UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

"DESARROLLO DE UN NUEVO ADOQUÍN ECOLÓGICO UTILIZANDO PLÁSTICOS POST-CONSUMO Y ECOCEMENTOS"

QUE, PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

GUSTAVO RUBIO FERREL

ASESOR:

DR. JOSÉ CARLOS RUBIO AVALOS

MORELIA, MICHOACÁN, JULIO DE 2020

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

A la Facultad de Ingeniería Civil.

Al Departamento de Materiales.

A todos mis profesores.

A mi asesor.

Dr. José Carlos Rubio Avalos

Gracias por su apoyo y guía durante los ensayos y prácticas que se realizaron al momento de realizar este proyecto de tesis.

DEDICATORIAS

Esta tesis está dedicada a:

A mis padres Gustavo y Rosa quienes, con su amor, esfuerzo y paciencia me han permitido llegar a la culminación de este sueño, gracias por inculcar en mí el ejemplo de superación, esfuerzo y valentía para no rendirme ante nada y saber que a pesar de que el camino se vea oscuro siempre la luz de Dios será suficiente para seguir adelante. Prometo pagarles todo lo que han hecho por mí.

A mis abuelos Abigail y Salvador que estuvieron conmigo en mis primeros años, cuidándome y brindándome junto a mis padres lo necesario para empezar el largo camino que comenzó en el jardín de niños y culmina el día de hoy. Espero con la ayuda de Dios se me permita pagarles por todo lo hicieron y han hecho por mí. A mis abuelos Roberto y María Luisa, quienes desafortunadamente ya no están y me hubiese encantado que me vieran al final de este viaje y que espero que estén donde estén se sientan orgullosos de que sea su nieto.

A mi hermano Ernesto, a mis amigos Alberto, Samara, José Luis, Claudia, Leonardo y Diana por haberme acompañado durante este viaje, por haber sido el apoyo en momentos difíciles y extender su mano cuando más lo necesite y regalarme recuerdos que siempre vivirán en mi corazón. Claro sin olvidar a aquellos amigos que ya no están; pero de entre todos a quien estuvo conmigo desde el último año de preparatoria y hasta el final de sus días Erick, gracias por todo.

A mis tíos y familia en general, pero sobre todo a José Luis con quien estoy completamente agradecido por su apoyo al resolverme dudas que se presentaron durante mis estudios sin importar la hora del día o noche que fuera y por ser él quien me mostrará lo que es ser un ingeniero civil y ser una parte importante al elegir mi carrera.

RESUMEN

La presente tesis se basa en el diseño, la fabricación y la caracterización mecánica (resistencia a la compresión) de un nuevo ladrillo de pavimento para aplicaciones peatonales. Este nuevo elemento es respetuoso con el medio ambiente ya que utiliza plástico post-consumo y ecocemento de baja emisión de CO_2.

El ladrillo de pavimento es un material compuesto de dos componentes: mortero de ecocemento en la parte inferior y una capa de plástico de color en la parte superior. Además, el proceso de fabricación es de baja energía, ya que la temperatura utilizada para fundir los plásticos es de alrededor de 200° C/1 h en un horno convencional en un molde de metal, y el mortero de ecocemento se mezcla a mano y luego se moldea en un molde de metal. Después del endurecimiento, ambas piezas se unen mediante adhesivos disponibles comercialmente.

A partir de la caracterización mecánica, el ladrillo de pavimento se desarrolló a siete días con una resistencia a la compresión de 40 kg/cm^2 suficiente para ser utilizado en aplicaciones de baja mecánica como pavimentos peatonales.

Este nuevo material ecológico puede usarse como un nuevo elemento de construcción para sistemas de pavimento de construcción amigables. Se sugiere trabajar más para aumentar más para aumentar la aplicación de este elemento en la industria de la construcción y los resultados son “conocimiento abierto” para quienes puedan estar interesados en el uso.

Palabras clave: Ecocemento, ladrillo de pavimento, reciclaje de plástico, material compuesto ambiental.

ABSTRACT

The present thesis is focused on the design, manufacturing, and mechanical characterization (compressive strength) of a novel pavement brick for pedestrian applications. This new element is environmentally friendly since it uses post-consumer plastic and eco-cement or low CO_2 emission cement.

The pavement-brick is a composite material of two components: eco-cement mortar at the bottom and a plastic colored layer at the top. Also, the manufacturing process is low energy, since the temperature used to melt the plastics are around 200ºC/1h in a conventional oven in a metal mold, and the eco-cement mortar is hand-mixed and later cast in a metal mold. After hardening, both pieces are joint together by commercially available adhesives.

From mechanical characterization, the pavement-brick developed at seven days compressive strength of 40 kg/cm^2 enough to be used for low mechanical applications as pedestrian pavements.

This new ecological material can be used, as a new building element for friendly construction pavement systems. Further work is suggested to increase the application of this element in the construction industry and results are "open knowledge" for whom may be interested in used.

Keywords: Eco-cement, pavement brick, plastic recycling, environmental composite material.

ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN **2**
CAPITULO 2. ESTADO-DEL-ARTE **5**
2.1 DEFINICIÓN. 5
2.2 CLASIFICACIÓN. 5
2.2.1 Termoplásticos 6
2.2.2 Plásticos Termoestables 13
2.2.3 Elastómeros 17
2.2.3.1 Clasificación de los Elastómeros 17
2.3 Proceso de Manufactura. 28
2.3.1 Síntesis del Polietileno. 30
2.4 Manufactura De Los Termoplásticos 44
2.5 Problemática Ambiental Generada Por Los Plásticos 48
2.6 Reciclaje de Plástico 56
2.6.1 Tipos de Reciclaje 61
2.7 Fundamentos del Cemento y del Concreto 70
2.7.1 Definición 70
2.8 Clasificación 71
2.8.3 Según Sus Características Especiales 72
2.9 Composición del Cemento Pórtland 73
2.10 Procesos de Hidratación 74
2.11 Prefabricados De Concreto Para Pavimentos 75
2.11.1 Definición 75
2.11.2 Clasificación de Elementos Prefabricados 76
2.11.3 Según el Peso Y Dimensiones. 76
2.11.4 Según Su Formato. 77
2.11.5 Según el Tipo de Material. 78
2.11.6 Proceso de Fabricación de Elementos Prefabricados. 79
2.12 Método de Colocación de Adoquines 89
2.13 Materiales Compuestos 94
2.13.1 Definición 94
2.13.2 Clasificación 95

2.13.3 Procesos Y Equipo de Elaboración 97
2.14 Yeso 105
2.14.1 Definición 105
2.14.2 Clasificación y Aplicaciones 106
2.14.3 Tipos de Yeso Utilizados en la Construcción 106
2.14.4 Propiedades 107
2.15 Óxido de Calcio 107
2.15.1 Definición 107
2.15.2 Clasificación y Tipos de Cal 108
2.15.3 Tipos de Cal con base al porcentaje de Óxido de Calcio 108
2.15.4 Aplicaciones 109
CAPITULO 3. DISEÑO EXPERIMENTAL. 111
3.1 Polímero 111
3.2 Ecocemento 114
3.3 Material Compuesto 116
3.4 Producto Final 118
CAPITULO 4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS. 121
4.1 Propiedades Físicas 121
4.2 Propiedades Mecánicas 125
CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. 135
5.1 Polímero 135
5.2 Ecocemento 136
5.3 Material Compuesto 138
CAPITULO 6. CONCLUSIONES. 141
CAPITULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DIGITALES. 143

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

La presente investigación se refiere al tema del "Desarrollo de un nuevo adoquín ecológico utilizando plásticos post-consumo y ecocementos", que se puede definir como un tema de innovación ecológica con la finalidad de darle una reutilización a los deshechos de polímeros contaminantes que se pueden quedar por años afectando al medio ambiente, así también se busca generar una reducción de los gases de efecto invernadero con base a la ayuda de los ecocementos.

La característica principal de este nuevo elemento es la de ser un elemento compuesto, que combina las propiedades de dos materiales que por sí solos no nos darían las características que nos da su unión.

La investigación para el desarrollo de este nuevo elemento se realizó por el interés de encontrar un material ecológico que supere las solicitaciones de un adoquín convencional de concreto hidráulico, con la finalidad de reducir los efectos negativos que la producción de estos puede generar, así como los daños colaterales que estos pueden provocar a mediano plazo a los usuarios que suelen utilizar andadores con estos elementos de construcción.

La metodología empleada para el desarrollo de este proyecto fue llevada a cabo con base al método científico, tomando las propiedades conocidas de los elementos que constituyen a nuestro material compuesto, teniendo en cuenta las diferentes variaciones hipotéticas de resultado que pueden generarse, seguido de realizar las respectivas pruebas y ensayos para el elemento y poder realizar una conclusión comparativa con las hipótesis iniciales.

Se realizó en el capítulo 2 el estudio del Estado-del-Arte o Marco teórico para contar con una investigación documental amplia y diversa del tema con la finalidad de poder realizar el diseño experimental más apropiado.

En el capítulo 3 se realizó el Diseño Experimental, que es donde abordamos la elaboración de nuestro material, dando el diseño desde el Proporcionamiento hasta el acabado final del adoquín ecológico.

En el capítulo 4 presentamos la evaluación de resultados, donde se exponen los respectivos ensayos a la compresión simple para las diferentes probetas y sus respectivos resultados.

En el capítulo 5 se da el análisis y la discusión de los resultados obtenidos durante los ensayos expresados en el capítulo 4, dando énfasis en las diferentes variaciones que se presentaron en las diferentes probetas.

En el capítulo 6 presentamos las conclusiones de la investigación y unas breves recomendaciones en cuanto la aplicación del producto final.

De aquí se desprende que si fue posible desarrollar un nuevo producto de plásticos de post-consumo y utilizando cementos de bajas emisiones de dióxido de carbono y de bajo consumo energético en su proceso de elaboración. Este tipo de nuevos adoquines ecológicos también brindan la posibilidad de reducir el impacto de los usuarios al transitar por ellos, debido al

bajo módulo de elasticidad y la capacidad de disipar energía, lo que lo hace ideal para su aplicación en andadores, ciclo pistas, plazas e incluso banquetas, entre otras.

CAPÍTULO 2
ESTADO-DEL-ARTE

CAPITULO 2. ESTADO-DEL-ARTE.

2.1 DEFINICIÓN.

La palabra polímero, significa literalmente <<*muchas partes*>>. Por material sólido polimérico consideramos aquel que contiene muchas partes o unidades enlazadas entre sí químicamente, siendo estos los plásticos y los elastómeros. Los plásticos son un grupo grande y variado de materiales sintéticos, cuya forma se obtiene por procesos de conformado o moldeado. Siendo en sí que la palabra plástico tiene varías aceptaciones. Como sustantivo, se refiere a una clase de materiales que puedan ser moldeados. Como adjetivo, puede significar moldeable. Otro uso del término plástico es para describir una deformación permanente de un metal sin ruptura, como es el caso de la <<*deformación plástica de metales*>>. Mientras los elastómeros o gomas experimentan las deformaciones elásticas al aplicárseles una fuerza sobre ellos, pudiendo recuperar su forma original (totalmente o casi en su totalidad) cuando cesa la puerta [1].

