicales libres y a que cada uno de ellos está presente con baja concentración, tienen baja

probabilidad, en comparación con el crecimiento de la cadena, en el que un radical reacciona con un monómero. La combinación sólo implica formación de enlaces y tiene baja energía de activación; la desproporción tiene mayor energía de activación porque la ruptura de enlaces acompaña a la formación de enlaces. La desproporción tiene un efecto más adverso sobre el crecimiento de la cadena y el peso molecular que la combinación.

1.1.3 Ramificación en la polimerización

Dependiendo de cómo se prepare, aun con el mismo monómero, las propiedades de un polímero pueden variar mucho. La polimerización del etileno por radicales libres forma polietileno de baja densidad; con la polimerización por coordinación se obtiene polietileno de alta densidad. Las propiedades son diferentes porque las estructuras son distintas, y la diferencia de las estructuras se debe a los mecanismos por los que se lleva a cabo la polimerización. La polimerización del etileno por radicales libres forma un polímero ramificado, y la polimerización por coordinación forma uno lineal.

Para que el polímero se ramifique, debe haber un proceso adicional en el que intervenga un radical en otro lugar que no sea el extremo de la cadena. Las dos maneras principales en que eso puede suceder implican la sustracción de un hidrógeno del interior de la cadena del polímero, detalladas a continuación⁷:

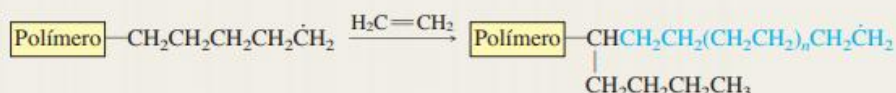
- Sustracción intramolecular de un átomo de hidrógeno:

Esta puede llevar a la formación de una ramificación con cuatro carbonos, como se indica en el mecanismo representado en la figura 14, el radical del extremo del polímero en crecimiento sustrae un átomo de hidrógeno del quinto carbono. Cinco carbonos y un hidrógeno forman seis átomos de un estado de transición cíclico; cuando se sustrae un átomo de hidrógeno del quinto carbono, en ese sitio se genera un radical secundario. Ése es, entonces, el carbono que se transforma en el origen del crecimiento posterior de la cadena. Mecanismos análogos se aplican a ramificaciones de menos o de más de cuatro átomos de carbono.

No se puede efectuar un proceso análogo cuando se usan catalizadores de Ziegler-Natta porque los radicales libres no son intermediarios en la polimerización por coordinación.

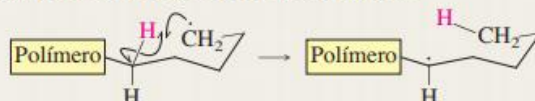
Ramificación en el polietileno causada por transferencia intramolecular de un hidrógeno

REACCIÓN:



MECANISMO:

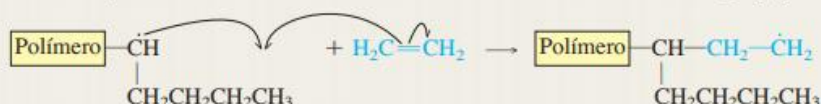
Paso 1: El carbono del extremo de la cadena, el que tiene el electrón no apareado, sustrae un átomo de hidrógeno del quinto carbono. El estado de transición es un arreglo cíclico de seis átomos.



El radical que se genera es secundario y más estable que el radical primario original. Por consiguiente, la sustracción del átomo de hidrógeno es exotérmica.



Paso 2: Cuando el radical reacciona con etileno, se efectúa la extensión de la cadena en el sitio del radical recién formado. El producto de este paso tiene una ramificación de cuatro carbonos unida a la cadena de propagación.



Paso 3: La reacción con más moléculas de etileno prolonga la cadena creciente.

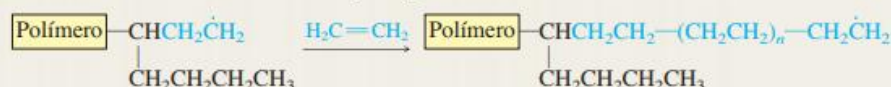


Figura 14. Ejemplo de mecanismo de sustracción intramolecular⁸.

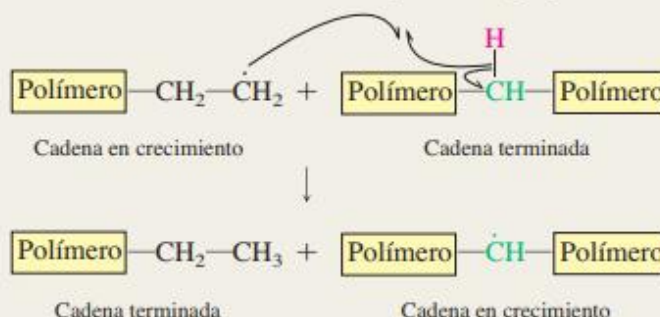
- Sustracción intermolecular de un átomo de hidrógeno (transferencia de cadena):

Se realiza cuando la cadena creciente del polímero sustrae un átomo de hidrógeno de una cadena terminada. Ahora, la cadena original creciente está terminada y está activada para crecer más, observar el ejemplo dado en la figura 15. Sin embargo, el crecimiento de la cadena se efectúa en el punto de ramificación y no en el extremo. Una cadena que ya es larga se ramifica mientras se termina una cadena (posiblemente más corta) en crecimiento. La transferencia de cadena no sólo causa ramificación, también promueve la disparidad en las longitudes de las cadenas; más cadenas cortas y más cadenas largas ramificadas. Ambas disminuyen la cristalinidad del polímero y reducen su resistencia.

Como en el caso de la sustracción intramolecular de hidrógeno, la ramificación por transferencia de cadena no es problema cuando se polimerizan alquenos bajo condiciones de Ziegler-Natta porque los radicales libres no son intermediarios en la polimerización por coordinación.

Ramificación en el polietileno causada por transferencia intermolecular de un hidrógeno

Paso 1: Un polímero en crecimiento sustrae un átomo de hidrógeno de una cadena terminada. Este paso termina la cadena en crecimiento y activa la que ya está terminada.



Paso 2: La reacción de la nueva cadena con moléculas de monómero produce una ramificación en la que se presenta el futuro crecimiento.

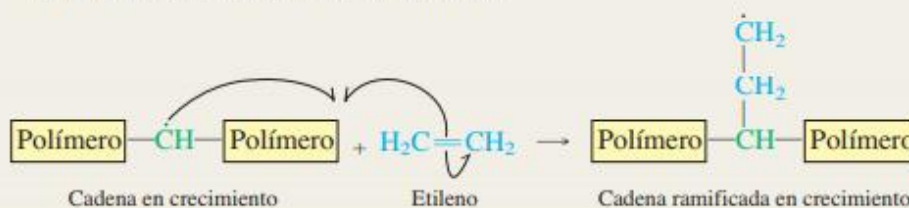


Figura 15. Ejemplo de mecanismo de sustracción intermolecular⁹.

1.1.4 Polimerización aniónica y catiónica

La polimerización aniónica es una buena alternativa a los procedimientos por radicales libres y de Ziegler-Natta para ciertos polímeros. Por ejemplo, al adicionar butil litio a una solución de estireno en tetrahidrofurano (THF), se obtiene poliestireno.

De manera análoga a la etapa de iniciación de la polimerización aniónica por adición de nucleófilos a alquenos, la polimerización catiónica puede ser iniciada con la adición de electrófilos. Los alquenos que responden bien a la polimerización catiónica son aquellos que forman carbocationes relativamente estables cuando se protonan.

1.2 Polímeros Sintéticos más utilizados

1.2.1 Polietileno

Fórmula química: C₂H₄

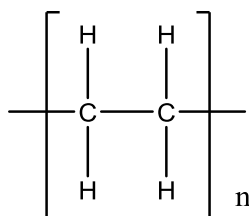


Figura 16. Estructura química del polietileno.

Es un polímero lineal de gran regularidad, formado por unidades de metilo que puede presentar algunas ramificaciones cortas como consecuencia de reacciones secundarias del propio mecanismo de polimerización estructural, sintetizado a partir de la olefina más sencilla llamada etileno. Según las condiciones en que se lleva a cabo la reacción de polimerización se obtienen polietilenos lineales o ramificados.

1.2.1.1 Tipos de polietileno

- Polietileno de baja densidad (PEBD): La presencia de cadenas laterales impiden la cristalización del material, por lo que es un plástico amorfo (la cristalinidad no supera el 20%) y de baja densidad inferior a 0,92 [g/cm³]. Presenta alta resistencia al impacto, gran flexibilidad, fácil procesabilidad, gran transparencia, gran resistencia a los productos químicos, baja permeabilidad al agua, gran estabilidad y buen aislante eléctrico.
- Polietileno lineal de baja densidad (PELBD): Variedad de polietileno no ramificado. Se sintetiza copolimerizando etileno con alfa-olefinas con el fin de controlar el numero y la longitud de las ramificaciones de la cadena principal. Sintetizado a bajas presiones y temperaturas, utilizando catalizadores de metales de transición a través de un mecanismo tipo aniónico. Es un material semicristalino, correspondiendo su densidad al grado de cristalinidad que presenta (hasta del 75%); los valores oscilan entre 0,915 y 0,960 [g/cm³].

La utilización de este tipo de polietileno se dirige mayoritariamente a la fabricación de filmes, piezas de moldeo por inyección, recubrimientos de cables, piezas de moldeo rotacional, entre otros.

- Polietileno de alta densidad (PEAD): Presenta un alto grado de cristalinidad y lleva asociado una densidad alta, superior a 0,95 [g/cm³]. Se sintetiza utilizando catalizadores metálicos; oxido de cromo (proceso Phillips) o catalizadores tipo

Ziegler- Natta, a baja presión con procedimientos de solución, suspensión o en fase gaseosa.

Es un producto prácticamente insoluble en cualquier disolvente, muy estable al calor y agentes químicos. Es un material blanquecino no transparente, al igual que las anteriores variedades, el PE no presenta ningún tipo de toxicidad ni durante su manipulación ni durante su uso, por lo que se utiliza en el envasado de alimentos.

Existe una amplia variedad del PEAD que presenta un peso molecular por encima de 3.000.000, mientras que el peso molecular del de alta densidad es del orden de 50.000. Se le denomina polietileno de ultra-alto peso molecular (PEUAPM). Este elevado peso molecular le confiere propiedades superiores a las de cualquier otro termoplástico, como gran resistencia a la corrosión, buena resistencia a los medios activos (tensofisuración), bajo coeficiente de fricción, resistencia a la radiación y es utilizado en procesos químicos, industrias de alimentos y bebidas, equipamiento deportivo, fabricación de fibras resistentes y ligeras, entre otros.

Tabla 1. Resumen de las características de los diferentes tipos de polietileno¹⁰.

Polietileno	Ramificación	Cristalinidad	Densidad	Resistencia	Alargamiento
PEAD	Pequeña	70-80%	0,96-0,94	Alta	Bajo
PELBD	Media	50-60%	0,94-0,92	Media	Medio
PEBD	Grande	40-50%	0,92-0,86	Baja	Alto
PEUAPM	Pequeña	70-80%	-	Alta	Bajo

1.2.1.2 Aplicaciones

Las aplicaciones que se les dan al polietileno se deben a sus propiedades de ser un material de bajo costo, no tóxico, no conductor y resistente.

Los polímeros de polietileno de baja densidad son utilizados en la industria debido a que presentan buenas propiedades mecánicas. Se trata de polímeros con buena procesabilidad y resistencia al impacto. Sus aplicaciones más importantes son: bolsas, tubos, mangueras, aislantes para cableado, entre otros.

Los polímeros de polietileno de alta densidad son ampliamente utilizados debido a su ligereza, transparencia, resistencia, versatilidad de forma en los sectores de envases,

botellas y frascos que son contenedores con finalidades de proteger el producto y dar un soporte para el transporte de los mismos, empaque de tamaños variados para la contención y envoltura, industria eléctrica, automotriz y otros.

1.2.2 Poliestireno

Fórmula química: C_8H_8

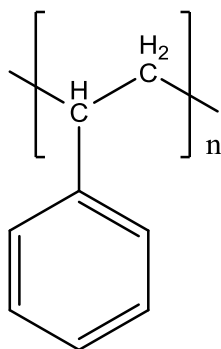


Figura 17. Estructura química del poliestireno.

El poliestireno (PS) es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno monómero. Las unidades repetitivas de estireno conforman este polímero.

1.2.2.1 Tipos de poliestireno

- PS cristal o GPPS: transparente, rígido y quebradizo.

El producto de la polimerización del estireno puro se denomina poliestireno cristal o poliestireno de uso general (GPPS). Es un sólido transparente, duro pero frágil. Es vítreo por debajo de 100 °C, por encima de esta temperatura es fácilmente moldeable y puede dársele múltiples formas.

- Poliestireno de alto impacto o HIPS: resistente al impacto y opaco blanquecino.

Para mejorar la resistencia mecánica del material, se puede añadir en la polimerización hasta un 14% de caucho (casi siempre polibutadieno). El producto resultante se llama poliestireno de alto impacto (HIPS), es más resistente y no quebradizo, capaz de soportar impactos más violentos sin romperse. Su inconveniente principal es su opacidad.

- Poliestireno expandido o EPS: muy ligero.

Consiste en 95% de poliestireno y 5% de un gas que forma burbujas que reducen la densidad del material. Su aplicación principal es como aislante en construcción y para el embalaje de productos frágiles.

- Poliestireno extruido o XPS: similar al expandido pero más denso e impermeable.

A partir de poliestireno cristal fundido se puede obtener, mediante inyección de gas, una espuma rígida denominada poliestireno extruido (XPS). Sus propiedades son similares a las del EPS, con el cual compite en las aplicaciones de aislamiento. El poliestireno extruido presenta burbujas cerradas, por lo que puede mojarse sin perder sus propiedades aislantes. El EPS también dispone de variedades de baja absorción de humedad.

1.2.2.2 Aplicaciones

Las ventajas principales del poliestireno son su facilidad de uso y su coste relativamente bajo. Sus principales desventajas son su baja resistencia a la alta temperatura (se deforma a menos de 100 °C, excepto en el caso del poliestireno sindiotáctico) y su resistencia mecánica modesta. Estas ventajas y desventajas determinan las aplicaciones de los distintos tipos de poliestireno.

Las aplicaciones principales del PS antichoque y el PS cristal son en la fabricación de envases mediante extrusión-termoformado y de objetos diversos mediante moldeo por inyección. Algunos ejemplos son: carcasas de televisores, impresoras, puertas e interiores de frigoríficos, maquinillas de afeitar desechables, juguetes. Según las aplicaciones se le pueden añadir aditivos como por ejemplo sustancias ignífugas o colorantes.

Las formas expandidas y extruida se emplean principalmente como aislantes térmicos en construcción y para formar coquillas de protección en los embalajes de objetos frágiles para protegerlos. El EPS también es utilizado para la producción de cajas de pescado o neveras para el transporte de vacunas, por su capacidad aislante. Pero su uso más específico es el de aislante térmico en cubiertas invertidas, donde el aislamiento térmico se coloca encima del impermeabilizante, protegiéndolo de las inclemencias del tiempo y alargando su vida útil.

1.2.3 Polipropileno

Fórmula química: C_3H_6

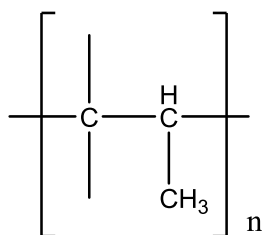


Figura 18. Estructura química del polipropileno.

El polipropileno es considerado como un polímero termoplástico parcialmente cristalino, que es obtenido a través de la polimerización del propileno o propeno.

Posee cualidades como ser un material muy duro y resistente tanto químico como físico; cualidad dada debido a que se ablanda a una temperatura superior a los 150[°C].

Es un polímero inerte, reciclable y la incineración no tiene ningún efecto contaminante. Lo que conlleva a que su producción es la de menor impacto ambiental.

1.2.3.1 Tipos de polipropileno

- Polipropileno homopolímero: Posee una gran rigidez, buena resistencia de transporte de comúnmente líquidos y una buena estabilidad de fundido, además de procesabilidad. Especialmente es utilizado para moldeo por medio de extrusión de aplicaciones orientadas como rafia y monofilamento.
- Polipropileno copolímero: De impacto medio, ofrece una buena estabilidad dimensional, gran resistencia a temperaturas bajas; sin transferencia de olor y sabor. La producción es principalmente a través de moldeo por inyección y termoformado.
- Polipropileno copolímero aleatorio o random: Posee la característica principal de su transparencia y claridad, teniendo una buena resistencia al impacto. Especialmente utilizado para moldeo por inyección.

1.2.3.2 Aplicaciones

Debido a que existe una amplia línea de polipropilenos que son utilizados mayormente en procesos de inyección, extrusión y soplado es que se genera de la misma forma una variedad de aplicaciones a partir de este polímero como lo es la ocupación en la fabricación de empaques para alimentos, contenedores de líquidos, equipo de laboratorio, baldes, cajas

recipientes de multiusos, componentes automotrices, mobiliario (mesas, sillas), utensilios, películas, tejidos, fibras, entre otros.

1.3 Métodos de reciclaje

La industria del reciclado plástico proporciona la solución para el problema de los residuos plásticos convirtiendo residuos en recursos, no solo recupera y revaloriza los desechos urbanos sino que también hace lo propio con los desechos plásticos provenientes de las industrias y los generados por el agro.

Clasificados por su origen encontramos tres tipos de plásticos: residuos sólidos urbanos, residuos agrícolas y residuos industriales.

Dependiendo del tipo de reciclado que se le realice al plástico se puede clasificar como se muestra de manera general en la figura 19.



Figura 19. Tipos de reciclaje de plásticos.

1.3.1 Reciclaje Mecánico

El reciclaje mecánico comienza a la llega del material, posteriormente se troza para luego ser introducido en una máquina extrusora para fabricar pellet reciclado y desde el formato pellet llevarlo al producto que se requiera.

Un polímero que ha cumplido su vida útil pierde sus propiedades fisicoquímicas originales, ya sea por su uso y por el desgaste natural a nivel molecular, así también, por factores externos como radiación UV, contaminantes ambientales y el entorno. Todo lo anterior, afecta sus propiedades y su calidad, por ende un polímero reciclado debe ser utilizado apropiadamente en una faena o aplicación cuyas exigencias fisicoquímicas y de materialidad sean menores que la del polímero original.

Consideración económica: El precio del pellet virgen debe ser superior a la del material pos consumo limpio y seco puesto en la fábrica transformadora/peletizadora, ya que de no ser así esta materia no presenta interés comercial.

Al realizar el proceso de reciclaje mecánico se presentan dos encrucijadas que es la combinación de los diferentes polímeros de los cuales se deben separar ya que cada uno presenta características distintas y la otra es como realizar esta separación; a continuación se presentan técnicas y factores importantes para tener en cuenta y así resolver ambas de mejor forma el reciclaje mecánico de polímeros¹¹:

1. Polímeros mezclados

- Miscibilidad (en términos moleculares, no se encuentran mezclados de forma homogénea los diferentes polímeros), el caso ideal es una mezcla homogénea.
- Compatibilidad: grado de compenetración que existe entre los componente de la mezcla. Es compatible cuando presenta buenas propiedades mecánicas que lo hacen propicio para ser utilizado como material.

2. Separación de plásticos

- Técnica de flotación-hundimiento basada en la diferencia de densidad.

Se trocea la mezcla de polímeros, la cual es introducirla en agua que contiene una pequeña cantidad de detergente para conseguir que el agua moje al plástico.

Quedan sobrenadando los que poseen menor densidad y se sumergen los de mayor densidad. Para lograr una mejor separación física, se puede incrementar o disminuir la densidad agregando sal (mezcla salina) o alcohol (etanol). Posteriormente se agrega sal (mezcla salina) si es que se quiere ir subiendo de densidad y alcohol (etanol) si se quiere bajar. A continuación en la tabla 2 se aprecian las densidades de los polímeros:

Tabla 2. Densidades de los polímeros¹².