2.2 CLASIFICACIÓN.

De la misma forma que tenemos muchos tipos de metales como lo son aluminio o cobre, existen muchos y variados tipos de plásticos como el polietileno y nylon. La división de los plásticos se puede hacer en dos clases, ***termoplásticos, plásticos termoestables y elastómeros*** dependiendo puntualmente de cómo están enlazados químicamente [1].

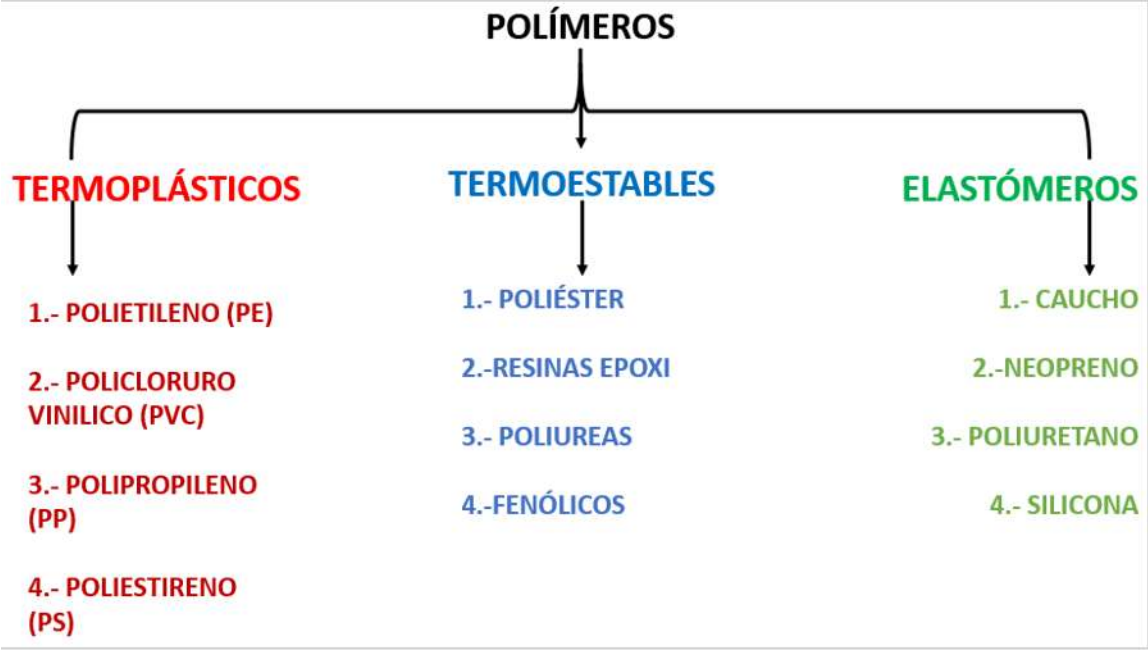


Figura 1. Mapa Conceptual sobre la Clasificación de los polímeros.

Fuente: Propia **[1]**

2.2.1 Termoplásticos

Los termoplásticos para ser conformados requieren la aplicación de calor previo al enfriamiento que les confiere su forma definitiva. Estos materiales pueden ser recalentados y reformados varias veces sin sufrir cambios significativos en sus propiedades. Muchos termoplásticos poseen una larga cadena principal de átomos de carbono unidos covalentemente. A veces existen átomos de nitrógeno, oxigeno o azufre en dicha cadena principal siendo estos casos exclusivos. A este grupo de termoplásticos las cadenas moleculares que los unen entre sí se denominan enlaces secundarios [1].

Figura 2. Pellets termoplásticos utilizados en el diseño LED.

Fuente: http://www.catalogodelempaque.com/documenta/imagenes/119286/1-Masterbatch-1g.jpg **[2]**

A continuación, se describen algunos termoplásticos básicos:

1. Polietileno (PE)

Características:

- (CH_2) n →85.7 % C
- Polimerización aditiva del etileno.
- Cadena ramificada → Cristalinidad→ Punto de fusión variable

Propiedades:

- Elevada densidad.
- Sólido blanco casi traslucido.
- Elevadas temperaturas →Tenaz, flexible y poca dureza.
- Se debe tomar en cuenta su viscosidad en procesos de fabricación.
- Baja conductividad.
- Muy estable en ausencia de oxígeno.
- Buena resistencia química.
- Inoloro.
- No tóxico.
- Historia térmica del material:

Enfriamiento Rápido→ Blando y flexible

Enfriamiento Lento → Mayor dureza y fragilidad

Aplicaciones:

- Aislante de cables.
- Envases y tuberías.
- Películas.
- Revestimiento de papel [2].

Figura 3. Rollo de polietileno para utilización como geomembrana.

Fuente: http://membranaslosvolcanes.com/wp-content/uploads/2015/09/Geomembrana2-300x200.jpg **[3]**

2. Policloruro de vinilo (PVC)

Características:

- Fórmula general (CHCl- CH_2) n
- Se obtiene del petróleo o del gas natural.
- Uso muy generalizado.
- Se presenta como polvo blanco, amargo y opaco [2].