Polímero	Densidad g/cm ³
Polietileno alta densidad	0,94 - 0,97
Polietileno baja densidad	0,91 - 0,93
Poliestireno	1,04 - 1,10
Polipropileno	0,93 – 0,94

- Utilización de disolventes

Método desarrollado por Seymour y Stahl para separar mezclas de polímeros como PE, PS y PVAC.

El método consiste en disolver en una mezcla de tolueno a T° ambiente, en donde el PE y PVC son separados mediante el proceso de filtración. Esta solución se vierte sobre metanol en el que precipita el PS y la fracción soluble posteriormente se precipita en éter de petróleo obteniéndose el PVAC. Repitiendo el procedimiento para la mezcla insoluble inicial con tolueno caliente separando así estas en dos fracciones; PVC y PEAD.

Este procedimiento posee un alto costo y que se realizan solo en laboratorios.

- Técnicas espectroscópicas

Se basa en las diferentes respuestas que tienen los plásticos a la radiación electromagnética en función de su estructura química; lo cual arroja una respuesta rápida y esquematizada.

Destacándose la fluorescencia de rayos X y la radiación infrarroja dentro de las técnicas espectroscópicas más utilizadas, debido al menor costo frente las otras, además de lo fácil y estandarizada que esta la obtención de información a través de esta.

- Técnicas electrostáticas

Separación triboeléctrica se basa en la carga electrostática que se genera en pequeñas partículas de plástico provocada por la fricción con la pared del cilindro generado por un remolino de aire. Una vez cargadas las partículas se proyectan a un campo electrostático creado entre unas placas metálicas a las que se aplica un potencial de 120.000 [V]. Dentro

de las técnicas se destaca el hidrociclón que produce la separación a través de las densidades para PMMA, PE y PVC.

- Utilización de marcadores químicos

Se proporciona al material una cierta propiedad física fácilmente identificable a través de un marcador químico introducido en su fabricación lo que incorpora un determinado marcador a cada polímero.

- Marcado mecánico

Basada en la incorporación de códigos con los respectivos números pertenecientes a cada polímero para así realizar la fácil identificación y separación del grupo polimérico. Proceso muy útil para el reciclaje debido a la fácil e inequívoca clasificación de los tipos de polímeros.

1.3.2 Reciclado Químico

“Reacción reversible de la polimerización hacia la recuperación de las materias primas.”

A través de la figura 20 se muestra de forma esquematizada los tratamientos químicos que se pueden aplicar a los plásticos.



Figura 20. Esquema reciclado químico.

El proceso de reciclado químico se divide en dos direcciones dependiendo de la reacción de la cual se obtuvo el polímero que pueden ser por adición o por condensación. Si los polímeros se formaron por reacciones de condensación, los tratamientos químicos a los que se someten son del tipo hidrolítico (hidrolisis, metanólisis y licólisis)¹³.

En el reciclado los polímeros de adición no es necesario separarlos según su naturaleza, ya que la mezcla de productos obtenidos en su proceso (compuestos aromáticos y alifáticos) puede utilizarse conjuntamente como alimentación en la industria petroquímica.

1.3.2.1 Polímeros de adición

1. Vía Térmica:

- Gasificación

Calentamiento de plásticos en presencia de aire u oxígeno, así se producen reacciones de oxidación obteniendo gas de síntesis (mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno)

Esta técnica permite tratar de manera conjunta cualquier mezcla de plásticos.

- Craqueo y pirolisis térmica

Este proceso se realiza generalmente en ausencia de oxígeno a temperaturas comprendidas entre 400 - 800 [°C] y a presión reducida.

2. Vía Catalítica:

- Hidrogenación

Es un proceso que licúa los residuos plásticos antes de someterlos a tratamientos de pirolisis para conseguir olefinas y aromáticos.

- Transformaciones catalíticas

Catalizadores como zeolitas, aluminosilicatos o catalizadores súper-ácidos conducen a fracciones hidrocarbonadas de diferentes composiciones y uso.

1.3.2.2 Polímeros de Condensación

- Reacciones de despolimerización

El reciclado químico recupera los monómeros de partida que se destinan nuevamente a la obtención de polímero. Asociada más a procesos hidrolíticos. Tres reacciones aplicadas, en general al PET son:

- Metanólisis: Despolimerización total del plástico por acción del metanol. Es un proceso de trans-esterificación en el que se obtiene tereftalato de metilo y etilenglicol. Costo alto y calidad de producto virgen y total.
- Glicólisis: Despolimerización parcial por acción del etilenglicol formando el éster hidroxietílico y mezcla de oligómeros. La mezcla de reacción se somete a purificación, siendo polimerizada posteriormente con resina virgen. Costo y calidad moderada.
- Hidrólisis: Despolimerización total por acción del agua en presencia de ácidos o álcalis. Interés académico, procedimiento difícil.

1.3.3 Degradación de plásticos

La degradación es un proceso dirigido a modificar la estructura del polímero para hacerlo vulnerable, perecedero y que desaparezca como residuo. Se clasifican basándose en quien realiza la acción de degradación y así se les da los nombres respectivos mencionados a continuación:

- Luz: Fotodegradación
- Calor: Degradación térmica
- Atmósfera: Degradación oxidativa
- Humedad: Degradación hidrolítica
- Microorganismos: Biodegradación

Por ser tan estables los plásticos se deben sintetizar de manera foto o biodegradable.

- Fotodegradación

“La mayoría de los materiales plásticos sufren un envejecimiento que lleva asociado una merma en sus propiedades cuando son sometidos durante largos periodos de tiempo a la radiación luminosa. Este envejecimiento se atribuye a una reacción de fotooxidación térmica en cadena producida por la radiación luminosa de mayor energía correspondiente a una longitud de onda comprendida entre 290 - 350 [nm], en la que se generan grupos carbonilo. Estos grupos son los que desencadenan las reacciones degradativas del plástico.”

El proceso transcurre a partir de grupos carbonilos para que este transcurra de manera significativa, debe favorecerse el proceso fotoquímico mediante la incorporación de grupos carbonilo a la cadena macromolecular. Esto puede conseguirse de dos maneras diferentes, bien modificando químicamente el polímero ya formado o bien copolimerizando el monómero principal con otro que posea grupos carbonilo en la estructura, como por ejemplo vinilcetonas. También se puede llevar a cabo la reacción de polimerización del monómero en presencia de anhídrido carbónico a presión, logrando que se incorporen grupos CO (monóxido de carbono) en la cadena polimérica.

Una opción más para conseguir plásticos fotodegradables consiste en aditivar el polímero con sustancias fotosensibles que promueven el fenómeno. Manteniendo cuidado con las condiciones de reacción.

La acción degradativa se reduce simplemente a disminuir el peso molecular de las cadenas y después son los agentes ambientales; con su capacidad de erosión, transporte y fundamentalmente los hongos y bacterias, son los encargados de hacer desaparecer los fragmentos formados.

1.3.4 Análisis de Ciclo de Vida

Cuando se realiza una gestión de reciclaje polimérico se analiza la viabilidad del proyecto para cada situación particular, localización y estado del residuo. Así también se debe tener presentes consideraciones ecológicas analizando el impacto ambiental que produce el tratamiento seleccionado a aplicar.

Para considerar el reciclado mecánico hay que tener en cuenta:

- Producto separado
- Estado de suciedad y contaminación que acompaña al material.
- Gasto de agua y contaminación de la misma producida en el proceso de limpieza.
- Estado de deterioro del material
- Predicción de las propiedades mecánicas que tendrá el producto reciclado
- Coste del transporte y consumo energético gastado en poner el material post consumo en la industria recicladora.

De forma analógica, para el reciclado químico se considera:

- Localización de la planta petroquímica más próxima para prever el costo de transporte del material
- Volumen de residuos recuperados para ser sometidos a tratamiento.
- Balance económico de la operación de recuperación de monómeros u obtención de aceites.

Para decidir la gestión más correcta de los residuos plásticos lo adecuado es evaluar conjuntamente el impacto ambiental total que comprende todas las operaciones realizadas en la recuperación de los mismos, contabilizando con valores positivos y negativos, tanto la energía puesta en juego como las emisiones producidas, en los diferentes tipos de gestión.

El análisis de ciclo de vida (ACV) de un material permite realizar de forma científica la determinación del impacto medioambiental de un proceso o de un producto o de ambos a la vez. Este representa un balance de materia y energía, valorando el impacto ambiental ocasionado en cada etapa del proceso.

La determinación del ACV permite optimizar los recursos con el objetivo principal de maximizar el uso de los mismos minimizando las emisiones. De esta manera el ACV permite tomar importantes decisiones en cada una de las etapas de un producto o en diferentes etapas de un proceso.

1.4 Problemática Ambiental

La problemática ambiental se inició con el uso de polímeros sintéticos sin control¹⁴. Debido a la amplia y útil gama de productos ofrecidos a partir de estos materiales y a su casi nula o escasa degradación en largos periodos de tiempo. Por lo cual, los residuos generados se han acumulado durante décadas, sumado a su pésima y nula gestión generando un desastre y encrucijada a nivel mundial, que inclusive forman islas del tamaño continente comúnmente llamadas de “plástico”.

1.4.1 Polímeros a nivel mundial

1.4.1.1 Áreas de utilización

La producción de polímeros se puede clasificar de acuerdo a las áreas de su utilización que son presentadas a continuación:

Envases y embalajes: Se destaca la utilización de polímeros de un solo uso conteniendo un material durante un tiempo o los que solo se usan en un corto periodo de tiempo, por ello se produce una alta generación de residuos de este tipo. Las utilidades más comunes son en la generación de botellas, bolsas, cápsulas, sacos y filmes caracterizados por los polímeros PEAD, PEBD y PET.

Agricultura: En su mayoría son utilizados en la plasticultura (utilización de polímeros sintéticos en los cultivos para protegerlos de los fenómenos atmosféricos adversos o darles un ambiente determinado) a través de invernaderos, túneles de cultivo, regadío, acolchado de suelos, los cuales son generados después del periodo de cultivo. De los materiales recuperables sólo se puede aprovechar el 40% para el reciclaje, ya que se degradan mucho durante su utilización, lo que implica utilización de materias primas vírgenes para compensar esta pérdida, con lo que se incrementa el precio de éstos. Los materiales más utilizados son PEAD, PEBD y PVC.

Construcción: Utilizados en la aislación y separación de cableado como lo es las tuberías (PVC y PE), los perfiles de persianas y ventanas (PVC), materiales aislantes (PS). Cabe destacar que los materiales utilizados en construcción son de larga data, por lo cual su generación de residuos se produce generalmente cuando se produce un cambio de piezas.

Automóviles: Al interior de los automóviles existen algunas partes de polímeros sintéticos como lo son los parachoques, faros y depósitos de combustibles los polímeros más utilizado es el PP y PEAD. De igual forma que en la construcción la utilización de los polímeros en este caso es de una larga duración lo cual solo son generados cuando se desecha el automóvil o por algún defecto que se provoque en él.

Productos eléctricos y electrónicos: Gran parte de los productos electrónicos se elaboran con polímeros de alta resistencia debido a su facilidad de maleabilidad y la gran diferenciación que se puede realizar. Destacándose el PP y PS como los polímeros más utilizados. Este residuo se está generando cada vez más ya que la tecnología avanza de gran manera lo que provoca que la población cambie los aparatos con mayor regularidad.

Por medio del siguiente diagrama circular ilustrado en la figura 21 se observa los porcentajes de las áreas en las que se utilizan los polímeros. Destacando el gran porcentaje

que abarca la agricultura, el embalaje y envasado; que son aéreas donde los plásticos en su mayoría son utilizados durante un breve tiempo o solo un uso.

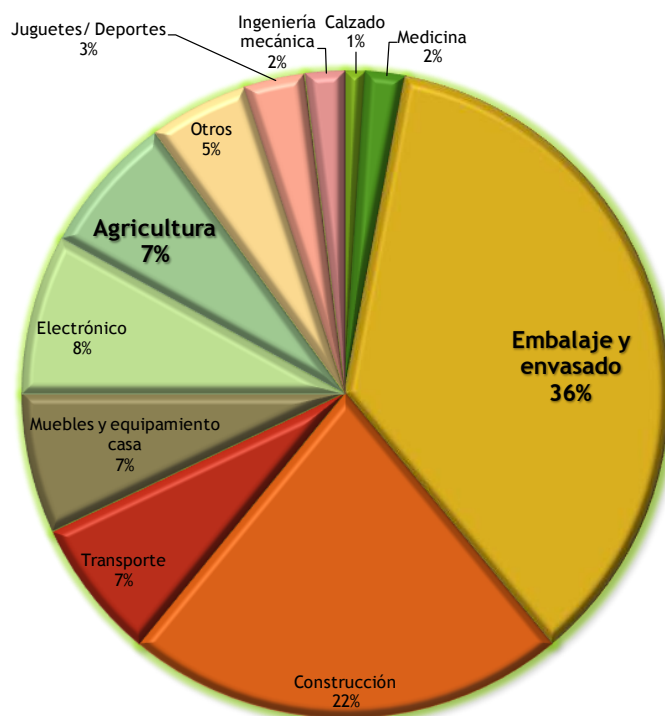


Figura 21. Gráfico de las áreas en porcentajes que utilizan plásticos.

1.4.1.2 Producción y demanda mundial

El inicio de la producción de polímeros sintéticos comienza en el año 1950, desde entonces se comenzaron a producir de forma industrial en respuesta a problemáticas presentes de la época, como por ejemplo, suplir y mejorar problemas de contaminación e higiene de alimentos. Debido a las excepcionales cualidades de los plásticos como: bajo costo, durabilidad y resistencia hicieron que el mercado mundial exigiera cada vez más convirtiéndose en dependientes de él a través de los años.

La producción global de plásticos se ha disparado en los últimos 50 años, y en especial en las últimas décadas. Entre 2002-2013 aumentó un 50%: de 204 millones de toneladas en 2002 a 299 millones de toneladas en 2013¹⁵.

Dentro de los países destaca China como el principal productor de plásticos seguido de Europa, Norte América y Asia (excluyendo China). Dentro de Europa, más de dos tercios de la demanda de plásticos se concentran en cinco países Alemania (24,9%), Italia (14,3%),

Francia (9,6%), Reino Unido (7,7%) y España (7,4%)¹⁶. A continuación se puede apreciar por medio de la figura 22 los porcentajes de producción de los polímeros a nivel mundial.



Figura 22. Porcentajes Productores de Polímeros Sintéticos¹⁷.

Se estima que en 2020 se superarán los 500 millones de toneladas anuales producidas, lo que supondría un 900% más que los niveles de 1980¹⁸. El aumento de la producción a través de los años queda registrado a través de la figura 23 y figura 24.

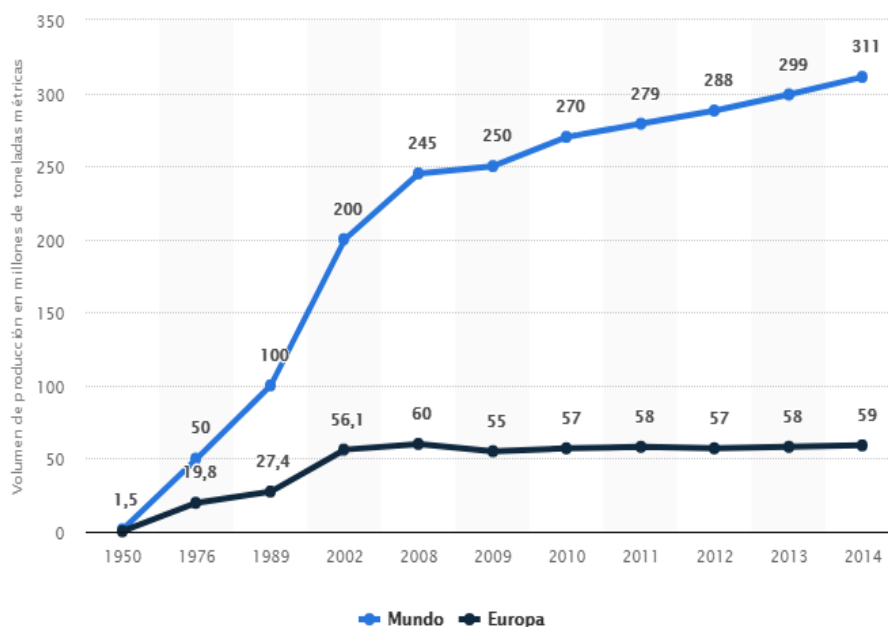


Figura 23. Producción mundial de polímeros (en millones de toneladas métricas)¹⁹.

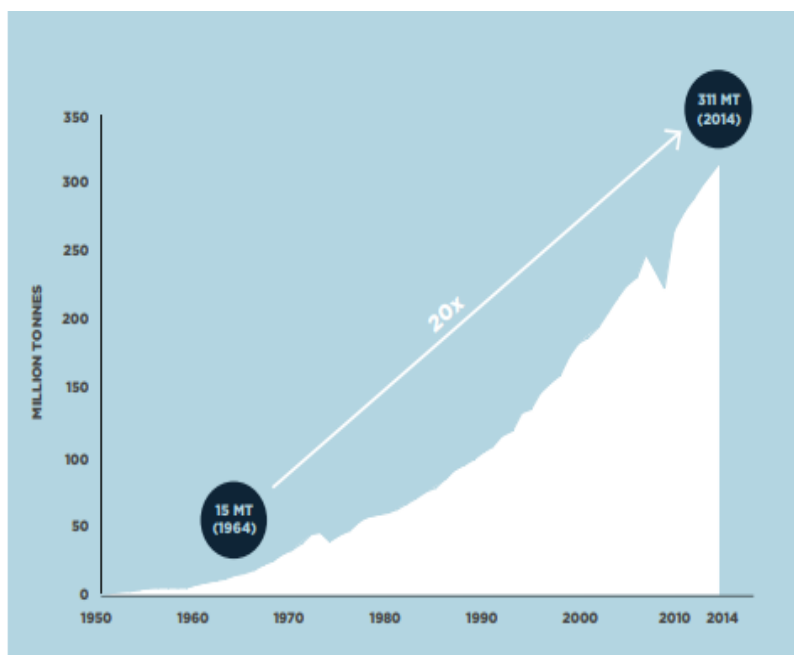


Figura 24. Producción global de plásticos²⁰.

1.4.1.3 Reciclaje mundial

Nuestra capacidad para hacer frente a los desechos ya ha sido sobrepasada; solo se ha reciclado el 9% de los residuos de las 9.000 millones de toneladas de plástico producidas en el mundo, el 12% se incinera y el 79% restante acaba en vertederos o en el medio ambiente.

La mayor parte ha terminado en vertederos, basureros o en el medio ambiente. Si continúan los patrones de consumo y las practicas de gestión actuales, para el 2050 habrá alrededor de 12.000 millones de toneladas de basura plástica en los vertederos y espacios naturales. En ese entonces, si el aumento en la producción de plástico mantiene su ritmo vigente, la industria de este polímero consumirá el 20% de la producción global de petróleo²¹, como se ejemplifica en la figura 25.

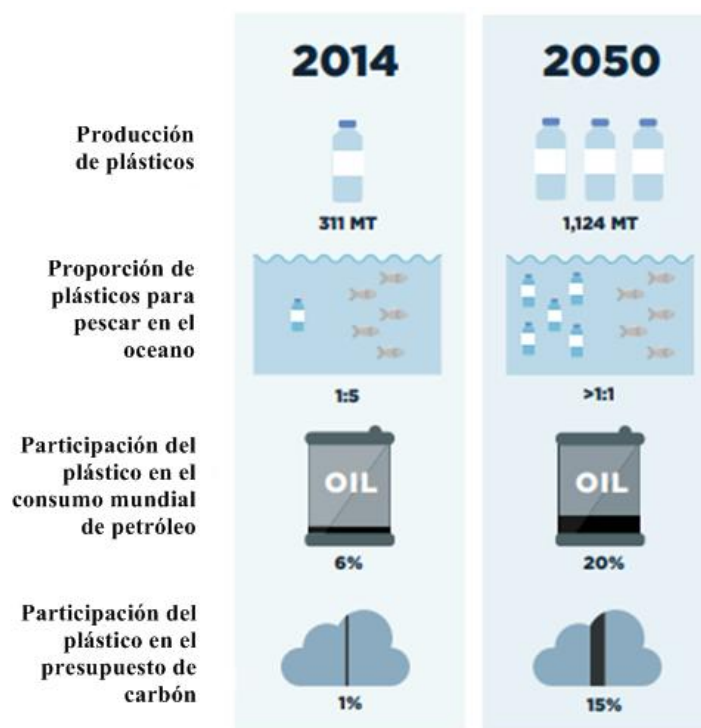


Figura 25. Pronóstico del crecimiento del plástico y el consumo realizado²².

1.4.1.4 Disposición de los polímeros sintéticos

Al convertirse los polímeros sintéticos en un desecho, este puede ser dispuesto de la mejor manera en un relleno sanitario, ser incinerado o reciclado, conllevando con los dos últimos la valorización del residuo para aprovechar tanto la energía que aún queda en él como también darle un nuevo uso para generar un nuevo producto y alargar la vida útil de este; siendo la última opción la del relleno sanitario debido a que aquí este se demorara mucho en degradarse y ocupara gran volumen en él.

En variadas ocasiones lo cual se demuestra en la actual problemática generada no terminan en las disposiciones anteriormente nombradas si no que terminan en vías fluviales y océanos a través de los sistemas de drenaje de aguas en zonas urbanas, por el agua que fluye por los vertederos, los vertidos de basura deliberados, los residuos abandonados, los vertidos accidentales de los barcos o mediante los efluentes de las estaciones depuradoras y plantas de tratamiento de aguas residuales. El 80% de los residuos marinos proviene de tierra, mientras que el 20% restante de la actividad marítima

Debido a la mala disposición y gestión de los polímeros sintéticos una vez transformados en residuos es que en la actualidad 8 millones de toneladas de plásticos acaban en los

océanos al año, formando el 60-80% de la basura marina²³. De un total de 150 millones de toneladas métricas de plástico que circula en los océanos, su mayoría se encuentra en forma de microplásticos, estimando que son unos 5-50 billones fragmentos²⁴. Estos llegan por medio directo al mar siendo arrojados indiscriminadamente, por dejarlos en áreas litorales; especialmente en regiones con alta población costera con sistemas de gestión de residuos inadecuados, pesquerías intensivas o turismo elevado, o en terrenos continentales cercanos a un curso de agua el cual finalmente desemboca en los océanos.

Se desconoce la cantidad exacta de plásticos en los mares pero se estiman que estos fragmentos de polímeros sintéticos se encuentran distribuidos porcentualmente 15% en la superficie y 15% en la columna de agua, sin incluir los trozos que hay en el fondo marino o en las playas que son el 70%. Las cantidades presentes en mares ya son materia de estudio como se refleja en la figura 26, que detalla lo encontrado en investigaciones realizadas en los mares europeos.

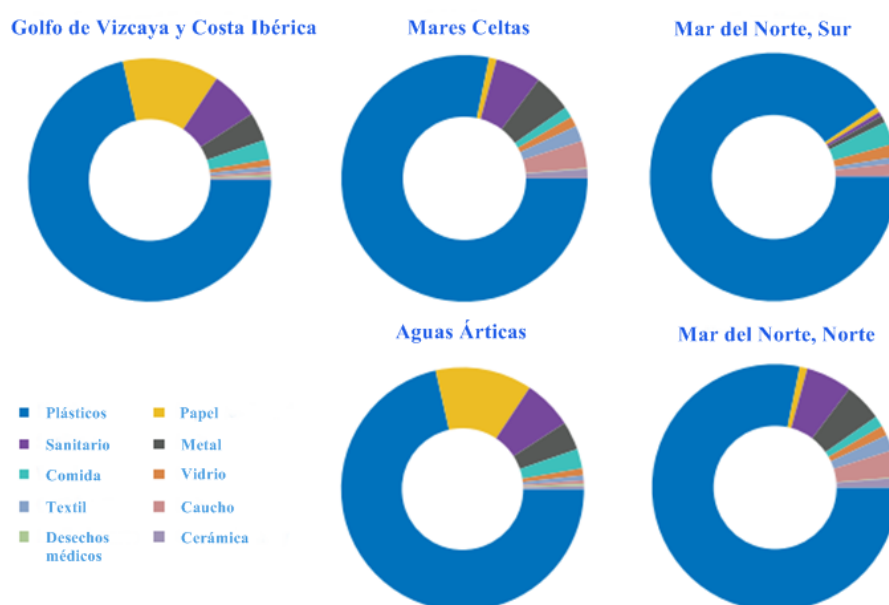


Figura 26. Gráficos de composición en mares²⁵.

En los océanos, las corrientes oceánicas y el movimiento del agua junto con la persistencia de la composición y la dispersión de los polímeros sintéticos; han producido que en la actualidad existen cinco islas de basura formadas en su gran mayoría por microplásticos, ubicadas como se muestra en la figura 27: dos en el Pacífico, dos en el Atlántico, y una en el Índico.

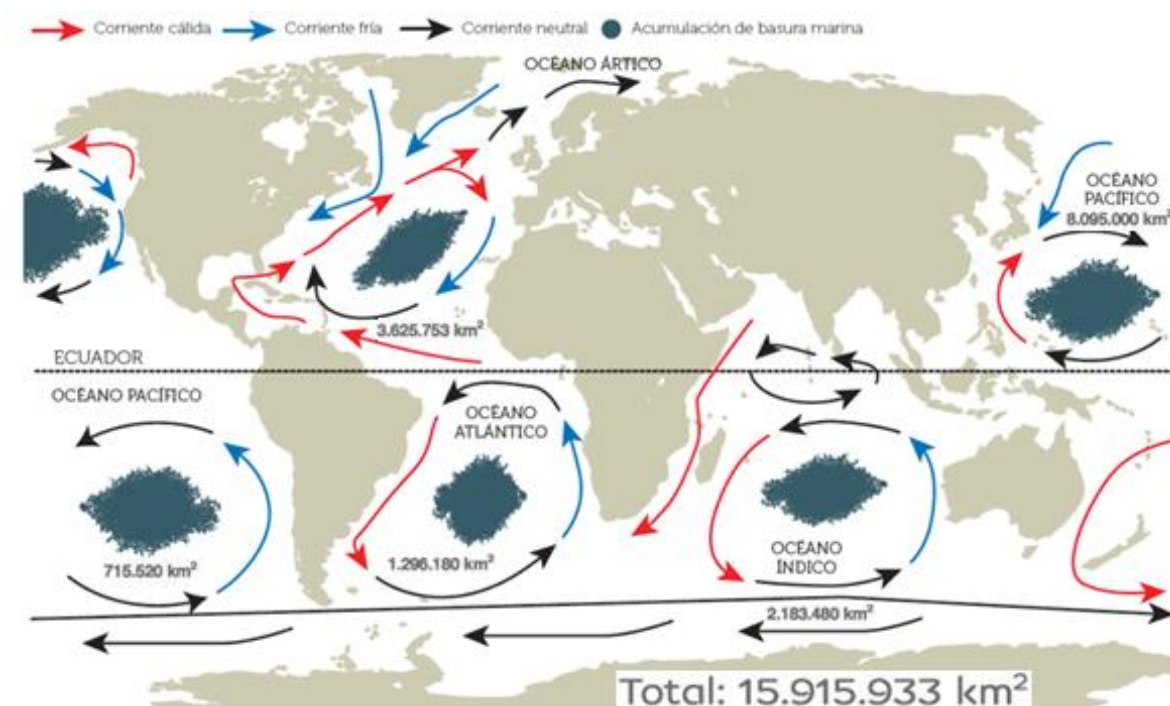


Figura 27. Islas de plásticos en el planeta²⁶.

Los polímeros sintéticos se degradan conforme las cualidades que poseen a partir de las condiciones ambientales a las que se expone como lo es la luz solar, el oxígeno y los agentes mecánicos; pero esta degradación dura muchos años y en casos no existe un tiempo posible a la degradación. En los océanos los factores que inciden en el proceso de degradación es principalmente la radiación UV y el oleaje generando que los polímeros sintéticos se vayan fragmentando produciendo así los microplásticos. Debido a esto resulta muy difícil cuantificar el tiempo que tardan en degradarse los polímeros sintéticos debido a que al sumergirse quedan entre medio de materia orgánica e inorgánica provocando menos exposición a la luz solar, al oxígeno y con una disminución de temperaturas; por todo lo anterior se considera que el proceso es más duradero que en la tierra.

1.4.1.5 Impacto oceánico

El impacto provocado por los polímeros sintéticos en el ecosistema marino se ha enfocado fundamentalmente en los microplásticos como se ha mencionado anteriormente los polímeros se van fragmentan por diferentes factores, cabe destacar que muchos de ellos son producidos de este tamaño, en productos cosméticos. Hace un tiempo se ha ido documentado las malas interacciones entre los polímeros y las especies acuáticas como lo

son enredos, estrangulación y asfixia al quedar sujetos a polímeros arrojados de gran tamaño en la mayoría de los casos y la peor interacción que se debe a la desnutrición, esto provocado por el consumo al no distinguir entre alimentos y microplásticos que se encuentran disueltos en el agua lo cual son ingeridos causando bloqueo en el estómago o el intestino.

Por medio de la figura 28 se recrea una afirmación que contempla que hacia el año 2050 habrá la misma cantidad de peces que plásticos en el mar.



Figura 28. Recreación del futuro hábitat marino²⁷.

Una variada gama de especies se ven afectadas desde pequeñas como plancton a grandes como las ballenas, siendo las pequeñas la que comienzan con la cadena trófica en la vida acuática lo que conlleva a impactar a las siguientes especies consumidoras y depredadoras; es aquí donde entra la gran encrucijada debido al consumo de recursos marinos por el hombre en su alimentación y si llegan a los estómagos o intestinos humanos. A parte del problema que conlleva la injerta de microplásticos debido a su presencia física; el contenido y las sustancias químicas tóxicas usadas en su fabricación que aun posee, lo cual pueden provocar grandes problemas en los seres vivos.

Se desconocen las implicaciones para la salud humana dado que existen muchas lagunas de conocimiento y por lo tanto se requiere más investigación en este aspecto, tal y como apunta Naciones Unidas²⁸, la teoría queda ejemplificada en la figura 29.

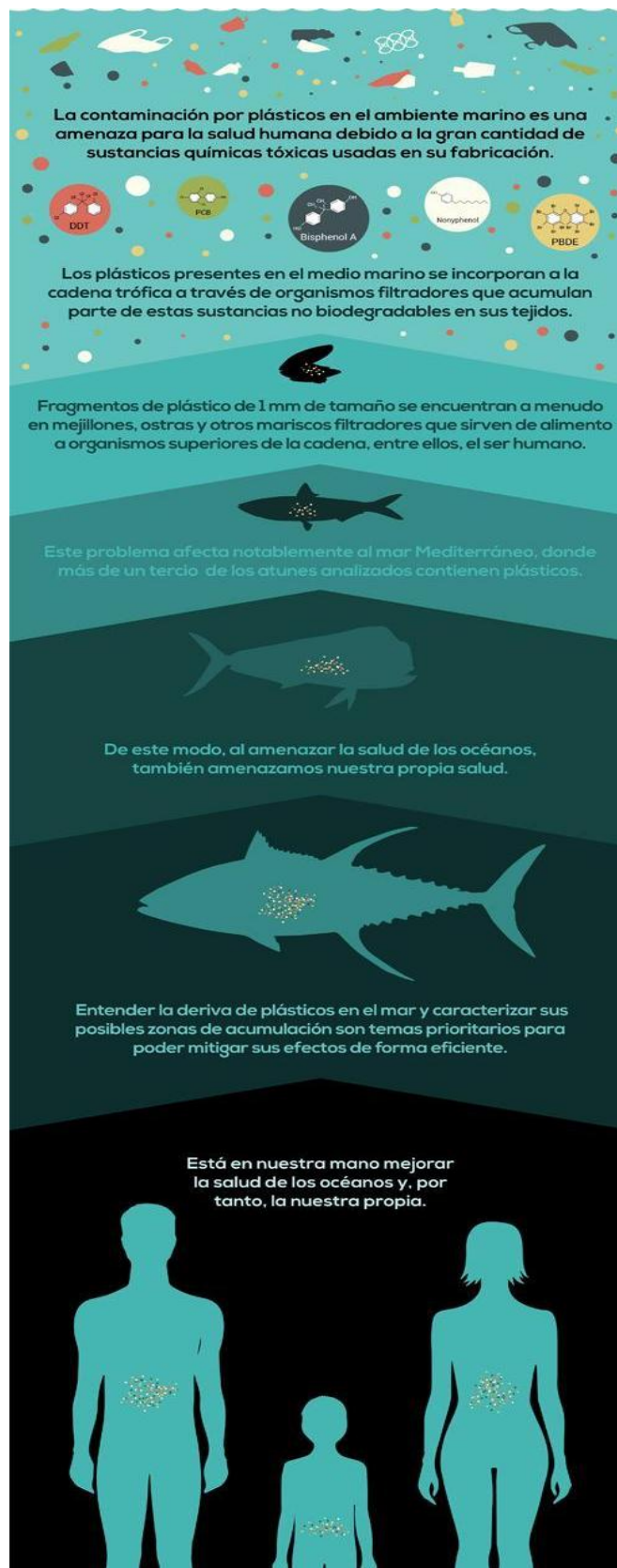


Figura 29. Efectos de los plásticos en la salud²⁹.

1.4.1.6 Nueva visión para los polímeros

Producto de la problemática respecto a los polímeros sintéticos es que se han inspeccionado alternativas para apaliar y salir de la línea de contaminación que se presenta hoy en día.

En primera instancia se presenta la recolección de los polímeros sintéticos liberados al medio ambiente para ir disminuyendo los daños que producen y producirán.

Y en segunda instancia esta la nueva visión de los polímeros sintéticos y varios productos más que llegan a ser residuo, que es la economía circular.

Economía circular de los polímeros sintéticos; esta nueva economía de los polímeros sintéticos estipula a que los plásticos nunca se vuelvan residuos; una vez utilizados estos se vuelven materia prima para un nuevo producto o se genere directamente un producto a partir del residuo. Conllevando a la eliminación del concepto de residuos y así asegurar que no se dispondrá de este de mala forma.

Así se genera una nueva forma de pensar, que presenta tres ambiciones principales detalladas a continuación³⁰, que se esquematiza a través de la figura 30:

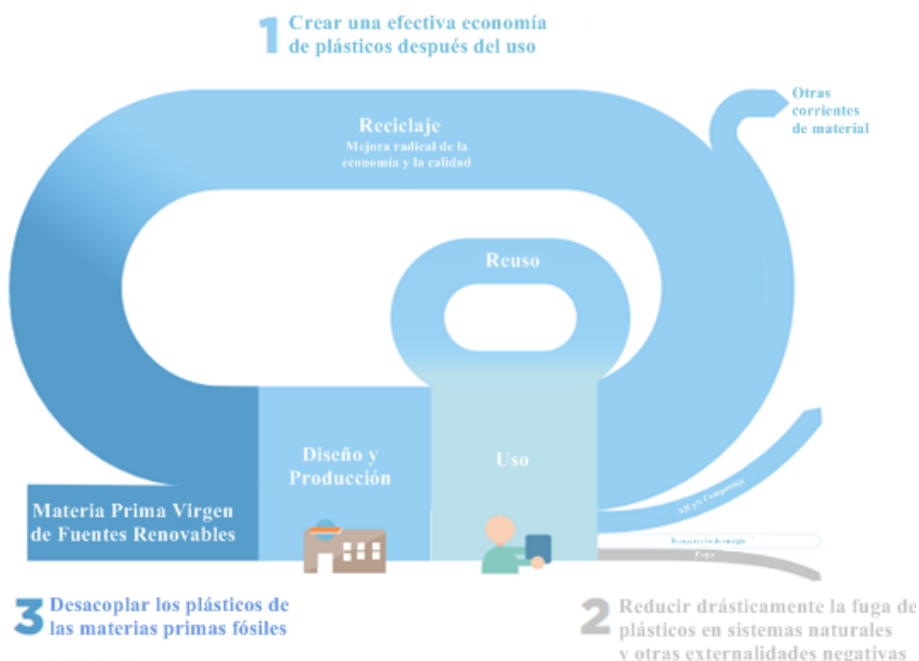


Figura 30. Ambiciones de la nueva economía de los plásticos³¹.

1. Crear una economía de plásticos posterior al uso eficaz que posee en primera instancia, a través de un mejoramiento de la economía y la aceptación de reciclaje, reutilización y

biodegradación controlada para aplicaciones específicas. Este es la piedra angular de la nueva economía de los plásticos y su primera prioridad.

2. Reducir drásticamente las fugas de plásticos en los sistemas naturales (en particular el océano) y otras externalidades negativas.
3. Separar los plásticos de las materias primas fósiles, además de reducir las pérdidas de ciclo y desmaterializar: explorar y adoptar materias primas de fuentes renovables.

Llevando en un futuro sin polímeros sintéticos en el medio ambiente, menor cantidad de ellos como residuos, menor consumo de materiales fósiles para su fabricación y optando por nuevas materias primas y solución de la problemática actual. Generando un ciclo continuo que optimice el uso de los recursos y reduzca las emisiones de carbono, aumentando la vida útil de los productos y el reciclaje.

1.4.1.7 Pilares de la Organización de las Naciones Unidas

El día 25 de septiembre del 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales en la agenda 2030 para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Se expusieron un total de 17 objetivos con metas específicas que se deben alcanzar en los próximos 15 años; comprometiendo a todo el planeta para ser parte de un buen logro, ya sean los gobiernos, el sector privado, la sociedad civil y personas individuales. A continuación a través de la figura 31 se muestran los 17 ODS propuesto por la ONU:



Figura 31. Objetivos de desarrollo sostenible.

Dentro de estos objetivos los que más recalcan la problemática del plástico son:

- Pilar 9 “Industria, innovación e infraestructura”. Este conlleva un desafío necesario en el desarrollar métodos de almacenamientos y reciclaje de los residuos producidos en diversos sectores industriales (agro-industrial en nuestro caso) par así disminuir la cantidad de residuo generado por ejemplo.
- Pilar 12 “Producción y consumo responsable”. A través del tiempo se ha ido implementando un sistema de producción y consumo; de explotar los recursos generando al mismo tiempo grandes cantidades de desperdicios, sin tener en cuenta un consumo adecuado y con ello una menor cantidad de residuos.

Este pilar es tan fundamental para generar un cambio en la utilización de los recursos de manera responsable tanto en su producción, consumo y generación del residuo. Este pilar se aplica a cualquier consumo de un producto, como lo es el consumo de plásticos en la producción agrícola de tomates, debido a esto es de vital importancia buscar una solución a los residuos generados.

- Pilar 14 “Vida submarina”. Este objetivo está enfocado en los océanos y la importancia que tienen ellos como lo son el albergar a las comunidades acuáticas, el control del clima y del oxígeno que respiramos. Por lo tanto es importante el cuidado de los mismos y que ellos no se llenen de contaminación como lo comentado anteriormente con los plásticos los cuales causan grandes problemas en los seres vivos que habitan en ellos.

1.4.2 Polímeros sintéticos a nivel país

La producción de residuos per-cápita en Chile al día es de 1,08 kilogramos del cual entre un 11% a 12% es de polímeros sintéticos destacándose envases de líquidos y comidas, bolsas y hasta el tetra pack. Del cual se estima que se recicla alrededor de 2%.

Al año entre 10 mil y 25 mil toneladas de ese desecho plástico son mal manejadas en Chile y tienen el potencial de terminar en el mar. Llegan desde la acuicultura, usuarios de playas y desde el interior, transportadas al mar a través de los ríos, y en el mundo sumaron entre 4,8 y 12,7 millones de toneladas en 2010³².