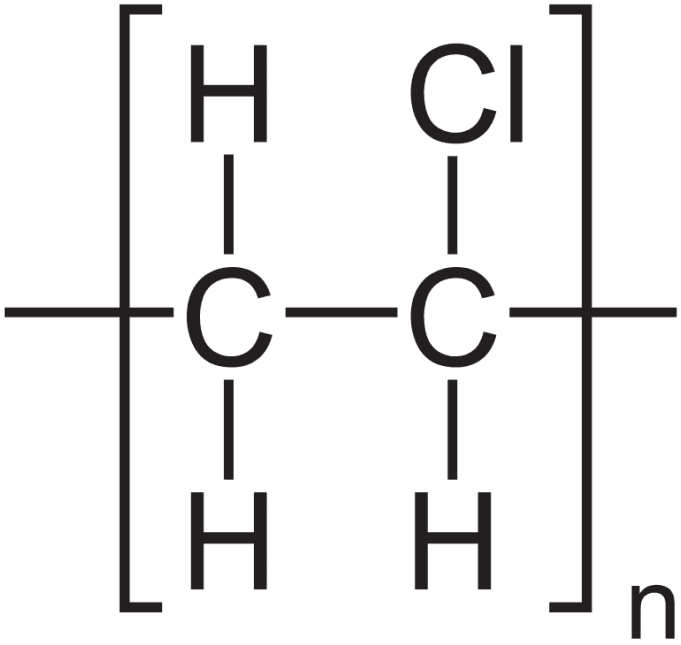


Figura 4. Estructura molecular de policloruro de vinilo.

Fuente: https://depvc.site/wp-content/uploads/2018/12/estructura-quimica-pvc.png **[4]**

Propiedades:

- Resistencia y poco peso.
- Versatilidad.
- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Inflamabilidad.
- Reciclabilidad [2].

Aplicaciones:

- Construcción.
- Mobiliario.
- Sanidad.
- Embalajes.
- Electricidad-electrónica.
- Automotriz [2].

Figura 5. Tubos de policloruro de vinilo PVC

Fuente: https://image.freepik.com/foto-gratis/tubos-pvc-agua-potable_48710-167.jpg **[5]**

3. Polipropileno (PP)

Características:

- $(CH_3\text{-}CH\text{-}CH_2)n \rightarrow$ Semi cristalino
- Totalmente reciclable e inerte.
- El catalizador tiene gran importancia en su fabricación [2].

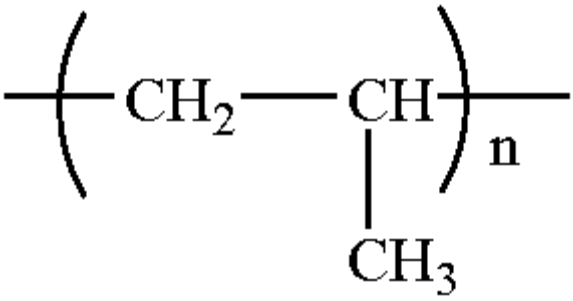


Figura 6. Estructura molecular de polipropileno, termoplástico.

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6a/Polipropilenoformula.png **[6]**

Propiedades:

- Baja densidad.
- Alta dureza.
- Resistencia a la abrasión
- Rigidez.
- Buena resistencia al calor y resistencia química.
- Las cadenas de propileno llevan aparejada una dispersión de pesos moleculares, que condicionan directamente sus propiedades mecánicas [2].

Tipos:

- Homopolímeros: Formados exclusivamente por monómeros de propileno.
- Copolímeros al azar: Además de propileno poseen una pequeña cantidad de etileno que se sitúa en posiciones aleatorias de la cadena principal.
- Copolímeros en Bloque: Es un homopolímero con un copolímero.
- Cauchos de etileno-propileno (EPR): Son polímeros con un elevado contenido de etileno.
- Copolímeros Especiales: Se añaden comonómeros muy específicos (buteno, octeno,) para obtener productos de aplicaciones muy concretas [2].

Aplicaciones:

- Envases de pared delgada.
- Películas.
- Fibras.
- Industria automotriz.
- Cargas en materiales compuestos los cuales son utilizados en mejorar la estabilidad termo-oxidativa y otras propiedades físicas como son la transparencia, rigidez y el aspecto visual [2].

Figura 7. Láminas de polipropileno.

Fuente:
https://www.mwmaterialsworld.com/media/catalog/product/cache/1/image/330x/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/p/l/plakene_1_1.jpg **[7]**

4. Poliestireno (PS)

Características:

- $(C_6H_6\text{-}CH\text{-}CH_2)$ n
- Sólido incoloro, rígido, frágil y muy poca flexibilidad.
- Barato, pero con poca resistencia a la temperatura y resistencia mecánica modesta [2].

Propiedades:

- Elasticidad.
- Moderada resistencia química
- Buena resistencia mecánica, térmica y eléctrica.
- Baja densidad [2]

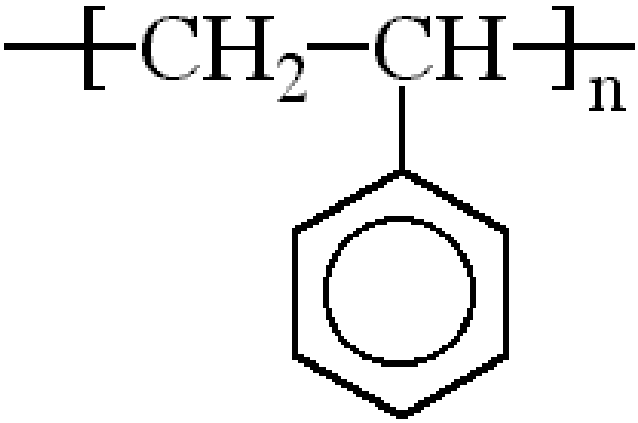


Figura 8. Estructura molecular de poliestireno, termoplástico.