Desde el punto de vista de economía circular en Chile en un seminario organizado por Triciclos y la Fundación Ellen MacArthur en el año 2017 se concluyó que se tiene que generar un rediseño e innovación debido a que alrededor del 30% de los envases de plástico deberían desaparecer ya que nunca serán reutilizados o reciclados, con el impacto que esto conlleva en el medioambiente. Como también que el 20% de los envases de plástico deben dejar de ser desechables, cambiando así sus modelos de consumo, y el 50% restante requiere aumentar su tasa de reciclaje, esquematizado en la figura 32.

En lo que respecta a la contaminación de los océanos en el territorio marino chileno entre las islas de Pascua y Juan Fernández se está produciendo una “isla de plástico” que tiene una superficie superior al territorio de México.

Respecto a la normativa del país el día 6 de diciembre del 2018 se promulgo la Ley 20920³³ la cual establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del producto y fomento al reciclaje. Estableciendo en primera instancia la responsabilidad de los generadores y consumidores de seis productos prioritarios (aceites, electrónicos, baterías, neumáticos, pilas, envases y embalajes); destacando la debida gestión que se tiene que realizar.

A través de esta ley se ve la necesidad de la responsabilidad de los residuos generados en las industrias, si no se encuentran dentro de los seis producto prioritarios es porque se está comenzando en el ámbito de la exigencia, pero de igual forma se tiene que tener enfocado en la buenas disposiciones y la responsabilidad hacia los residuo generados.



Figura 32. Tres estrategias para transformar el mercado de envases plásticos³⁴.

Capítulo II. Antecedentes Generales

2.1 Identificación del problema

2.1.1 Producción de tomates en Limache

El tomate llamado *Solanumlycopersicum* es una planta anual y bianual, de origen centro y sudamericano, cultivada para consumo fresco e industrializado. Este puede ser cultivado en una alta gama de condiciones durante todo el año. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las heladas o el calor excesivo presente en las variaciones del clima pueden dificultar su buen desarrollo, especialmente en aquellos cultivos establecidos al aire libre.

En la actualidad el cultivo de tomate se visualiza bajo sistemas productivos diversos, como por ejemplo, bajo plástico de polietileno o bajo malla antiáfido. De esta forma se mantiene la oferta durante todo año con altas producciones³⁵.

En Chile se cultivan varios tipos de tomates entre los cuales destaca el tomate limachino, una planta herbácea bianual cultivada en la región de Valparaíso bajo el sistema de invernaderos compuestos por polímeros sintéticos. Es esta utilización de polímeros tanto en su cubierta como en otras indumentarias de la plantación lo que genera la problemática planteada en la presente memoria debido a que como la producción es bianual y los polímeros presentan un deterioro frente al uso debido de varios factores anteriormente nombrados; es que se generan grandes cantidades de residuos poliméricos a partir de este cultivo agrícola. En la figura 33 se aprecia de mejor manera la presencia de los polímeros sintéticos en la producción limachina.

La V región es la segunda productora con 876 hectáreas, representando el 17% de la producción nacional total³⁶. Concentrada en su mayoría en Quillota y Limache, donde se encuentra el 94% de la explotación del rubro, en su mayoría sobre la Reserva de la Biosfera La Campana- Peñuelas³⁷.

La plantación a estudio cuenta con una implementación de 100 [Ha] de cultivo que pertenece al 11.4% de la producción a nivel regional. Teniendo un total del 140 invernaderos para la cultivación de tomates.



Figura 33. Fotografías de producción de tomate en Limache³⁸.

2.1.2 Utilización de polímeros en la agricultura

- Acolchonado de suelos

Consiste en cubrir el suelo con un filme de plástico que sirve de barrera de separación entre el suelo y el ambiente. De esta manera se consigue un aumento de la temperatura que facilita el crecimiento rápido de la planta y una cosecha temprana, ya que el filme deja pasar la radiación infrarroja o calorífica y mantiene el calor durante la noche.

Se utiliza generalmente el polietileno de baja densidad principalmente por razones económicas.

Se consumen tanto incoloros como en color negro, opaco, transparente, gris y metalizado para conseguir diferentes efectos en el cultivo.

- Invernaderos

³⁸ Fuente Figura: Elaboración Propia

Su principal aplicación es en horticultura comestible y ornamental se utilizan láminas flexibles de PEAD, PVC, y EVA. En estructuras más rígidas se utiliza el poliéster, PVC y policarbonato.

- Envases y embalajes

Se utilizan los plásticos en formas muy variadas: filmes, bolsas, redes, embalajes alveolares para la colocación de frutas, cestitas, y también para contener líquidos. También como filmes flexibles se utilizan PE de alta y baja densidad, EVA, polipropileno, poliésteres lineales, poliamidas, PVC. Para la fabricación de mallas se utilizan PP y PE de alta y baja densidad. Para envases rígidos (cajas de frutas, cajones, pallets) se utilizan los mismos plásticos anteriores y además el poliestireno.

- Tuberías

Tres son las propiedades de los plásticos más apreciadas para su utilización como tuberías: el bajo coste, la gran resistencia que presentan a la corrosión y la poca pérdida de carga que ocasionan en los fluidos que transportan. La utilización de tuberías se ha incrementado como consecuencia de la aparición del riego por goteo que distribuye la tubería por todo el campo de cultivo para aproximarse a las raíces de las plantas. Utilizando fundamentalmente PVC.

2.1.3 Cantidades utilizadas de polímeros sintéticos

Dentro de los terrenos de cultivos se encuentra cada invernadero con sus respectivas medidas y en su interior contienen entre 5 a 9 camas en las cuales se da crecimiento a las plantas de tomates; a continuación por medio de la tabla 3 se dan a conocer las medidas respectivas.

Tabla 3. Medidas de la nave y camas del cultivo Limachino³⁹.

Detalle por Nave	
Largo Nave [m]	100-300
Ancho Nave [m]	25-50
Alto Nave [m]	3 a 5
Largo Camas [m]	90-290
Ancho Camas [m]	1 a 3

³⁹ Fuente Tabla: Elaboración Propia

Cada polímero sintético utilizado altamente se va degradando por factores como el uso, la luz ultravioleta o el clima lo que genera que tenga una determinada vida útil las cuales se detallan a través de la tabla 4 para cada polímero empleado:

Tabla 4. Durabilidad de los polímeros⁴⁰.

Durabilidad o Tiempo de recambio	
Plástico Cubierta	1-2 años
Plástico Camas	1 año
Cinta Gareta	2 veces al año
Cinta Riego	2 veces al año
Malla Sombra	1-2 años

Estas camas van conformando el invernadero en su interior al contener la planta en crecimiento como también la infraestructura de la nave que son construidos de matrices poliméricas cuantificadas en la siguiente tabla 5, además se muestran las cantidades de residuos generados a distintas fechas de acuerdo a su durabilidad que tienen cada una mencionadas en la tabla anterior; números que permiten dimensionar en cantidades métricas la gran cantidad de residuos generados por esta industria.

Tabla 5. Cantidad de polímeros utilizados y residuos generados⁴¹.

Plásticos Por Nave		Total Naves	Residuos al año	Residuos a los dos años
Plástico Cubierta naves [m²]	5000 - 15000	700000 - 2100000	0	700000 - 2100000
Plástico Cubierta camas [m²]	1500 - 6000	210000 - 840000	210000 - 840000	420000 - 1680000
Cinta Gareta [m]	8000 - 12000	1120000 - 1680000	2240000 - 3360000	4480000 - 6720000
Cinta de Riego [m]	2000 - 4000	280000 - 560000	560000 - 1120000	1120000 - 2240000
Malla sombra [m²]	4000-13000	600000-1800000	0	600000-1800000

2.2 Proyecto Plastitomate

La asociación de productores de tomate limachino llamada Weltun Mapu es una cooperativa de reciclaje y valorización de residuos agroindustriales y comunitarios, conformada por agricultores y profesionales ligados con la agricultura y el medio ambiente,

⁴⁰ Fuente Tabla: Elaboración Propia

⁴¹ Fuente Tabla: Elaboración Propia

la cual busca mediante el reciclaje y la valorización de residuos el desarrollo sostenible de la agricultura y comunidades.

Esta cooperativa presenta un proyecto que da el hincapié a la presente memoria para el reciclaje y valorización de los residuos agroindustriales llamado: Plastitomate que consta en el reciclaje fisicoquímico de alta eficacia para polímeros sintéticos. Diseño, valorización y aprovechamiento de residuos de la industria del tomate limachino; que va a gestionar de la mejor forma las cantidades de residuos anteriormente mencionados que produce la industria del tomate en la región de Valparaíso.

2.2.1 Objetivo del proyecto

En general la finalidad de este proyecto es realizar estudios científicos/técnicos para la valorización y reciclaje de residuos plásticos generados en la industria del tomate limachino para así producir una economía circular en base a los polímeros.

Este gran objetivo se pretende obtener a través de la validación y optimización experimentalmente del proceso y producto de reciclaje fisicoquímico de alta eficiencia, enfocado en los residuos de la matriz polimérica de la industria del tomate limachino y otras industrias agrícolas de alta manufactura que generan gran cantidad de desechos poliméricos no degradables.

A través de la búsqueda de la mejor solución para dar a la gestión de los residuos plásticos a continuación a través de los diagramas mostrados se contemplan como actualmente se utilizan los polímeros y posteriormente el manejo de los mismos que hace que el proceso sea un procedimiento lineal lo cual es la analogía a cambiar, esquematizados mediante las siguientes figuras⁴²:



Figura 34. Esquema general lineal.

⁴² Fuente Figuras desde la 34 a la 38. Elaboración propia.



Figura 35. Esquema lineal Polietileno.

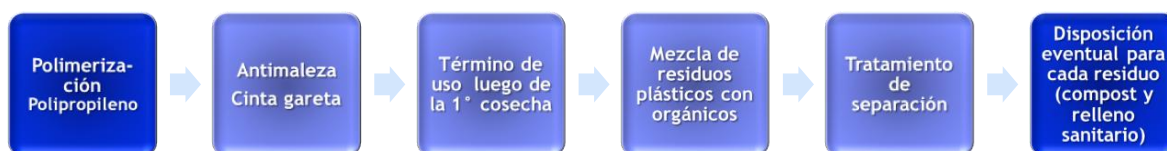


Figura 36. Esquema lineal Polipropileno.

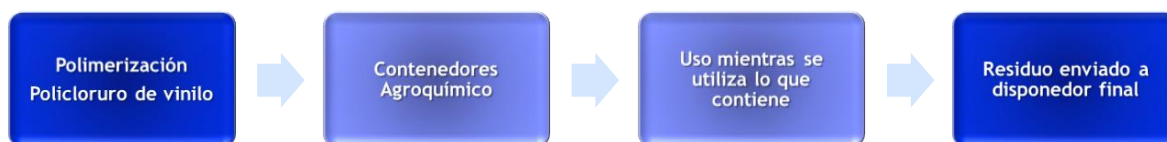


Figura 37. Esquema lineal Policloruro de vinilo.



Figura 38. Esquema lineal Poliestireno.

En todos los diagramas anteriores se ve reflejado la producción de un producto, su utilización y su disposición final como residuo. Lo que se quiere llegar a lograr es que los productos tengan una larga data de utilización y pos utilización lo que conlleva a que si después de su primera utilización ya no se pueden seguir usando como ese producto, estos sirvan como materia prima para crear nuevos, para así ir alargando el proceso y que en lo posible no llegar a que sea residuos. En la figura 39 se representa el proceso convergente que se quiere obtener al tener los polímeros ocupados en la agroindustria al terminar su vida útil, realizarles un proceso de gestión circular con el fin de crear un nuevo producto.



Figura 39. Esquema Convergente para la producción Limachina⁴³.

En la esta memoria se evaluarán los aspectos que se tienen que tener en cuenta para llevar el proceso circular de la regeneración de un buen producto y que este sea por ejemplo rentable entre otras cosas.

2.2.2. Objetivos específicos del proyecto

La forma de abordar el proyecto se divide en tres puntos que son básicamente:

1. Levantamiento de información para conocer el tema y investigar las posibles soluciones que se podrían realizar.
2. Realizar los apropiados estudios y pruebas para la solución buscada.
3. Ver el escalamiento que se podría tener a partir de lo desarrollado.

En la tabla 6 se aprecia con mayor detalle de la descripción realizada de os objetivos específicos del proyecto que son parte del diagrama de Gantt adjuntado en el Anexo 17.

⁴³ Fuente Figura: Esquema elaboración propia de soluciones.

Tabla 6. Objetivos planteados para el proyecto⁴⁴:

Nº Actividad	Nombre Actividad
OBJ. ESPECIFICO 1	INDUCCIÓN TÉCNICA DETALLADA EN RECICLAJE DE POLÍMEROS
1.0	Levantamiento de información científica
1.1	Planificación detallada métodos reciclaje
1.2	Diseño técnico de pruebas teóricas-experimentales
1.3	Estudio de mejoras y valorización de productos
1.4	Seguimiento Gestión Proyecto
OBJ. ESPECIFICO 2	DISEÑO DE SISTEMA MÉTODOS DE RECICLAJE
2.0	Estudios experimentales de solubilidad y miscibilidad química
2.1	Estudios experimentales de tratamientos físicos de reciclaje
2.2	Aplicación y estudio de la solución encontrada

2.2.3 Justificación e importancia del proyecto

Dentro de las justificaciones que contempla este proyecto recalcan:

- El desarrollo de un nuevo o significativamente mejorado producto.
- Pilotear un nuevo y mejor servicio a clientes ya sea del mercado local, nacional y/o internacional.
- Generar la solución a grandes cantidades de residuos y su disposición final.
- Creación y/o fortalecimiento de actividades de colaboración entre su empresa y otras empresas o entidades que ofrezcan soluciones tecnológicas de valor.

Contemplando la importancia que posee para la agroindustria en este caso y para cualquier generador de grandes cantidades de polímeros en un futuro lo que será la no generación de residuos y con ello realizar un buen manejo de los mismos, aportando así una materia prima para algún producto llevando consigo un ahorro ecológico; recordado lo importante que está siendo la buena gestión de los plásticos y de la responsabilidad de los generadores debido a lo que está hoy en día esa provocando el plástico en el mundo, como se ha comentado en el capítulo anterior, llevando así al medio ambiente un pequeño alivio.

2.2.4 Alcances del proyecto

Alcances que se quieren generar es:

- Situación mejorada respecto del manejo y acopio de matrices poliméricas de desechos generados por la agricultura de invernadero u otra que genere residuos no

⁴⁴ Fuente Tabla: Diagrama de Gantt elaborado por Claudio Gallardo.

degradables y altamente contaminantes por su volumen y difícil eliminación, implementación de procesos "green", amigables medioambientalmente,

- Obtención y revalorización de desecho en productos versátiles con diversas aplicaciones (bolo de reciclaje común), materia prima adaptable y con posterior uso en diversas aplicaciones (construcción, protección, transporte, construcción ornamental y otras).
- Ampliar el tipo de material/desecho para acopio y procesado común, flujos optimizados de manejo de residuos y nuevos productos, logística mejorada. Volumen mejorado, reducción y manejo del mismo, flujo residuos entre todos los actores involucrados.
- Economía circular del plástico de larga data y uso en aplicaciones de alta prioridad país, re-diseño y recomendaciones específicas en procesos, nuevos productos, materialidad, diseño de insumos, trabajo trasnacional, adopción, implementación y aplicación de I+D+ia (ia, innovación aplicada) al interior de la empresa.

Realizando un gran alcance de tipo ambiental, manejo sustentable de residuos, beneficios económicos de alta demanda en la actualidad del país y con aplicación multisectorial, implementación y validación nacional e internacional de sus procesos, obtención de certificaciones, crecimiento y credibilidad como cooperativa de reciclaje y revalorización, alineamiento con las políticas nacionales e internacionales sobre reciclaje y cuidado ambiental.

Capítulo III. Materiales y Métodos

3.1 Análisis de Solubilidad

Lo primero a realizar en este proyecto es analizar y correlacionar las diferentes matrices poliméricas provenientes de la industria del tomate limachino, proporcionados por la empresa Weltun Mapu, provenientes desde sus faenas de producción y cosecha. El objetivo inicial es realizar diferentes ensayos de solubilidad en solventes comunes y en otros más elaborados y sofisticados, para así, poder agrupar diversos tipos y fuentes de matrices poliméricas en un mismo proceso común (disolución química o extrucción física), obteniendo un ahorro de energía y tiempo, buscando una mejora significativa del estado actual, en el cual se aplican procesos de varias etapas.

Dentro de los parámetros críticos para el desarrollo de una eficiente metodología de reciclaje y valorización, se busca correlacionar los parámetros de solubilidad en un entorno común utilizando el mismo solvente (idealmente el más barato, abundante y poco contaminante que esté disponible).

Teóricamente, dicho proceso se obtiene a través de la determinación de la solubilidad de Hildebrand (δ) la cual, proporciona una estimación cuantitativa del grado de interacción entre materiales y solventes. Cuando existen materiales con valores de δ similares, estos tienden a ser miscibles entre sí y/o en un solvente común. A continuación, se detalla la formula mediante la cual se obtiene la solubilidad de Hildebrand:

$$\delta = \left(\frac{\Delta E}{V} \right)^{1/2} = \left(\frac{\Delta H - RT}{\frac{M}{\rho}} \right)^{1/2} [MPa]^{1/2}$$

Parámetros:

δ : Solubilidad de Hildebrand

ΔE : Energía de vaporización

V: Volumen molar

ΔH : Calor latente de vaporización

R: Constante de los gases

T: Temperatura

M: Masa molar

P: Densidad

Si bien el análisis de Hildebrand entrega una medida cuantitativa y muy precisa, requiere una alta cantidad de ensayos y de datos (algunos, ya reportados en tablas o que pueden ser estimados teóricamente, lo anterior, requeriría enormes esfuerzos experimentales de HH, reactivos, por lo cual será evaluado en una fase posterior, optándose por un análisis más cualitativo en función de los tiempos de la empresa y su producción y generación estacional de la materia prima de estudio.



Figura 40. Prueba quintuplicada de ensayos de solubilidad⁴⁵.

Efectuando pruebas preliminares sobre el comportamiento de diferentes polímeros en los solventes más accesibles (baratos y menor toxicidad). A fin de conocer el comportamiento

⁴⁵ Fuente Figura: Fotografía propia.

básico y sus respectivas miscibilidades comunes, para la formación de nuevas molduras o combinación de estas, así como una viabilidad plausible de combinar reciclaje secundario y terciario.

Lo anterior, permitirá:

- Ahorro de costes de separación.
- Ahorro de costes de clasificación.
- Ahorro de costes de almacenaje.

Considerando siempre un proceso convergente como se menciono con anterioridad debido a la simpleza, efectividad y eficiencia que este presenta frente a un proceso multietapa/lineal).

Tras experimentar y testear diversos solventes comunes para las matrices poliméricas disponibles, fueron obtenidos los siguientes datos preliminares expuestos en la tabla 4. En esta se recopilan los resultados de las pruebas de solubilidad preliminares de los diferentes polímeros frente a los solventes disponibles y utilizados.

Catalogando los resultados como:

SA= Solubilidad Alta

SB= Solubilidad Baja

SI= Solubilidad Infinita y/o Miscibilidad completa

SM= Solubilidad Media.

Tabla 7. Comparación y clasificación de solubilidades⁴⁶.

		Solventes				
Polímeros		S1	S2	S3	S4	S5
Cinta Gareta	PP	SB	SM	SB	SM	SB
Cinta Riego	LDPE	SB	SB	SM	SM	SB
Antimaleza	PP	SM	SM	SM	SM	SB
Malla Mosquitero	HDPE	SB	SB	SB	SB	SB
Cubierta Nave	PE	SM	SM	SB	SB	SB
Plumavit	PS	SI	SI	SM	SM	SA

⁴⁶Fuente Tabla: Elaboración propia de resultados.

Para algunas solubilidades se aprecia compatibilidad en solubilidad media y baja de varios polímeros de desecho para reciclaje, estos podrían ser combinaos entre sí, para efectuar un reciclaje conjunto combinando la modalidad de reciclaje secundaria (con moldeado de temperatura) y la modalidad de reciclaje terciaria con moldeado y dilución química (formando una solución tipo gel), lo anterior, facilitaría la forma final de moldeado y/o combinación del producto del reciclado con aditivos adecuados para obtener la aplicación/uso final de los residuos.

3.2 Estudio de Soluciones

Se comenza con la búsqueda y evaluaciones de las diversas alternativas y aplicaciones finales (revalorización de desechos) para las fuentes de residuos poliméricos provenientes de la agroindustria.

Considerando los polímeros presentes en estas fuentes (PP, PE, PVC y PS) se proyectan y planifican alternativas de uso y aplicaciones mostradas en la figura 41:

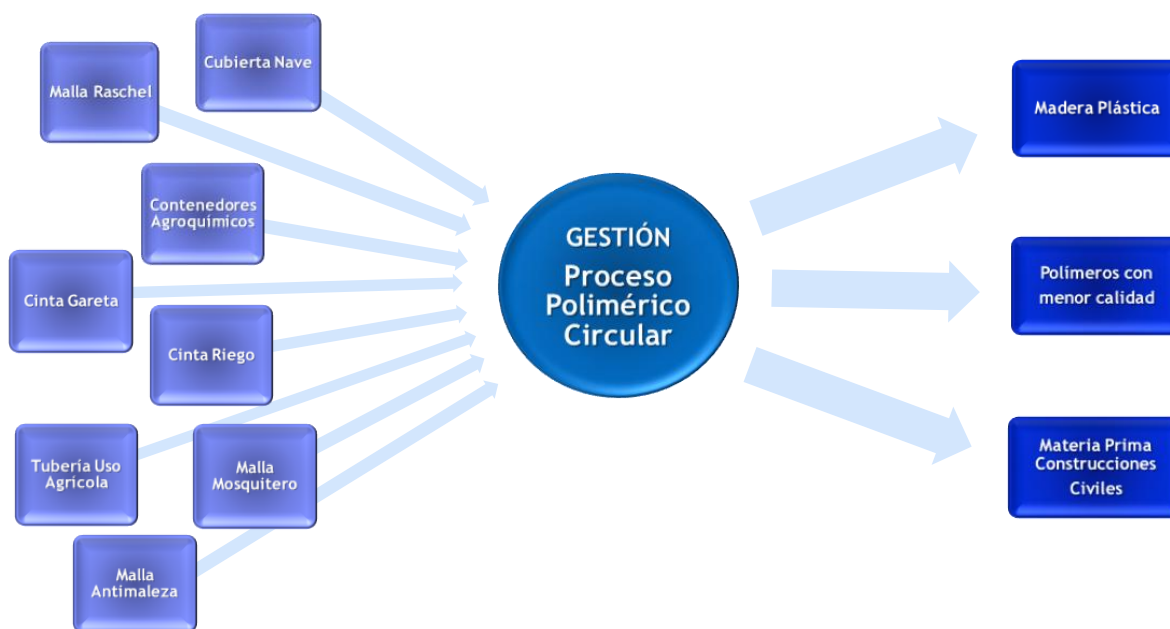


Figura 41. Diagrama convergente de soluciones⁴⁷.

⁴⁷ Fuente Figura: Elaboración Propia.

3.1.1 Madera Plástica

Los residuos urbanos están constituidos principalmente de los siguientes polímeros: polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad, polipropileno, polietileno de tereftalato, poliestireno y cloruro de polivinilo de los cuales se consideran para la producción de composites de madera plástica, lo anterior genera el interés de estudiar el proceso y aplicación debido a que se valorizan y aplican los mismos tipos de polímeros de la agroindustria, destacando además que esta aplicación y uso se enmarca en un problema de 300 MM USD/año⁴⁸.

WPC es un material confeccionado con subproductos de la madera (harina de madera) por ejemplo, el aserrín en combinación con matrices poliméricas entregan características de resistencia, impermeabilidad, antiparásitos entre otros; otorgando características y cualidades únicas y diferenciadoras para ser un buen material en: confeccionar fachadas, muebles de exterior, muelles, terrazas, entre otros; proveyendo una excelente y relevante revalorización de los productos utilizados.

Este reciclaje y revaloración de los materiales poliméricos ya se ha establecido hace unas décadas dentro de los cuales los mayores productores son América del Norte y China, con la presencia de varias fábricas en estos países, siendo Europa la tercera. El ritmo de desarrollo del mercado ha sido frenético destacando la producción de WPC se ha triplicado de 2010 a 2012⁴⁹.

Estas empresas han aprovechado esta alternativa para las construcciones modernas en concordancia con el auge a soluciones amigables, tanto por la opción de utilizar un residuo plástico (el cual ya está saturado en el planeta), como por la no utilización de madera virgen que provoca la deforestación y plantaciones de árboles artificiales, destacando la larga duración que poseen que es alrededor de 30 años. Trex es el mayor proveedor de madera plástica del mundo, compra un promedio de más de 227.000 [kg] de chatarra de plástico cada día⁵⁰.

A través de los estudios que se han realizado sobre la utilización de los polímeros reciclados para la confección de madera se presentan algunas falencias respecto al polímero virgen como lo es la inmisibilidad debido a los tipos de punto de fusión y menor calidad que presentan, lo que requiere la utilización de agentes de compatibilización, estas

propiedades (denominados aditivos de cohesión/dispersión) mejoran la adherencia interfacial entre los polímeros y la dispersión de componentes, pero esto genera costos extras que van a equilibrarse con posibles costos de separación o del material virgen. Otra gran diferencia presente es la reducción de peso molecular de los polímeros reciclados lo que puede causar la despolimerización y algunos de estos son propensos a la oxidación; debido a que cada uno presenta diferentes niveles de parámetros oxidativos lo que conlleva a necesitar diferentes tipos de antioxidantes⁵¹.

Por otro lado no se aprecian leves diferencias de comportamiento físico lo que hace que esta alternativa sea una muy buena solución a los polímeros reciclados pero sí que se requiere una debida separación previa, es decir comprar los pellets específicos, recalcando la falta de mayor investigación y utilización de mezclas de plástico reciclado en los composite de maderas plásticas.

3.1.2 Envases reciclados para protección y transporte de fruta

El mercado de las exportaciones de frutas del país es de gran importancia para la economía Chilena; su almacenamiento y posterior envío a diferentes países conlleva la necesidad de disponer de embalajes que presenten ciertas características y propiedades para su buen manejo, salubridad y conservación para llegar en condiciones óptimas al consumidor.

Un buen ejemplo radica en el empaquetado de frutas por lo general de menor tamaño y que debido a su composición presenten un mayor cuidado de almacenaje, como lo son los arándanos, frambuesas, uvas y frutillas, que utilizan recipientes plásticos donde el producto es encapsulado entre dos películas plásticas llamados clamshells los cuales se fabrican en su mayoría de polietileno de tereftalato o polipropileno, sellados con calor o con alta frecuencia para formar una especie de caja con cierres y orificios de aireación dependiente de los requisitos que posea cada conservación ideal de la fruta.

Al llegar a los mercados frutícolas internacionales el producto chileno es ampliamente valorado dependiendo del porcentaje de plástico reciclado que contiene el recipiente de fruta, en este caso los clamshells. Debido a esta valoración del producto nacional ha caído en la necesidad de importar⁵² residuos plásticos para su reciclaje y posterior elaboración de clamshells, ya que en Chile no se logra obtener a tal escala ese reciclaje.

En general en la actualidad para la confección de envases reciclados se importan varios millones de envases/año como pellets. Siendo nicho de mercado de 150MM USD/año⁵³ el proveer la materia prima (pellets o emulsión) desde el acopio y/o confección de productos básico terminado.

3.1.3 Hormigón ligero para aceras, veredas y fachadas

Respecto del hormigón mezclado, se han realizado algunas investigaciones y puestas en marcha destacando en su mayoría los residuos poliméricos modificados químicamente; es decir los polímeros en forma de lechada, resinas o aditivos para realizar una mezcla de hormigón de manera más uniforme y eficiente. Como también se ha estudiado las mezclas de en general de PET en diferentes proporciones con arena fina y grava para estudiar el comportamiento de este frente a los porcentajes de agregación del residuo.

En general, los estudios en los que ya se han investigado sobre este tipo de mezclas se concentran en pruebas y ensayos en el ámbito civil de⁵⁴:

- Resistencias y durabilidad
- Fraguado
- Ensayos de consistencia, densidad, resistencias a compresión y flexo-tracción
- Conductividad térmica

Y por ello se concluye que debido al bajo costo y la tecnología simple que se presenta al utilizar este material se hace es muy recomendable para viviendas, aceras, veredas, entre otras. Destacándose que en la actualidad no hay mayores conocimientos y estudios enfocados al comportamiento de mezclas de polímeros y que en general estos se utilizan de modo de lechada, es decir que se realiza un proceso químico homogéneo de polímeros para convertirlos nuevamente a líquido (una pasta moldeable para ocuparla en lo que se requiera).

Respecto al comportamiento físico tienen buena resistencia, conductividad y fraguado con respecto al hormigón o concreto y en relación al los ensayos civiles estos presentan una disminución en el comportamiento entre mas porcentaje de plástico se agregara.

Finalmente se plantea en la generación de emulsiones y fibras estructurales de polímeros reciclados para mejorar propiedades de uso y resistencia en aceras, veredas y fachadas

exteriores. Esta opción desde el punto de vista comercial apunta a un mercado de más 1000MM USD/año precio obtenido al contemplar la tabla 8 que muestra la enorme inversión anual que debería efectuar la cámara chilena de la construcción por mantención y reposición de veredas, aceras y símiles, ya que la demanda y mejora de materiales de construcción de alto tráfico, sometidos a carga intensa de uso (no de esfuerzo), es muy relevante a la actualidad país.

Tabla 8. Inversión necesaria para reparar y mantener aceras, veredas y calles en Chile (MMUS\$)⁵⁵.

Ciudad	Costo de reposición de veredas regulares y malas	Costo reposición vialidad regular y mala	Total costo de reposición
Arica	10,6	19,5	30,1
Iquique	20,5	37,7	58,2
Antofagasta	19,7	123,7	143,4
Copiapó	11,8	21,8	33,6
La Serena	34,5	52,3	86,8
Valparaíso	125,0	254,8	379,8
Santiago	541,4	745,1	1.286,5
Rancagua	22,3	40,9	63,2
Talca	25,2	46,4	71,6
Concepción	62,9	219,3	282,2
Temuco	31,8	77,8	109,6
Valdivia	15,2	27,9	43,1
Puerto Montt	20,0	71,8	91,8
Coyhaique	7,1	13,0	20,0
Punta Arenas	15,1	27,8	42,8
Total	963,1	1.779,8	2.742,7

3.1.4 Solución a seguir

Al tener en cuenta estas tres alternativas para realizar la revalorización de los residuos poliméricos limachinos y contemplar los ensayos preliminares de solubilidad que se efectuaron: estos muestran que los diferentes tipos de polímeros reaccionan de manera similar frente a algunos solventes(solubilidad media); produciéndose una ventaja comparativa al generar un nuevo intermedio basándose en la posibilidad de no realizar ningún tipo de clasificado y separación entre ellos (como en la industria actual), es decir los polímeros utilizados en la agricultura solo tendrían que pasar por un proceso de reducción

física pero se utilizarían como una mezcla de polímeros; generando una eficiencia en el proceso y un ahorro tanto energético como económico (reciclaje convergente).

Respecto a la primera opción, la madera plástica es algo que se realiza hace unas décadas, mercados de alto calibre mundial como las potencias de Estados Unidos y China incursionan en este ámbito en gran medida entregando valores a los cuales no se pueden competir. Cabe mencionar que la WPC es entre 3-5 veces más costosa que la madera normal pero sus cualidades y el nuevo desafío de arquitectura moderna ecológica hacen de este un buen surgimiento por lo mismo que ya tiene vasta inserción en el mercado, Chile ya exporta a través de empresas como Dreck este tipo de material⁵⁶.

El hecho de importar alrededor de 15mil [ton] anuales en el año 2014 de PET reciclado a Chile fue una de las motivaciones iniciales a la idea propuesta para los contenedores de frutas, pero este mercado solo consume un tipo polímero en mayor cantidad y sin disponer de este como materia prima en la agroindustria tomatera , seria buscar solución a algo que no se dispone como residuo, también es un mercado que ya se ha asentado y claramente presenta poco incentivo al reciclaje de PET en el país, debido a la necesidad de importación mayormente.

Finalmente tenemos el hormigón con polímeros, al observar las alternativas de producto final y prospecciones de mercado, como lo es la alternativa de utilizarlo para el mejoramiento de aceras y veredas en Chile, esta idea resulta ser muy atractiva ambiental y financieramente, ya que genera un impacto ambiental positivo debido a su mayor data de uso en el tiempo y que las matrices poliméricas a utilizar son variadas y diversas no restringiéndose a una en particular, promoviendo un reciclaje y revalorización convergente. Recalcando de acuerdo a los resultados en otras investigaciones que se han realizado, que estas unidades poliméricas dan resultados físicos favorables de acuerdo a la degradación, erosión, resistencia e impermeabilidad, por ejemplo, abaratando costos y prolongando la duración de aceras y veredas las cuales sufren daños y se necesitan del recambio o nuevas de ellas diariamente.

Provee una alternativa tentadora dado que es una solución de economía circular; el convertir a un residuo en un producto de larga data, generando a este un alto valor ecológico dado que elimina cantidades de plásticos en el ambiente y promete una nueva

alternativa al reciclaje de polímeros debido a que se estima la utilización de una mezcla de ellos, que se podrían utilizar a gran nivel, es decir no solo las agroindustrias o industrias sino que también los residuos domiciliarios, cambiando así el concepto del residuo plástico.

3.3 Hormigón con Polímeros

3.3.1 Plan de ejecución

Al definirse la solución a seguir se replantean los tiempos y las etapas que se comenzaran a tomar acorde de la investigación y el estudio del hormigón con polímeros, desarrollándose también una nueva carta Gantt (Anexo 17)

Las etapas para este proceso son las siguientes:

- Estudio y Análisis Reciclaje Polimérico-Cemento-Hormigón.
- Screening experimental y pruebas de ensayo estructurales del composite/mezcla REPOLGON.
- Validación externa, Protección intelectual de invención (proceso/producto), layout de planta piloto del proceso REPOLGON.

De los cuales solo se realizaran los dos primeros dejando la última etapa como un vínculo directo a otro proyecto futuro alineado a lo investigado en este. En el anexo antes mencionado se detallan los puntos de forma más completa, las actividades a realizar y los resultados que se esperan obtener.

3.3.2 Materia Prima

Existen dos alternativas a generar de acuerdo a lo investigado a través del hormigón con polímeros reciclados que son el hormigón para aislación o el hormigón estructural para utilizar en forma de ladrillos, en aceras o veredas, entre otros. Es por ello que se quiere realizar diferentes tipos de ensayos y pruebas del ámbito civil para obtener el mejor comportamiento de acuerdo al mayor nivel de plástico a poder reutilizar; estos trabajos se desarrollan en el laboratorio DICTUC y ensayos externos en LEMCO.

Las pruebas y ensayos a realizar son los siguientes:

- Reología
- Densidad aparente y relativa

- Índice de porosidad
- Conductividad térmica (calor específico y difusividad térmica)
- Módulo de elasticidad
- Flexo-tracción
- Compresión

Para los estudios se coordinó con una recicladora llamada Plasper para proporcionar el plástico necesario para realizar las muestras. Obteniéndose dos tipos de plástico reciclado, uno de reciclado de PVC (figura 42) y otro hecho con carbono (figura 43); ambos gránulos con un diámetro de 4 [mm].



Figura 42. Polímero reciclado de PVC⁵⁷.



Figura 43. Polímero reciclado de carbono⁵⁸.

⁵⁷Fuente Figura: Elaboración Propia.

⁵⁸Fuente Figura: Elaboración Propia.

3.3.3 Preparación de la muestra y Equipos utilizados

Se decide realizar las pruebas como se menciona anteriormente con diferentes cantidades de porcentajes de polímeros mezclados para observar lo que ocurre al tener cantidades mayoritarias de plástico. Por lo que se opta por 5 tipos de probetas de mortero, con agregados de plástico reciclado de PVC de 0%, 10%, 25%, 50% y 70%, y con 2 tipos más de probetas con agregado de plástico reciclado con contenido de carbono en dosificaciones de 25% y 70%.

Luego de tener la materia prima a investigar se utilizan moldes metálicos y de poliestireno expandido para la fabricación de las probetas prismáticas, 42 probetas (seis por cada dosificación) de dimensiones de 40 x 40 x 160 [mm] y 14 probetas (dos por cada dosificación) de 40 x 150 x 150 [mm], para las dosificaciones de 0%, 10%, 25%, 50%, 70% de plástico reciclado de PVC y dos últimas con 25% y 70% de plástico reciclado con contenido de carbono, respectivamente este porcentaje es el reemplazo en la mezcla de árido de arena por los gránulos de plástico reciclado de tamaño a partir de 2 [mm] con cemento portland para la fabricación de las probetas descritas (Anexo 2).

Se añade a la mezcla, diluido en agua, un aditivo fluidificante para hacer la mezcla más manejable, en cantidades del 1% del cemento. La dosificación del mortero se establece de 1:3 y la relación cemento agua varía según las dosificaciones de plástico, ya que con el aumento del porcentaje del plástico reciclado, hay menos árido que absorba agua y por tanto queda más agua en la mezcla. Entonces para que este mortero tenga una consistencia adecuada se disminuye la cantidad de agua con cada aumento de plástico. Para las dosificaciones de plástico mencionadas de 0%, 10%, 25%, 50% y 70% se utiliza un coeficiente de 0.52, 0.51, 0.50, 0.48 y 0.47 respectivamente.

Luego de mezclar el cemento con el árido se lleva a amasar el material a la máquina amasadora. Una vez finalizado este proceso es el momento de realizar las pruebas de consistencia a través de ensayos de reología y de densidad aparente de las probetas, para asegurar que tenga las características adecuadas.

Una vez fabricadas las probetas con las que se realizan los ensayos del mortero, se procede a hacer bloques de este mortero aligerado utilizando una bloquera para generar 3 bloques del mismo tipo para cada dosificación, de 25%, 50% y 70% de gránulos de plástico

reciclado de PVC con dimensiones de 20 [cm] x 13 [cm] x 13[cm]. La relación de cemento y árido fue de 1:3, utilizando la misma arena fina de antes y sin fluidificante. La relación agua cemento para las dosificaciones mencionadas fue de 0.55, 0.51 y 0.49 respectivamente. Haciendo aproximadamente 16 [kg] de mezcla, por cada dosificación, por lo que se utiliza una hormigonera, debido a la cantidad a mezclar. Una vez confeccionados los bloques del tipo como se muestra en la figura 44, son llevados a la cámara para que sequen y luego poder estudiarlos.



Figura 44. Bloques listos⁶⁰.

Una vez transcurridos 28 días en los que se dejan las probetas secando y fraguando en la cámara húmeda, se procede a realizar los ensayos pertinentes, para determinar las características y comportamientos de este material de mortero con plástico, y así, poder plantear los distintos usos para cada mortero de diferentes dosificaciones de gránulos de plástico reciclado.

3.3.4 Metodología: Ensayos Civiles

La realización de ensayos proviene íntegramente del hecho de comprobar la veracidad de las propiedades que se desean obtener con la adición de polímeros reciclados y tratados en un hormigón de uso habitual, ver como ese se comporta y cuál es la mejor aleación que se puede utilizar.

3.3.4.1 Ensayo de Reología

El ensayo reológico se lleva a cabo para la comprobación de la consistencia de la mezcla realizada entre cemento, arcilla y polímeros en sus diferentes porcentajes.

⁶⁰ Fuente Figura: Elaboración Propia.

El primer ensayo que se llevara a cabo es a través de la mesa de sacudidas; con este método se pretende obtener un valor de escurrimiento que determinara la consistencia del producto ensayado. Se determina que este valor de escurrimiento sea de 15cm, dado que con este valor se consigue una consistencia plástica que permite una trabajabilidad adecuada del producto, como se ilustra en la figura 45.