Fuente: https://www.pslc.ws/spanish/images/sty01.gif **[8]**

Aplicaciones:

- Envases térmicos.
- Embalajes.
- Cajas protectoras traslucidas [2].

2.2.2 Plásticos Termoestables

Fabricados con una forma permanente y vulcanizados o endurecidos por reacciones químicas, no se pueden refundir ni almacenar, y son degradados o descompuestos por calentamiento a temperatura elevada. Por ello, los plásticos termoestables no se pueden reciclar. El término *termoestable* (la palabra griega *therme* significa calor), supone que el calor es necesario para el endurecido permanente del polímero. De todos modos, existen muchos plásticos llamados termoestables que han sido endurecidos o vulcanizados a temperatura ambiente solamente por una reacción química. Muchos plásticos termoestables constan de una red de átomos de carbono unidos con enlaces covalentes para formar un sólido rígido. Pero a veces hay átomos de nitrógeno, oxigeno, azufre u otros átomos enlazados covalentemente formando parte de una red estructural termoestable. Los plásticos son materiales técnicos importantes, así poseen una amplia gama de propiedades, algunas inalcanzables para otros materiales siendo de un bajo costo. Así como las ventajas que ofrece en trabajos mecánicos son la simplificación de trabajo de montaje, reducción de peso, reducción de peso, reducción de ruido y en algunos casos la eliminación de la necesidad de lubricación de ciertos componentes. Así pues, con esto dicho, podemos decir las aplicaciones de los plásticos en trabajos eléctricos por sus excelentes propiedades aislantes. Estas aplicaciones eléctricas-electrónicas incluyen conectores, interruptores, relés, componentes de sintonización en TV, bobinas, circuitos integrados y componentes de computador [1].

A continuación, se describen algunos termoestables básicos:

1. Poliésteres

Características:

- Excelentes propiedades eléctricas y son muy baratos
- Los dos más comunes son: PBT y PET [2].

Figura 9. Láminas de poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Fuente:
https://www.stabiliteuropa.com/sites/default/files/styles/ficha_grande/public/poliacryl_plus_laminas_1_0.jpg?itok=7EijqVbJ [**9**]

PBT (polibutileno tereftalato) Tiene un bajo costo se usa mucho en la actualidad como conectores, enchufes, componentes de alto voltaje, consolas terminales y timbres.

PET (polietileno tereftalato) Se utiliza como alfombras, encordelado de neumáticos y resinas de envase.

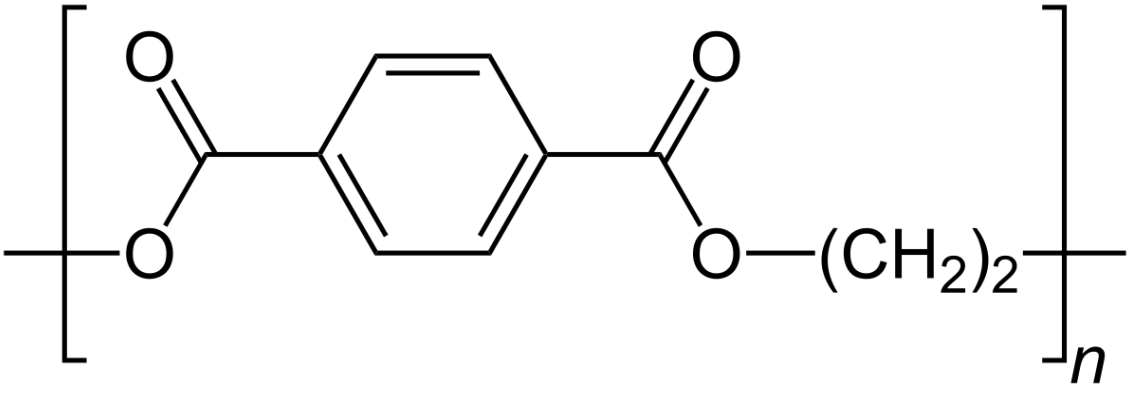


Figura 10. Estructura molecular del polietileno tereftalato PET.

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f8/PET_Structural_Formula_V1.svg/1200px-PET_Structural_Formula_V1.svg.png **[10]**

2. Resinas Epoxi [2]

Características:

- Tienen excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión.
- Buena adherencia y relativamente baratos [2].

Aplicaciones:

- Como recubrimientos protectores y decorativos por su **buena adherencia y gran resistencia mecánica y química.**
- Forros para latas, baterías y recubrimientos de neumáticos, por sus **buenas propiedades aislantes** como encapsulamiento de materiales semiconductores.
- Matrices para materiales compuestos (Fibra de carbono) [2].

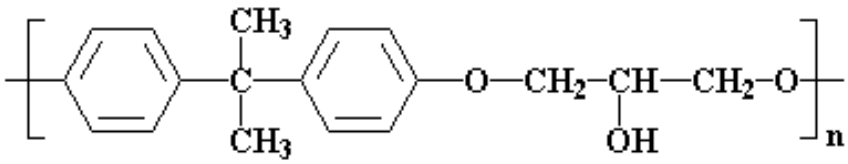


Figura 11. Estructura molecular de una Resina Epoxi.

Fuente: https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRByKadHL7cMbx80y5ffOJ3dWeQUxiFmSjiZV2ncDeYmkzMS14U **[11]**

3. Poliureas

Características:

- Similar al poliuretano, excepto porque en este caso el enlace formado corresponde al **enlace urea.**
- La poliurea puede alcanzar grandes elongaciones y resistencia a la abrasión [2].