Se utiliza un molde troncocónico lubricado por dentro con un aceite desencofrante sin resinas, el cual luego es llenado con la mezcla. Una vez llenado, se retira el aro superior y se enrasa el mortero al molde, quitando el exceso de material. Luego se desenmolda la mezcla y se deja intacta durante 15 segundos, para luego dar 15 golpes con la mesa de sacudidas en 15 segundos más. A medida que se van produciendo las sacudidas, el mortero se irá asentando, esparciéndose por la mesa de sacudidas en forma de circunferencia. Una vez terminados los golpes, se toman las medidas del diámetro de escurrimiento, en dos direcciones (perpendicularmente opuestos), con un pie de rey calibrado, para luego sacar la media aritmética en milímetros y obtener el resultado final de escurrimiento.



Figura 45. Mortero en la mesa de sacudidas⁶¹.

3.3.4.2 Ensayo de Densidad Aparente

La realización del ensayo de densidad aparente del material se obtiene a través de un molde cilíndrico con capacidad de 1 [l], la mesa de sacudidas y una báscula con sensibilidad de 0.1 [g]. Primero se llena a la mitad y se lleva a la mesa de sacudidas para dar 10 golpes en 10 segundos para compactar la mezcla. Luego se termina de llenar enrasando la mezcla al molde y se golpea 10 veces más. Posteriormente se lleva a la báscula para pesar el

⁶¹Fuente Figura: Elaboración Propia.

contenido de mortero de 1 [l], conociendo el peso del recipiente. Una vez que se obtienen los datos, se continua llenando los encofrados para las probetas, teniendo dos moldes de 3 muestras cada uno (40 x 40 x 160 [mm]) y dos moldes de forma cuadrada (40 x 150 x 150 [mm]), como se ve en la figura 46. Estos moldes se llevan a una cámara para que fragüen durante 24 horas dentro del molde, para luego retirar los moldes y dejar secar por 27 días más.

Las densidades de los áridos se pesan posteriormente para tener la idea de lo que se está reemplazando en la mezcla de mortero, ya que el cambio es por volumen, lo que resultaría en un menor peso de la mezcla para un mismo volumen.

Luego se comparan los resultados obtenidos para la consistencia del material resultante, el valor de escurrimiento y la densidad aparente de cada mezcla entre cada muestra con dosificaciones diferentes de plástico reciclado (de PVC y de contenido de carbono) en la mezcla y con el mortero convencional, (la mezcla con 0% de plástico reciclado).



Figura 46. Probeta en la mesa en la mesa de sacudidas⁶².

3.3.4.3 Ensayo Densidad Aparente y Relativa e Índice de porosidad

Para llevar a cabo este ensayo se utiliza una campana de vacío con sistema de llenado de agua desmineralizada y conectada a un vacuómetro, además se usa una bomba de vacío y una báscula con sensibilidad de 0.01 [g] y pesa hidrostática (figura 47). Se utilizan dos piezas por cada mezcla de mortero⁶³.

⁶²Fuente Figura: Elaboración Propia.



Figura 47. Equipo para el ensayo de densidad aparente y relativa e índice de porosidad⁶⁴.

Primero se procede a pesar las muestras para obtener el peso seco y luego son introducidas en la campana de vacío, en dos niveles, separadas por una malla. Se activa la bomba de vacío, la cual permite crear una depresión atmosférica de hasta 8 [mbar] en la campana. Se mantiene así por el período de dos horas, para poder llegar a esta depresión, y una vez transcurrido ese tiempo se activa el sistema de llenado de agua, el cual inunda los dos niveles de muestras lentamente. Este llenado dura aproximadamente 40 minutos. Luego de que el agua cubre por completo las muestras, se cierra el agua y se deja la bomba funcionando por 2.5 horas con las piezas dentro del agua. Con este sistema se consigue eliminar el aire que existe en la red porosa accesible, de tal manera que se pueda llenar de agua completamente. Esto sirve para determinar la densidad aparente y relativa y el índice de porosidad.

3.3.4.4 Ensayo de Conductividad Térmica

Para la obtención de las conductividades térmicas del material estudiado se toman las dos probetas creadas de 40 x 150 x 150 [mm] en conjunto con el equipo de medida de propiedades térmicas portátil, modelo Quickline-30 de la casa Anter Corporation.

Primero se coloca el sensor sobre la cara más plana de la probeta y esta a su vez se apoya sobre un soporte para no tocar el suelo. Una a una el sensor térmico va tomando las medidas de cada muestra en el rango de tiempo de 10 a 15 minutos (figura 48). Pudiendo así obtener medidas de: coeficiente de conductividad térmica (λ), calor específico (c_p) y difusividad térmica (α).

⁶⁴Fuente Figura: Elaboración Propia.



Figura 48. Equipo para la medición de conductividad térmica⁶⁵.

3.3.4.5 Ensayo de Modulo de Elasticidad

En este análisis se realizan pruebas mediante frecuencia de ondas sonoras producidas por un impulso que mide la elasticidad del material para así obtener el módulo de elasticidad (MOE).

En un comienzo, se procede a secar las probetas de 40 x 40 x 160 [mm] en un horno a 50 [°C] por tres días para que no estén húmedas; luego de haber estado en la cámara húmeda fraguando. Posteriormente se realiza el ensayo que permite la determinación del módulo de elasticidad de las probetas mediante la determinación de la velocidad de ondas sonoras provocadas por un impulso. Se analizan las muestras con un software determinado, el cual percibe todas las perturbaciones mecánicas producidas con un pequeño martillo de madera con la ayuda de un micrófono (de rango de frecuencias de 20 [Hz] a 20 [KHz] y sensibilidad 60 +/- 3 [dB] e impedancia de 600 [Ohm]), conectado al ordenador. Este micrófono indica la frecuencia de resonancia fundamental. Las probetas se apoyan sobre unos soportes de poliestireno extruido, de 35 [kg/m³], de sección triangular, medidos con un pie de rey a 36.18 [mm] de los bordes. Se toman medidas con el pie de rey, de las cuatro longitudes de cada probeta y dos espesores de cada cara. Luego se realizan pequeños golpes en tres caras de las probetas, en el lado llamado “A” siendo la cara de canto (sentido longitudinal), luego en la cara lateral superior “B” y finalmente en la cara lateral opuesta “C” (sentido transversal). Se anotan los resultados arrojados por el micrófono y el software⁶⁶ (figura 49).

⁶⁵Fuente Figura: Elaboración Propia.

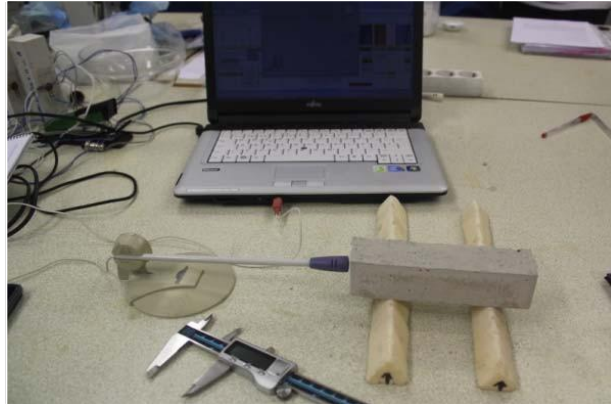


Figura 49. Equipo para el ensayo MOE⁶⁷.

Luego se realiza el ensayo de ultrasonidos, también para conocer el módulo de elasticidad de las probetas según la trayectoria de la propagación de las ondas de ultrasonidos. Se realiza este ensayo para poder corroborar datos ya que el mortero es un material heterogéneo y existe una alta probabilidad de error al obtener los datos.

Al procesar las ondas de ultrasonido se conoce su propagación en el interior y así se puede conocer si el material posee discontinuidades (ya que estas generan resistencias, y a mayores discontinuidades mayor será el tiempo de propagación de ultrasonidos). Así se puede detectar si el material es poroso o sólido. El módulo de Young es calculado en función de la longitud de la probeta y la velocidad de onda. Según la velocidad de la onda, la distancia recorrida por este, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$s = \frac{V \cdot T}{2}$$

Donde:

s = Espesor

V = Velocidad del sonido en el material

T = Tiempo

Para este ensayo se utiliza el equipo de ultrasonidos de la marca Matest. Primero se colocan en cada uno de los cantos de cada probeta un emisor y un receptor de ondas de ultrasonido,

⁶⁷Fuente Figura: Elaboración Propia.

aplicando un gel de pH neutro en las dos caras de la probeta para un mejor contacto, como se ve en la figura 50. Lo que permite calcular la velocidad de propagación de ultrasonidos y así obtener el MOE del sentido longitudinal de la mezcla a través la siguiente fórmula:

$$MOE_{us} = \frac{\rho (1 + \mu) (1 - 2\mu) v_{us}^2}{(1 - \mu)}$$

Donde:

ρ = Densidad

v_{us} = Velocidad de paso de ultrasonido

μ = Coeficiente de Poisson

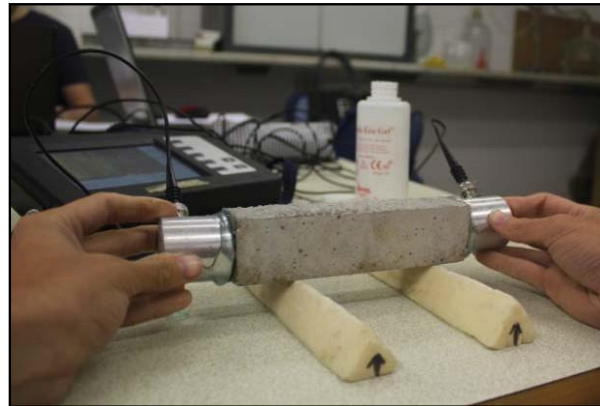


Figura 50. Ensayo de ultrasonido para conocer el módulo de elasticidad⁶⁸.

3.3.4.6 Ensayo de Flexo-tracción

El ensayo de Flexo-tracción se enfoca en someter a una deformación plástica a una probeta recta de sección plana, circular o poligonal, mediante el pliegue de ésta, sin inversión en su sentido de flexión, sobre un radio al que se le aplica una carga constante.

Para la realización de este ensayo se tienen seis probetas prismáticas de cada dosificación en la máquina de flexo-tracción de la casa Wykeham Farrance (figura 51), con células de carga máxima en este caso de 5.000 [kg]. Esta máquina se conecta a un display digital que registra las cargas máximas. La velocidad de carga se programa para que sea entre 10 [N/s] - 30 [N/s] y se coloca cada probeta centrada con la carga y luego se baja el pistón de

⁶⁸Fuente Figura: Elaboración Propia.

manera manual hasta que quede a ras de esta⁶⁹. Luego se tara a cero en el display para poder comenzar, y se procede a aplicar carga como se puede observar en la figura 52.



Figura 51. Ensayo de Flexo tracción⁷⁰.



Figura 52. Probeta para ensayo⁷¹.

Cuando dicha velocidad se ha llegado a un desplazamiento de 0.5 [mm], es decir, la prefisura, se detiene el ensayo para cambiar de nuevo la velocidad que se mantiene hasta el fin del ensaye. Aproximadamente, el ensayo de flexotracción posee una duración de 45 minutos.

Finalmente, los resultados obtenidos, al ser registrados por medio de un captador de desplazamiento, son recopilados y comparados para la investigación.

⁷⁰Fuente Figura: Elaboración Propia.

⁷¹Fuente Figura: Elaboración Propia.

3.3.4.7 Ensayo de Compresión

El ensayo de Compresión tiene como principal función la medida de la calidad estructural del hormigón, donde se determina la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión; este ensayo se realiza principalmente en metales, hormigones o cualquier otro material que se desee muestrear⁷².

Para realizar dicho ensaye, se deberá ejecutar mediante una probeta cilíndrica, con dimensiones normadas, curada por 28 días antes de la realización de su postura, para así homologar las condiciones donde el hormigón alcanza su máxima resistencia teórica y así obtener un resultado, acorde a la realidad. Es por ello de forma esencial, el realizar dicho procedimiento mediante una probetas de hormigón con la adición de polímeros y sin la adición de este elemento, siendo estas muestras realizadas en el mismo periodo de tiempo, pues se podrá verificar in situ la variación de resultados obtenidos por ambas mezclas⁷³.

Se utiliza una prensa diferente que la del ensayo de flexo-tracción, también de la casa Wykeham Farrance. A esta prensa se le coloca una célula de carga máxima de 10.000 [kg]. Se conecta un display digital que registra las cargas máximas. La velocidad de carga se programa para que sea entre 10 [N/s] - 50 [N/s]. El pistón tiene el mismo ancho que el de las probetas utilizadas, y estas se colocan centradas con respecto a esta superficie, como se aprecia en la figura 53. Primero se baja el pistón de manera manual hasta que este toque la probeta, sin carga, y luego se tara a cero en el display para poder comenzar el ensayo. Se inicia el ensayo, aplicando la carga y cuando la probeta supera su límite elástico el display recoge la carga máxima (figura 54)⁷⁴. Finalizado el proceso, se registra la máxima carga alcanzada por la muestra.



Figura 53. Probeta en la puesta de ensaye⁷⁵.



Figura 54. Probeta tras su fractura⁷⁶.

Una vez registrados los resultados de todas las muestras ensayadas, se podrá obtener la máxima carga promedio que puede resistir la mezcla de hormigón presentada en probetas para así finalmente analizar los resultados obtenidos.

⁷⁵Fuente Figura: Elaboración Propia.

⁷⁶Fuente Figura: Elaboración Propia.

Capítulo IV. Resultados y discusión

Tras realizarse los ensayos descritos anteriormente, se analizan las siete mezclas de dosificaciones de plástico reciclado de PVC: 0%, 10%, 25%, 50% y 70% y de plástico con contenido de carbono: 25% y 70%. Lo que cabe destacar que durante la realización de los ensayos; los bloques que tuvieron mayores problemas para producirse fueron los de contenido de plástico reciclado de 70%, ya que no conseguía mantenerse compacto como los demás.

A continuación se exponen los datos obtenidos en la campaña experimental (en Anexo 2 se observan con mayor detalle: gráficos, otros experimentos y resultados obtenidos).

4.1 Resultados de Reología

Para las pruebas de Reología se obtienen valores de escurrimiento de 15[cm] con pequeñas variaciones expuestas en la tabla 9 para cada mezcla realizada, para que el hormigón presente una consistencia plástica, algo fluida, de cierta docilidad y trabajable.

Tabla 9. Resultados del valor de escurrimiento de mezcla⁷⁷.

Dosificaciones de plástico reciclado	De PVC					De Carbono	
	0%	10%	25%	50%	70%	25%	70%
Valor de escurrimiento [mm]	151,86	149,24	153,36	152,17	154,61	152,32	153,85

4.2 Resultados Densidad Aparente

Los resultados de los datos de densidad aparente se ven reflejados en la tabla 10. Se puede apreciar que para las mezclas con PVC la densidad aparente tiene un comportamiento lineal decreciente a medida que aumenta el porcentaje de PVC. En cambio, en el caso del plástico con carbono, al ser este un material pesado no aligera el peso, por el contrario, lo aumenta.

Tabla 10. Resultados de densidad aparente (kg/m³) de mezcla⁷⁸.

Dosificaciones de plástico reciclado	De PVC					De carbono	
	0%	10%	25%	50%	70%	25%	70%
Densidad aparente [kg/m ³]	2337,37	2187,14	2001,29	1889,44	1782,58	2086,47	2134,12

⁷⁷Fuente Tabla: Elaboración propia.

⁷⁸Fuente Tabla: Elaboración propia.

De forma gráfica también se muestran los resultados a través de la figura 55.

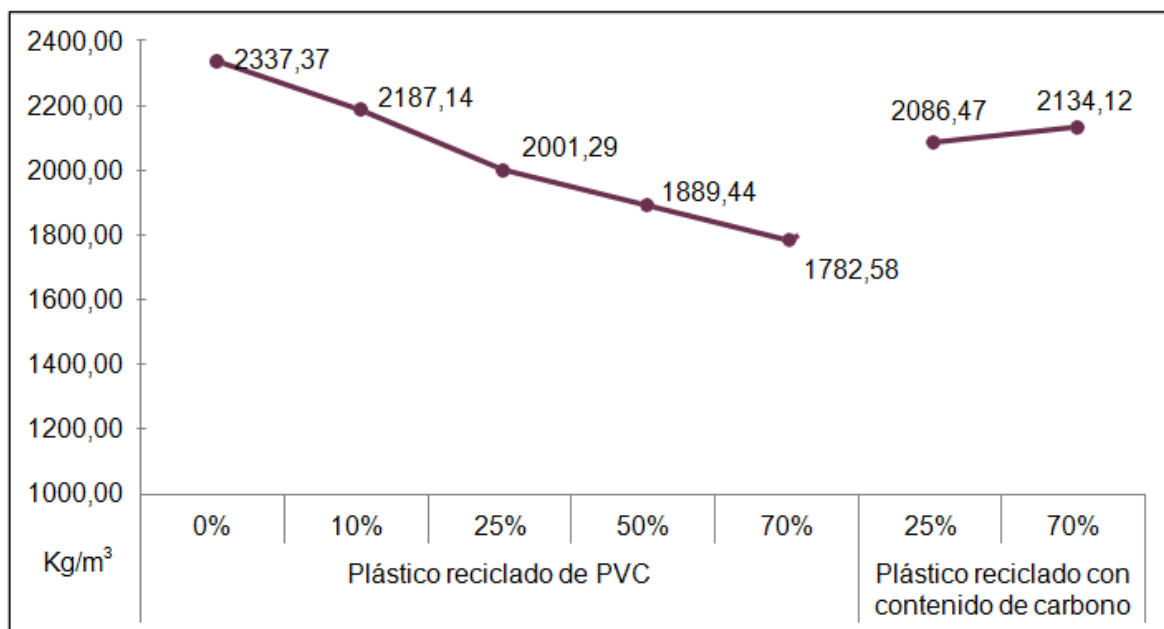


Figura 55. Gráfico densidad aparente (kg/m³) mezclas de mortero fresco⁷⁹.

4.3 Resultados Densidad aparente y relativa e Índice de porosidad

Respecto a los resultados obtenidos de la densidad aparente, se tiene que esta desciende a medida que incrementa el plástico reciclado en la mezcla, como también que las probetas con plástico reciclado con contenido de carbono tienen mayor densidad aparente que las mezclas de misma dosificación con plástico de PVC. En cuanto a la densidad relativa, ocurre lo mismo; las mezclas con plástico con contenido de carbono también tienen mayor densidad relativa que sus respectivos en las mezclas con plástico de PVC, así como mayor peso y densidad.

El índice de porosidad es la relación de vacíos la cual da una idea de las propiedades del material. A medida que va incrementándose el porcentaje de agregados de plástico reciclado de PVC, el índice de porosidad va disminuyendo constantemente; esto quiere decir que a mayor cantidad de plástico, la mezcla resulta ser menos porosa, pero más ligera. En el caso del plástico con contenido de carbono, igual decrece con el aumento de plástico, sin embargo estos índices son muy altos comparándolos con los de las mezclas del porcentaje respectivo de plástico reciclado de PVC.

⁷⁹Fuente Figura: Elaboración propia.

A continuación se muestran todos los resultados obtenidos en la tabla 11 y de forma visual se muestran en las figuras 56 y 57.

Tabla 11. Resultados de ensayo de Densidad relativa, aparente e índice de porosidad⁸⁰.