Aplicaciones:

- Utensilios de cocina, moldes eléctricos, adhesivos [2].

Figura 12. Espuma de poliuretano para aislamiento acústicos y térmicos.

Fuente: https://www.teminsa.com/blog/wp-content/uploads/2019/03/espuma-de-poliuretano-aislante.jpg **[12]**

4. Poliuretano

Características:

- Buena estabilidad térmica.
- Propiedades térmicas [2].

Aplicaciones:

- Suelas de zapatos.
- Partes de coches.
- Fibras.
- Espumas aislantes [2].

5. Fenólicos

Características:

- Fueron los primeros plásticos descubiertos en la primera década del siglo XX.
- Todavía se utilizan por su bajo costo [2].

Aplicaciones:

- Como material de relleno para otros polímeros y en materiales compuestos.
- Uso en todo tipo de interruptores eléctricos, en "piezas ligeras" en la industria automotriz [2].

Figura 13. Estructura molecular de poliestireno, termoplástico.

Fuente: https://i2.wp.com/lacarlotamaderas.com/wp-content/uploads/2015/08/beneficios-del-fenolico.jpg?resize=768%2C432&ssl=1 **[13]**

2.2.3 Elastómeros

Los elastómeros hacen referencia al conjunto de materiales formados por polímeros que se encuentran unidos por medio de enlaces químicos adquiriendo una estructura final ligeramente reticulada [3].

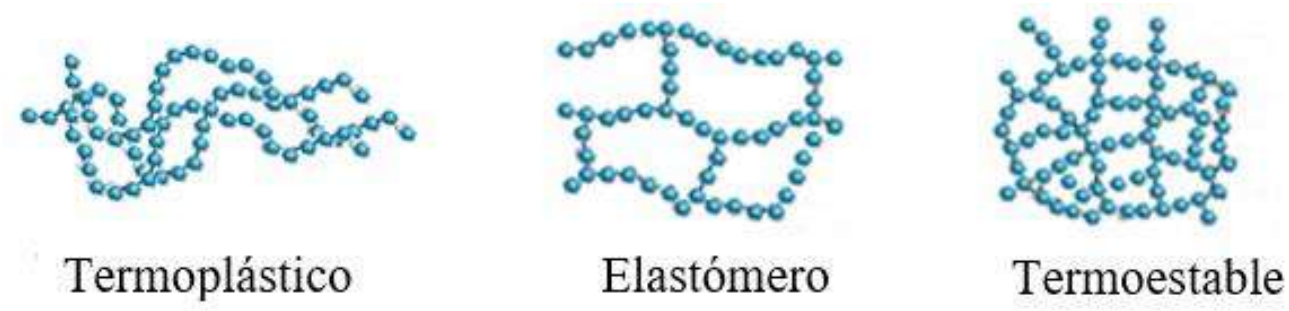


Figura 14. Modelos moleculares de los tres tipos de polímero.

Fuente: https://www.losadhesivos.com/IMAGENES/estructuras-polimeros.gif **[14]**

La principal característica de los elastómeros es su alta elongación o elasticidad y flexibilidad que disponen dichos materiales frente a cargas antes de fracturarse o romperse.

En función de la distribución y grado de unión de los polímeros, los materiales elastómeros pueden disponer de unas características o propiedades semejantes a los materiales termoestables o a los materiales termoplásticos.

2.2.3.1 Clasificación de los Elastómeros

La clasificación de los elastómeros se da en dos grupos basados en los tipos de polímeros que a los que ya se hizo mención en los puntos anteriores de este apartado. Siendo los elastómeros termoplásticos y los elastómeros termoestables. [3]

Elastómeros Termoplásticos son aquellos que al calentarlos presentan deformación, así como la fundición de su masa. [3] Los elastómeros termoplásticos (TPE) son una clase de materiales poliméricos que tienen el comportamiento elástico de caucho y la procesabilidad de termoplásticos. Los cauchos han sido de importancia estratégica desde el comienzo de la industria automotriz. Estos pueden funcionar como un caucho material. También tienen la capacidad de ser reprocesados cuando se calienta por encima de la temperatura de transición de fusión. El TPE tiene el comportamiento por debajo de la temperatura de fusión de siendo elástico como una goma termoestable. Además de poseer una capacidad de reprocesamiento aborda la reciclabilidad limitación de cauchos termoestables, por lo tanto, hay poca chatarra cuando se procesan elastómeros termoplásticos. Esto da TPEs una ventaja económica importante. También innecesario Los artículos de TPE se pueden volver a fundir y reprocesar para recuperar el material de desecho Normalmente esto se hace moliendo los artículos para hacer una miga TPE que se mezcla con TPE virgen durante el procesamiento. Esta capacidad

TPE proporciona un impacto ambiental importante, así como un impacto económico que lo vuelve muy redituable [4]. Elastómeros Termoestables son aquellos que al calentarlos no presentan deformación o tienden a fundirse a diferencia de los anteriores [3].

Figura 15. Banda elastómera anti-derrapante.

Fuente: https://materialesinteligentes.win/wp-content/uploads/2019/06/Qu%C3%A9-tipos-de-productos-se-elaboran-con-elastomeros-768x576.jpg **[15]**

A continuación, se describen algunos elastómeros básicos:

1. Caucho

El caucho es un polímero que surge como un material viscoso conocido como látex, en la savia de diversas plantas, así como también se puede confeccionar de una manera sintética debido a las cadenas de hidrocarburo que lo forman [5] dejando a los cauchos en disposiciones generales en dos grupos como son sintéticos y naturales. Sin embargo y para una practicidad en nuestro estudio lo podemos clasificar en seis tipos conocidos, como se muestra en la figura 17.

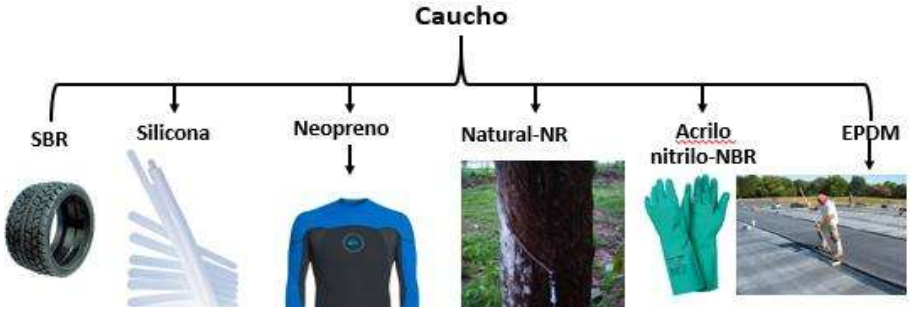


Figura 16. Cuadro demostrativo sobre los diferentes tipos de caucho.

Fuente: Propia **[16]**.

2. SBR Caucho de Estireno-Butadieno

Es un copolímero (polímero formado por la polimerización de una mezcla de dos o más monómeros) del Estireno y el 1,3-Butadieno. Este es el caucho sintético más utilizado a nivel mundial [7]. A medida que aumenta el contenido de estireno, el producto de la polimerización (SBR) asume más la característica de producto termoplástico, por lo que este tipo se utiliza siempre combinado con SBR normal, obteniéndose así mayor facilidad de trabajo. La mayor parte del SBR, cerca de 85 a 90%, es polimerizado por emulsión, siendo el restante 10 a 15% polimerizados en solución. En función de la temperatura de polimerización, el caucho obtenido se clasifica como "hot rubber" si la temperatura de polimerización es de unos 55 ° C y de "cold rubber" si la temperatura de polimerización se sitúa entre 5-10 ° C, esta última mejores características de trabajo. En cuanto al tipo de estabilizadores usados en la polimerización, el SBR está clasificado como SBR manchante (staining) y SBR no manchante [6].

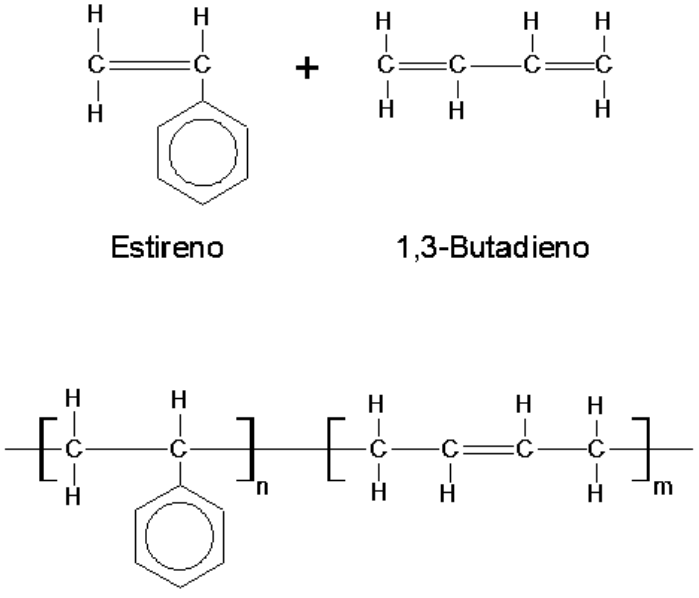


Figura 17. Modelo gráfico de una molécula SBR

Fuente: https://www.monografias.com/trabajos35/caucho-sbr/cau1.gif
[17]

Características:

- Excelentes propiedades mecánicas, moderada al desgarro.
- Precio más económico que el caucho natural.
- Inferior resiliencia en comparación con el caucho natural.
- Buena resistencia al envejecimiento y a la temperatura.
- Campo de temperatura: entre -50ºC y 90ºC.
- Buena resistencia química a muchos productos químicos inorgánicos, pero mala con ácidos oxidantes.

- Resistencia limitada a ácidos minerales, no siendo adecuada para líquidos orgánicos en general.
- Su resistencia puede aumentarse con una formulación adecuada [6].

Clasificación de Cauchos SBR

De acuerdo con el código del International Institute of Synthetic Rubber Producers (Instituto Internacional de Productores de Goma Sintética, IISRP), los copolímeros de SBR se clasifican en diferentes categorías:

- SBR serie 1000: Copolímeros obtenidos por copolimerización en caliente.
- SBR serie 1500: Copolímeros obtenidos por copolimerización en frío. Sus propiedades dependen de la temperatura de reacción y del contenido de estireno y emulsificante. La variación de estos parámetros afecta el peso molecular y por lo tanto las propiedades de la mezcla vulcanizada.
- SBR serie 1700: SBR 1500 extendida con aceite.
- SBR series 1600 y 1800: Se mezcla negro de carbón con goma SBR 1500 durante la producción mediante la incorporación de una dispersión acuosa de negro de carbón con el látex de SBR previamente extendido con aceite. Se obtiene una mezcla maestra cercana al producto final luego de la coagulación y secado [7].