Probetas			Peso hidrostático (g)	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	Densidad Aparente		Densidad Relativa		Índice de Porosidad (%)		Ws (%)
PVC	0%	1	124,10	273,43	253,46	2,04	2,04	2,43	2,45	16,10	16,85	7,88
		2	124,28	274,50	252,57	2,03		2,47		17,60		8,68
	10%	1	121,03	265,81	247,35	2,04	2,02	2,41	2,34	15,30	13,35	7,46
		2	121,48	257,34	243,45	2,00		2,26		11,40		5,71
	25%	1	116,40	242,84	230,14	1,98	1,95	2,22	2,18	10,90	10,70	5,52
		2	119,33	241,63	229,06	1,92		2,15		10,50		5,49
	50%	1	118,27	214,35	204,09	1,73	1,74	1,89	1,88	8,70	7,70	5,03
		2	125,99	228,86	220,36	1,75		1,88		6,70		3,86
	70%	1	117,21	206,73	197,45	1,68	1,70	1,83	1,83	7,90	7,30	4,70
		2	136,43	242,11	233,01	1,71		1,83		6,70		3,91
Carbono	25%	1	129,62	283,24	263,35	2,03	2,03	2,40	2,39	15,30	14,95	7,55
		2	140,88	306,15	285,58	2,03		2,37		14,60		7,20
	70%	1	128,01	264,04	252,08	1,97	1,99	2,17	2,19	9,30	9,15	4,74
		2	118,67	248,49	237,80	2,00		2,20		9,00		4,50

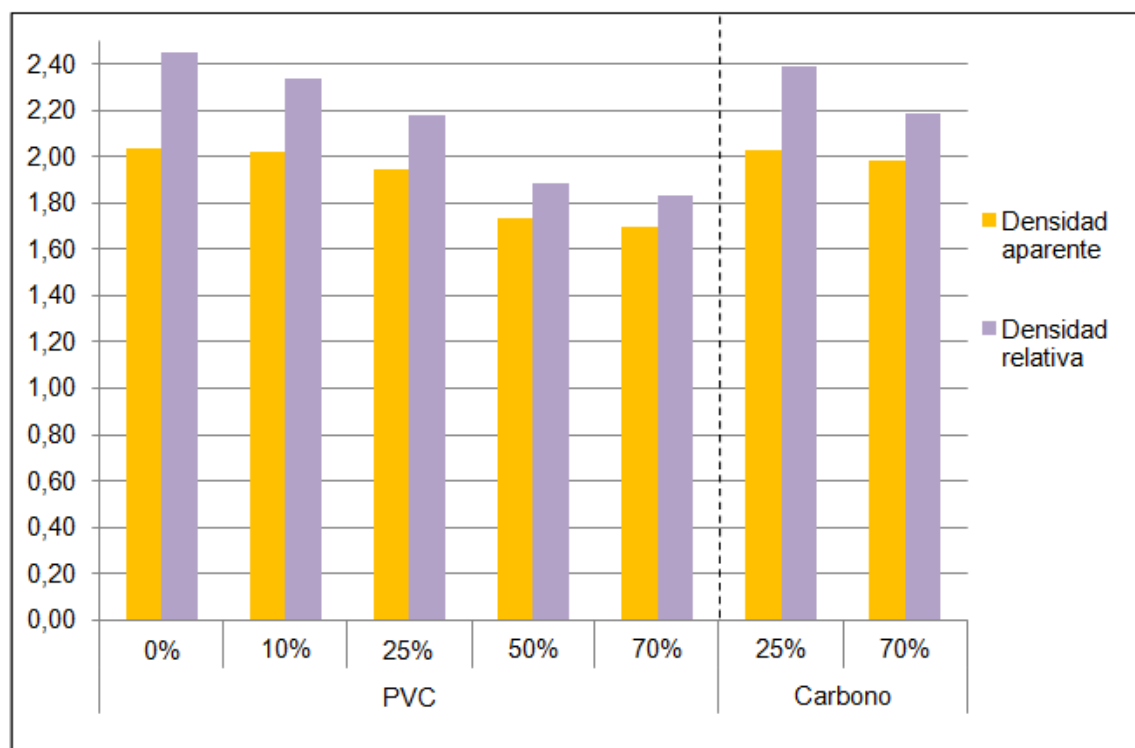


Figura 56. Gráfico densidad aparente y relativa⁸¹.

⁸⁰ Fuente Tabla: Elaboración propia.

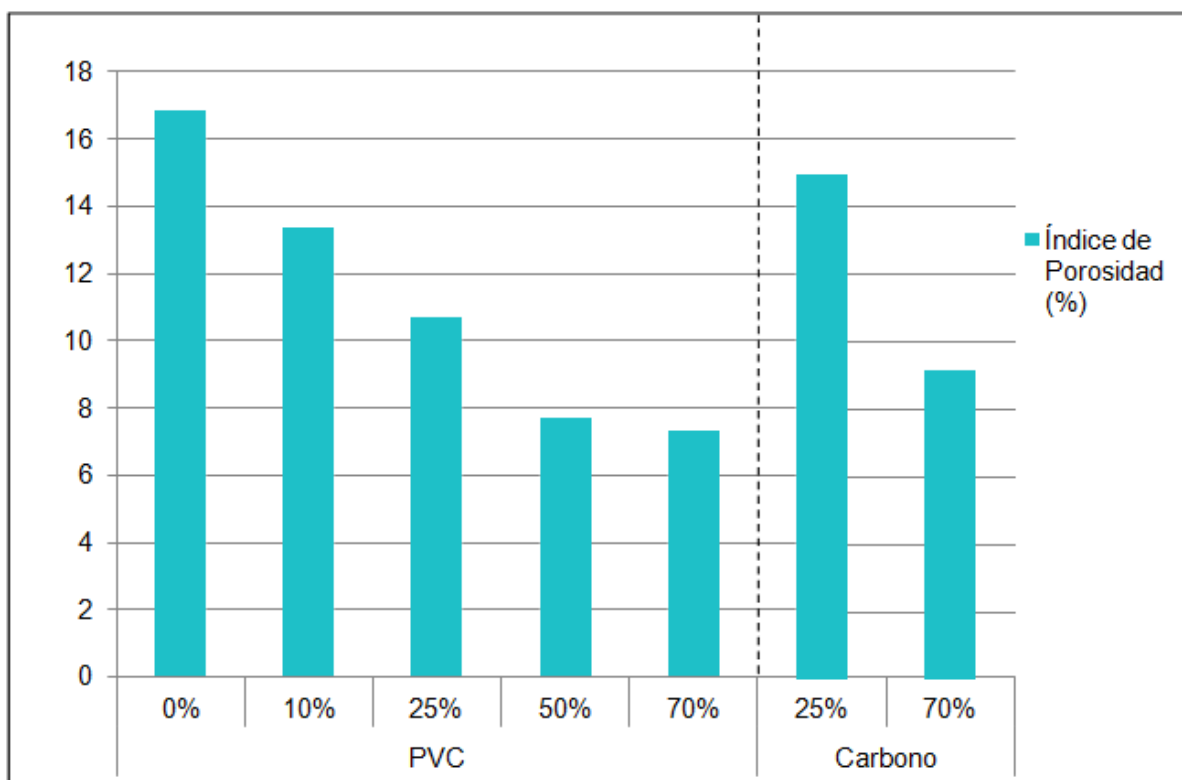


Figura 57. Gráfico índice de porosidad (%)⁸².

4.4 Resultados Conductividad Térmica

A través de este ensayo (resultados en tabla 12) se puede observar que el mortero convencional posee características aislantes comunes (medianamente aislante), mientras que a medida que se aumenta el porcentaje plástico, el coeficiente de conductividad térmica disminuye, lo que va generando que este sea mejor aislante térmico.

Respecto del calor específico, este indica la mayor o menor dificultad que presenta un material para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. En este caso, decrece a medida que aumenta el porcentaje de plástico y que se hace menos denso. Esto quiere decir que es más fácil incrementar la temperatura de los morteros con mayor cantidad de plástico, con menos energía calorífica.

Al observar los resultados de difusividad térmica se observa que a medida que se incrementa el plástico el tiempo de variación disminuye. Esto quiere decir que el mortero con mayor cantidad de plástico mantiene mejor su temperatura mientras el exterior cambia,

⁸¹Fuente Figura: Elaboración propia.

⁸²Fuente Figura: Elaboración propia.

es decir, posee la capacidad de variar su temperatura más lentamente que el medio que lo rodea. Esto es conveniente en un lugar con un clima que tiene grandes oscilaciones de temperatura, ya que el interior se podría aislar del exterior, manteniendo su temperatura.

Tabla 12. Resultados de ensayo de propiedades térmicas⁸³.

Propiedades térmicas	Dosificación de plástico reciclado						
	PVC					Carbono	
	0%	10%	25%	50%	70%	25%	70%
Conductividad térmica (λ) [W/m·K]	1,680	1,370	1,100	0,810	0,643	1,455	1,205
Calor específico (cp) [J/m³ K]	1,77E+06	1,68E+06	1,64E+06	1,62E+06	1,60E+06	1,62E+06	1,57E+06
Difusividad térmica (α) [m²/s]	9,50E-07	8,21E-07	6,88E-07	5,08E-07	3,97E-07	8,97E-07	7,72E-07

A continuación se muestran gráficamente los resultados para cada propiedad en las figuras 58, 59 y 60.

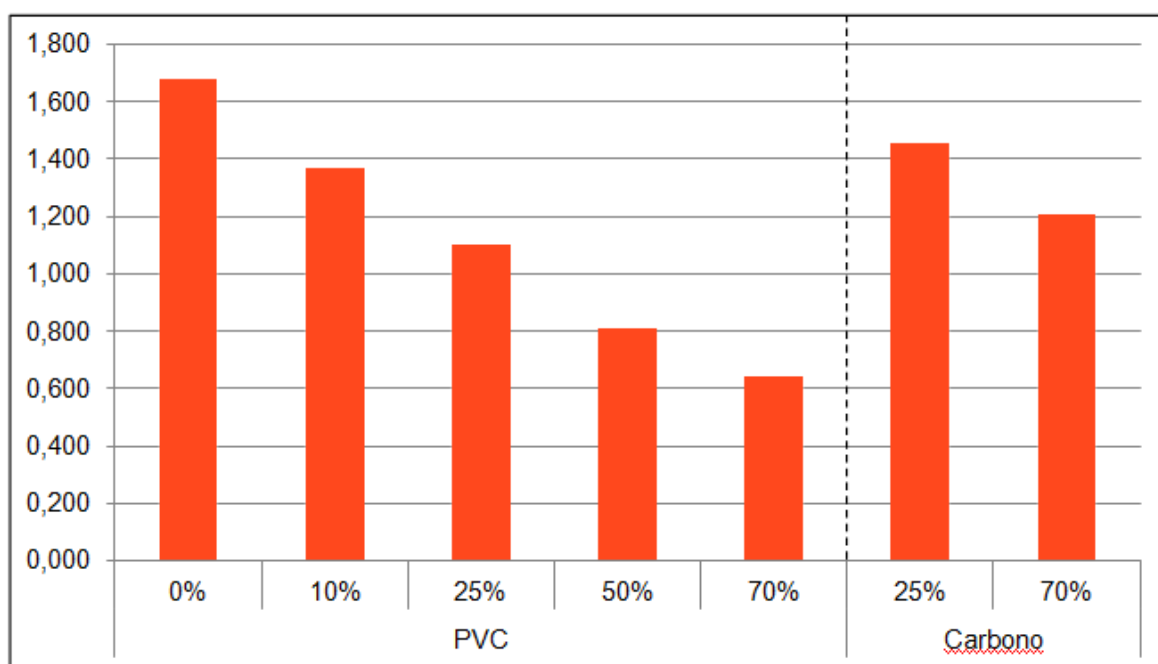


Figura 58. Gráfico conductividad térmica (λ) (W/m·K)⁸⁴.

⁸³Fuente Tabla: Elaboración propia.

⁸⁴Fuente Figura: Elaboración propia.

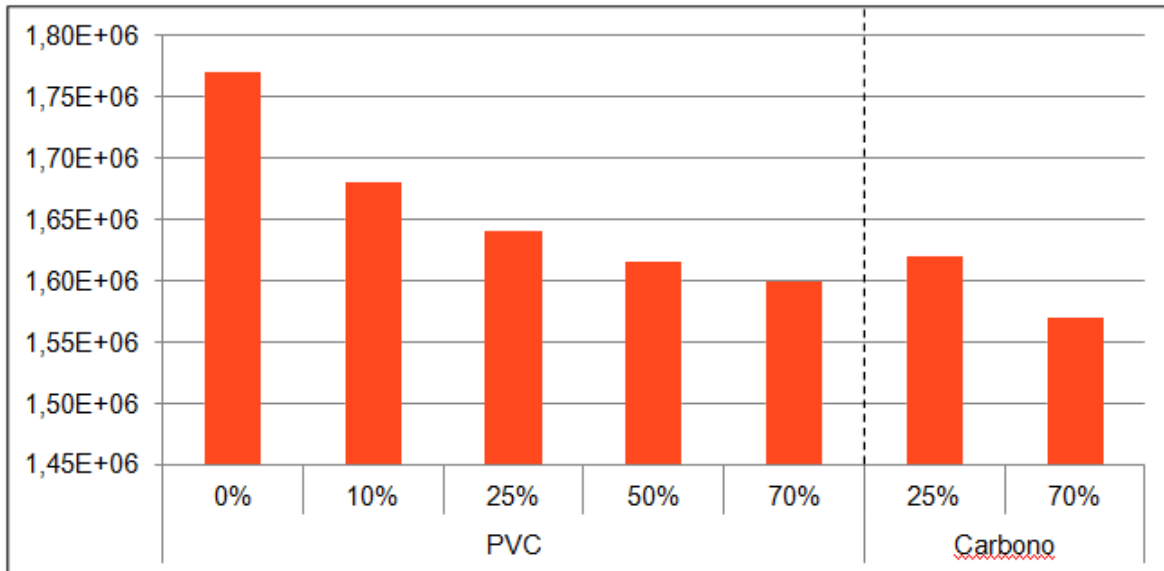


Figura 59. Gráfico calor específico (cp) (J/m³·K)⁸⁵.

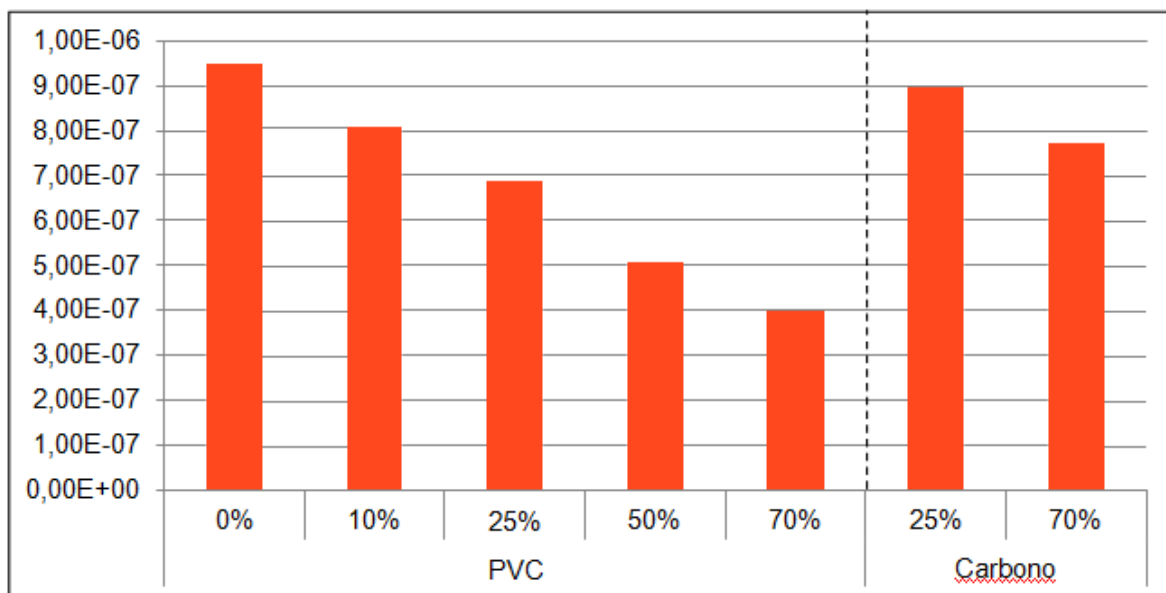


Figura 60. Gráfico de difusividad térmica (α) (m²/s)⁸⁶.

4.5 Resultados Modulo de Elasticidad

Mediante este ensayo se ve que cuando mayor es el módulo de elasticidad de los áridos, mayor es el módulo de elasticidad del mortero y que la forma de los áridos y su textura superficial afectan también al módulo de elasticidad debido a su influencia en la formación de micro fisuras. En este caso, a medida que el plástico reciclado se incrementa en la

⁸⁵Fuente Figura: Elaboración propia.

⁸⁶Fuente Figura: Elaboración propia.

mezcla este módulo va descendiendo. Esto se debe a que el árido, en este caso el plástico, no tiene una de las mejores adherencias a la mezcla de mortero, y a medida que este aumenta, se va perdiendo esta elasticidad.

Se realizaron dos ensayos distintos para el módulo de elasticidad longitudinal que fue el de impacto y el de ultrasonido. Si bien no muestran las mismas cifras, son similares y ambos muestran el decrecimiento del módulo con el aumento del porcentaje plástico reciclado, todo lo anterior se ve reflejado en la tabla 13 mostrada a continuación, junto con los gráficos en las figuras 61, 62 y 63:

Tabla 13. Resultados del ensayo de Módulo de Elasticidad (MOE)⁸⁷.

Probetas		Por impacto		Ultrasonido
Plástico reciclado	%	MOElong = $\rho \cdot v^2$ [Mpa]	MOEflex [Mpa]	MOEus
PVC	0%	3625	19225	3127
	10%	3459	18387	3052
	25%	2956	13295	2906
	50%	2320	8143	2700
	70%	2089	6156	2483
Carbono	25%	3241	13843	3161
	70%	2783	10013	3075

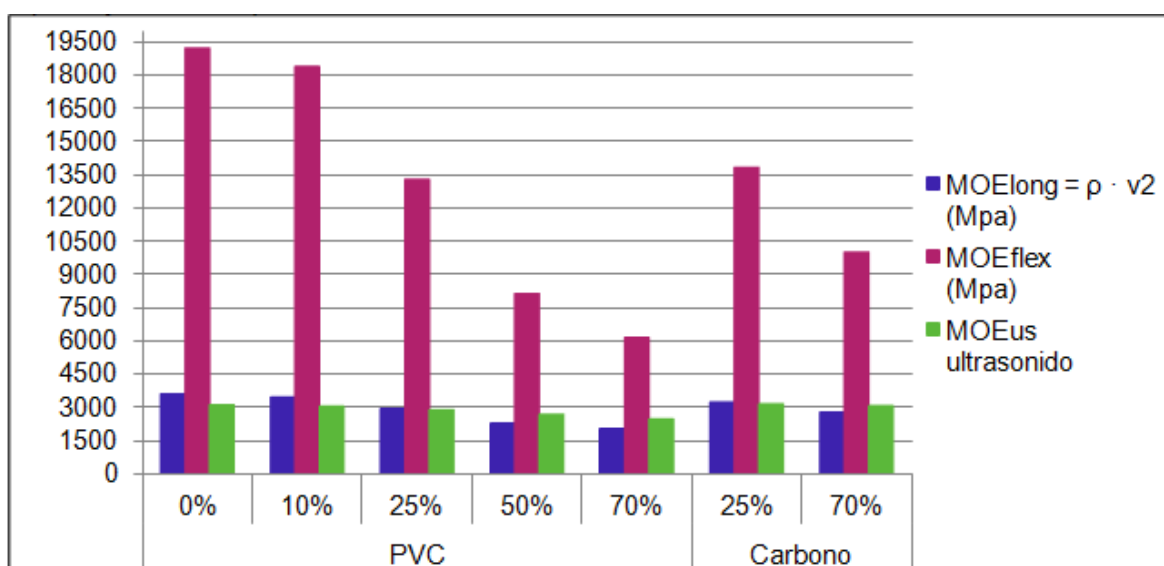


Figura 61. Gráfico módulos de elasticidad a flexión y longitudinales de cada mezcla⁸⁸.

⁸⁷Fuente Tabla: Elaboración Propia.

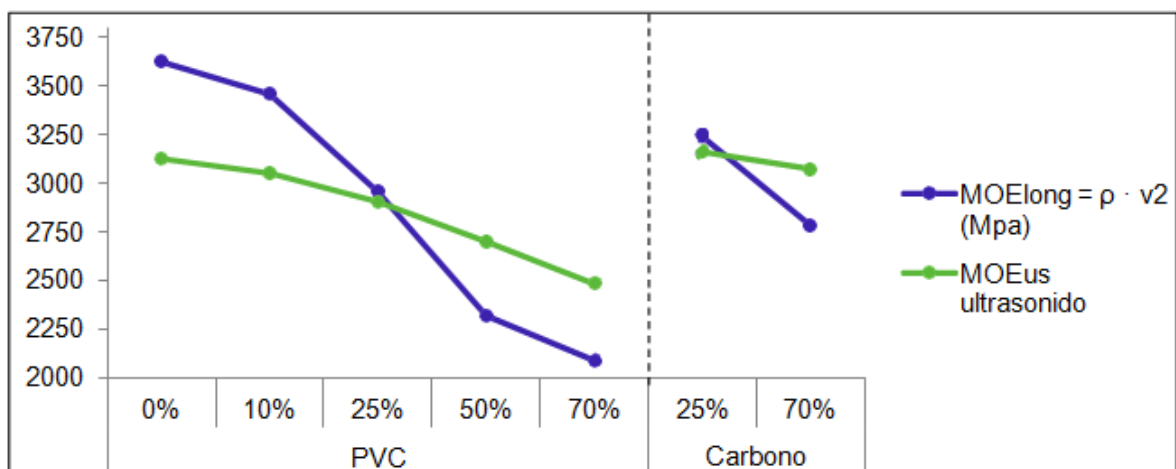


Figura 62. Gráfico módulo de elasticidad longitudinal de cada mezcla (MPa)⁸⁹.

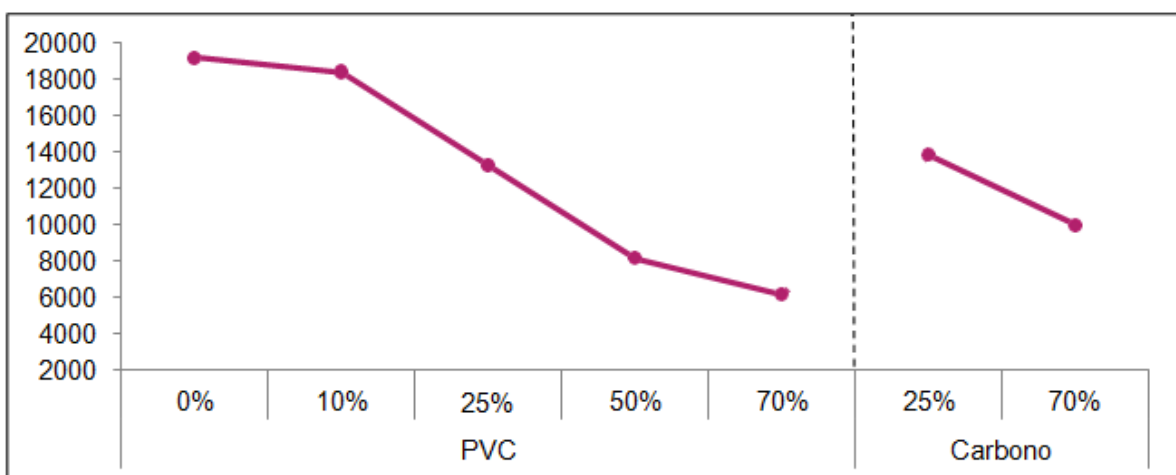


Figura 63. Gráfico módulo de elasticidad de flexión de cada mezcla (MPa)⁹⁰.

4.6 Resultados Ensayo de Flexo-tracción

Los resultados de las seis probetas ensayadas fueron promediados para obtener la media del valor de la resistencia a flexo-tracción. Se muestran las cargas resistidas promedio y la media del resultado final en la Tabla 14, según cada dosificación.

⁸⁸Fuente Figura: Elaboración propia.

⁸⁹Fuente Figura: Elaboración propia.

⁹⁰Fuente Figura: Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados de ensayo de resistencia a flexo-tracción ($[N/mm^2]$ [kgf/cm^2])⁹¹.

Probetas		Sección $[mm^2]$	Carga $[kg]$	Tensión rotura $[N/mm^2]$ $[Kgf/cm^2]$	
PVC	0%	1600	206,00	1,26	12,86
	10%	1600	187,80	1,15	11,72
	25%	1600	152,00	0,93	9,49
	50%	1600	87,30	0,53	5,45
	70%	1600	69,50	0,43	4,34
Carbono	25%	1600	175,3	1,07	10,94
	70%	1600	165,2	1,01	10,31

Se puede observar por medio de la figura 64, que a medida que las mezclas contienen mayor cantidad de plástico reciclado la resistencia disminuye, es decir va perdiendo propiedades mecánicas. Las probetas con agregado de plástico de carbono resistieron más que las de PVC, esto ocurre porque tienen una mayor densidad, mientras que las primeras son más ligeras y por esto menos resistentes a las cargas de flexo-tracción.

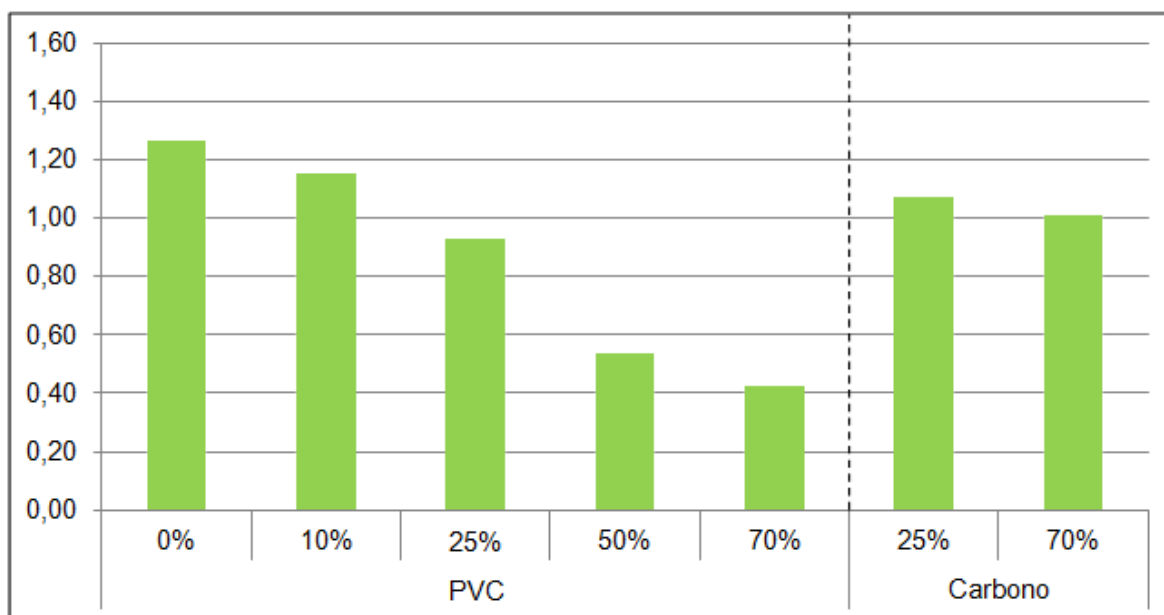


Figura 64. Gráfico tensiones de rotura para la resistencia a flexo-tracción $[N/mm^2]$ ⁹².

4.7 Resultados Ensayo de Compresión

Los resultados de las diez piezas ensayadas (ya que se utilizaron las probetas partidas en dos por el ensayo de resistencias a flexo-tracción) fueron promediados para obtener la

⁹¹Fuente Tabla: Elaboración Propia.

⁹²Fuente Figura: Elaboración propia.

media del valor de la resistencia. Se muestran las cargas resistidas promedio y la media del resultado final en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados de ensayo de resistencias a compresión ($[N/mm^2]$ $[kgf/cm^2]$)⁹³.⁴⁰

Probetas		Anchura (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm ²)	Carga (kg)	Tensión rotura (N/mm ²) (Kgf/cm ²)	
PVC	0%	40	40	1600	5380,30	32,95	335,80
	10%	40	40	1600	4344,30	26,61	271,14
	25%	40	40	1600	2981,70	18,26	186,10
	50%	40	40	1600	1611,30	9,87	100,57
	70%	40	40	1600	936,60	5,74	58,46
Carbono	25%	40	40	1600	4330,80	26,53	270,30
	70%	40	40	1600	3711,50	22,73	231,65

Se observó que a mayor porcentaje de plástico en la mezcla, la resistencia fue decreciendo notablemente, obteniendo una pobre resistencia para el mortero de 70% de plástico reciclado. A medida que el mortero se hace más ligero va perdiendo cualidades mecánicas. Durante el ensayo se observó además, que a medida que se iban ensayando las probetas con mayor cantidad de plástico, las fallas iban siendo cada vez menos notorias, es decir, se mantenía la pieza más unida y sólida luego de fallar, lo que lo hace un material más dúctil, todo lo anterior queda esquematizado mediante la figura 65.

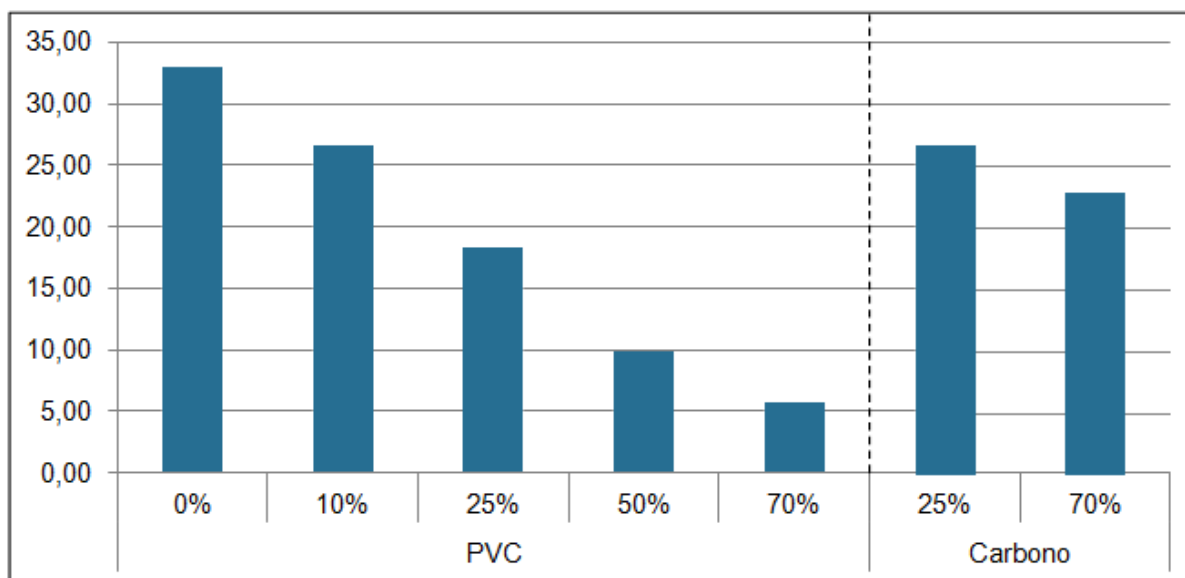


Figura 65. Gráfico tensiones de rotura para la resistencia a compresión $[N/mm^2]$ ⁹⁴.

⁹³Fuente Tabla: Elaboración propia.

⁹⁴Fuente Figura: Elaboración propia.

Conclusiones

Tras concluir los estudios del proyecto Plastitomate asociado al trabajo de memoria, podemos mencionar los siguientes puntos generales que resumen los elementos más relevantes de este trabajo.

1.- La contaminación por plásticos a nivel mundial es alarmante, la ONU y países desarrollados han tomado medidas, consecuencia de ello se crea la ley REP en Chile.

2.- Se busca reciclar la mayor calidad de desechos producidos por las industrias del país, pero menos del 1.5% total se recicla, además, el reciclaje es un proceso lineal y caro. Debido a esto se necesita la economía circular y que no se generen residuos para reciclar o disponer como tal.

3.- Para revalorizar los desechos de Weltum Mapu, se ha propuesto, testeado y validado un proceso convergente, ahorrando costos, líneas de producción, y agrupando polímeros mediante sus propiedades fisicoquímicas análogas.

4.- De las opciones de revalorización, la seleccionada fue el hormigón y mortero con mezclas de matrices poliméricas en diferentes %, presentando buenas características de desempeño en aplicaciones de larga data, uso moderado de carga y aislación, teniendo como resultados:

- Mezclas con reciclado de plástico desde cualidades térmicas; funciona mejor cada vez que le agregamos más polímeros. Gran competidor para materiales aislantes, radiadores y estructurales que soporten poco peso.

- Desde el punto de vista de resistencia, elasticidad, flexo-tracción y compresión, que apuntan al esfuerzo a que se puede ser sometida la mezcla se tiene que el contenido ideal de porcentaje de polímeros es entre 25% y 50%, dependiendo para el uso dado, ya que al agregar más polímeros pierde drásticamente las propiedades en comparación al de 0% de polímeros. Con este porcentaje se podrían utilizar para aceras, veredas, entradas, recubrimiento de parques, aéreas de recreación y cualquier tipo de pisos utilizados por los transeúntes, como también de vehículos de tamaño menor y calle de poca congestión.

- En términos de consistencia este hormigón es más liviano y menos poroso, lo que lo hace un excelente material para ornamentos como por ejemplo techado (tejas), fachadas, artículos de jardinería, escaleras, entre otros.

5.- El uso para fachadas y muros estructurales, así como veredas y caminos privados (parques, alamedas, plazas o recintos poblacionales) permite generar hasta un 40% de ahorro respecto del pavimento común, estudio no alcanzado a realizar en esta memoria por ello se estimo de manera general.

6.- Wentum Mapu, con los resultados obtenidos de esta memoria ha solicitado un proyecto de mayor envergadura y escalado, para revalorizar residuos poliméricos de varias empresas de V región, acogándose a la ley REP, mediante Fondos FIC y Crea-Valida de Corfo, por montos de 100.000.000 CLP.

7.- La revalorización de residuos, economía circular y smart packaging serán los enfoques prioritarios en los años venideros para combatir la contaminación mundial por plástico en tierra, mar y ambiente que nos rodea.

Bibliografía

- 1 – 2:** Artículo: La “isla de basura” es una amenaza para la vida marina en el Pacífico. National Geographic.
- 3:** Artículo: Revista Science Advances. “Production, use, and fate of all plastics ever made”. 19 Julio 2017.
- 4:** Artículo: La “isla de basura” es una amenaza para la vida marina en el Pacífico. National Geographic.
- 5 - 6 - 7:** Libro: Francis A. Carey, Robert M. Giuliano, Química Orgánica 9º edición. Capítulo 27: Polímeros
- 8 - 9:** Libro: Francis A. Carey, Robert M. Giuliano, Química Orgánica 9º edición. Capítulo 27: Polímeros sintéticos. Página 1134. Página 1135.
- 10 - 12:** Fuente Tabla: Libro: María R. Gómez, José R. Gil, Los plásticos y el tratamiento de sus residuos. Página: 85. Página: 90.
- 11 – 13:** Libro: María R. Gómez, José R. Gil, Los plásticos y el tratamiento de sus residuos. Capítulo 5.
- 14:** Artículo: El plástico que se abre paso al mar. National Geographic.
- 15 - 16:** Essay: Plastics - the Facts 2015. An analysis of European plastics production demand and waste data. Plastics Europe, 2015.
- 17:** Fuente figura: Grupo de Estudios de Mercado de Plásticos (PEMRG)/ Conversion Market & STrategy GmbH.
- 18:** Essay: Global Ocean Commission, 2015 “Plastics - Keeping them out of the ocean” Infografía.
- 19:** Fuente figura: Estratista 2018.
- 20:** Fuente figura: Ellen MacArtur Foundation “The new Plastics Economy”. Página 25
- 21:** Artículo: Estado de los plásticos 2018. UNENVIRONMENT.ONG.

- 22:** Fuente figura: Ellen MacArthur Foundation “The new Plastics Economy”. Página 28
- 23:** Derraik, J. G. B. 2002, “The Pollution of the Marine Environment by Plastic Debris: A Review.” Marine Pollution Bulletin, 44, 842.
- 24:** Van Seville, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B., Van Franeker, J., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F. & Law, K., 2015, “A global inventory of small floating plastic debris.” Environmental Research Letters 10, 124006.
- 25:** Fuente Figura: PlasticsEurope “Annual Review 2017-2018”. Página 13.
- 26:** Fuente figura: Elaboración y recopilación propia de datos.
- 27:** Fuente Figura: PlasticsEurope “Annual Review 2017-2018”. Página 15.
- 28:** UNEP, 2016. “Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change”. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- 29:** Fuente Figura: “Plásticos- Situación en 2017”. PlasticsEurope. Página 10.
- 30:** Artículo: The New Plastics Economy. By: Ellen MacArthur Foundation.
- 31:** Fuente figura: Ellen MacArthur Foundation “The new Plastics Economy”. Página 31.
- 32:** Artículo. Entradas de residuos de plástico de la tierra al océano, Science. Febrero 2015.
- 33:** Ley 20920 “Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje”; 01 junio 2016.
- 34:** Fuente Figura: Empresa Triciclos.
- 35:** Documento: Manual de tomate invernadero
- 36:** ODEPA- El mercado de tomate para consumo fresco. Diciembre 2015.
- 37:** Fedefruta- V región: Productores de tomate asimilarán tecnologías para una agricultura sustentable. 9 de octubre, 2014.
- 48:** Documento: Createch-Data Chile
- 49:** Artículo: Anna Keski-saari, Timo Kärki. The use of waste material in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product.

50 – 51: Artículo: Saeed Kazemi Najafi. Use of recycled plastics in wood plastic composites. A review.

52: Artículo: Importaciones 2014. ASIPLA.

53: Documento: By CREATECH.

54: Artículo: Revista “Waste Managment”, “Use of plastic in concrete mixture as aggregate replacement”, (2007), Zainab Z. Ismail y Enas A. AL- Hashmi.

55: ICD 2018

56: Drecking, www.decking.cl

63: Norma UNE-EN 1015-10, método para obtener la densidad aparente. Norma de piedra natural, UNE-EN- 14146.

66: Normas de referencia básicas: UNE-EN-14146, 2004. UNE-EN-ISO-12680-1, 2007.

69: Normas de referencia básicas: Norma UNE-EN- 1015-11.

72: NCh1037.Of77. Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.

73: ASTM C-1609. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete.

74: Normas de referencia básicas: Norma UNE-EN- 1015-11.

Anexos

Link Drive:

<https://drive.google.com/folderview?id=1ww4OHZJyNb6sHc51BwwyvkvxBbhX2eMJD>

Contenido Drive:

Anexo 1 – Carey 9 Edición Química Orgánica. (Libro de Química)

Anexo 2 – Análisis y resultados Ensayos Civiles. (Resultados Estudio en detalle)

Anexo 3 – National Geographic Junio 2018. (Revista, Reportaje especial)

Anexo 4 – Annual Report 2018. Plastics Europe. (Reporte técnico)

Anexo 5 – El plástico que se abre paso al mar. National Geographic. (Noticia destacada)

Anexo 6 – La isla de basura en el Pacífico. National Geographic. (Noticia destacada)

Anexo 7 – Plásticos en los océanos. Greenpeace. (Reporte técnico)

Anexo 8 – Plastics the facts 2017. (Reporte técnico)

Anexo 9 - Manual de tomate invernadero. (Manual agrícola)

Anexo 10 – Plastimadera 1. (Paper)

Anexo 11 – Plastimadera 2. (Paper)

Anexo 12 – Plastimadera 3. (Paper)

Anexo 13 – Mortero con polímeros. (Documento destacado)

Anexo 14 – Infraestructura critica 2016 – 2025. (Informe Cámara Chilena de la Construcción)

Anexo 15 – Las Ultimas Noticias. Infraestructura Civil. (Noticia destacada)

Anexo 16 – Ley 20920. (Ley Chilena)

Anexo 17 – Plan de trabajo. (Excel Carta Gant)