Diferencias entre el Caucho SBR y el Caucho Natural

- SBR es inferior a la goma natural para procesado, resistencia a la tracción y a la rotura, adherencia y calentamiento interno.
- SBR es superior en permeabilidad, envejecimiento, y resistencia al calor y desgaste.
- La vulcanización de SBR requiere menos azufre, pero más acelerador [7].El efecto reforzador del negro de carbón es mucho más pronunciado sobre SBR que sobre goma natural.
- Para uso en neumáticos, SBR es mejor para vehículos de pasajeros, en tanto que la goma natural es preferible para vehículos utilitarios y autobuses.
- Las SBR extendidas con aceite se usan principalmente para fabricación de neumáticos, correas cintas transportadoras, etc.) y suelas de zapatos; las mezclas maestras de SBR se emplean en la producción en masa de cubiertas de neumáticos [7].

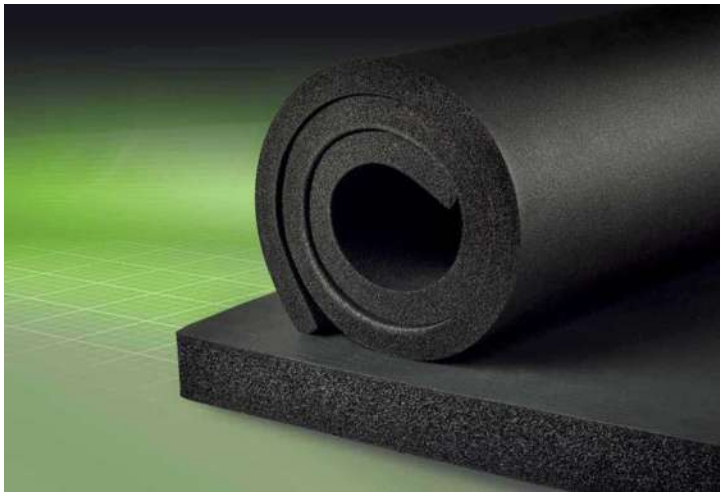


Figura 18. Aislante Termoacústico Para Interiores.

Fuente: https://img.archiexpo.es/images_ae/photo-mg/59602-4686561.jpg [18]

3. Caucho Natural NR

El Caucho Natural, NR como abreviatura Internacional es un hidrocarburo de gran importancia que se obtiene del *látex*, producido por varias moráceas y euforbiáceas intertropicales, pero solo se explota comercialmente la *Hevea Brasiliensis*. El *látex* se encuentra en forma de una suspensión coloidal acuosa, de aspecto lechoso, que contiene alrededor de 30% de caucho. El *látex* circula por una red de canales laticíferos, de los que se extrae practicando una incisión en la corteza, que secciona dichos canales y provoca la secreción del *látex* durante unas horas (llamado *sangrado*), hasta que por una coagulación espontánea se obtura la incisión, que ha de ser renovada para volver a repetir el proceso, operación que suele practicarse en días alternos **[8]**.

Figura 19. Sangrado de *látex* del árbol de goma, plantación en Brasil.

Fuente:
https://estaticos.muyinteresante.es/media/cache/760x570_thumb/uploads/images/pyr/55520750c0ea197b3fd50cb3/latex-2.jpg **[19]**

Características:

- Dureza de 35 a 90 shore.
- Excelentes propiedades mecánicas, de carga de rotura, alargamiento, abrasión y desgarro.
- Baja compresión y alta resiliencia.
- Excelentes propiedades dinámicas y de rebote.
- Rango de temperatura es de -50°C a 90°C.
- Buena resistencia a ácidos, bases y sales.
- Excelentes propiedades eléctricas [8].

Tabla Comparativa entre el Caucho Natural y el Sintético (SBR)

Propiedades	Caucho NR	SBR
Rango de Dureza	20-90	40-90
Resistencia a la Rotura	Buena	Regular
Resistencia a la Abrasión	Excelente	Buena
Resistencia a la Compresión	Buena	Excelente
Permeabilidad a los gases	Regular	Regular

Figura 20. Cuadro Comparativo entre el Caucho Natural y el Sintético (SBR).

Fuente: Propia **[20]**.

4. Silicona

Las siliconas forman parte del grupo de los polímeros elastómeros inorgánicos, refiriéndose esto a que no contienen átomos de carbono en su cadena principal, alternando en estos átomos de silicio y de oxígeno. Siendo los enlaces entre estos dos átomos de oxígeno con el de silicio en forma de tijera al abrirse y cerrarse proporcionando sus propiedades altamente flexibles [9].

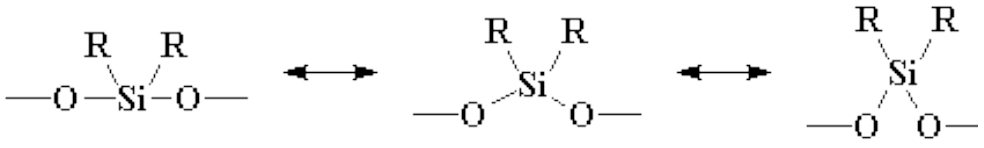


Figura 21. Molécula de silicona abriendo y cerrando. Fuente: https://pslc.ws/spanish/images/silic04.gif **[21]**.

Características:

- Excelente resistencia a los cambios climáticos y al envejecimiento.
- Estabilidad térmica.
- Alta repelencia al agua.
- Altas propiedades de adhesión.
- Capacidad para soportar la exposición a condiciones atmosféricas por periodos prolongados de tiempo.
- Resistencia a los rayos ultravioleta del sol.
- Volatilidad extremadamente baja.
- Inerte – no reacciona con la mayoría de los materiales.
- Resistencia química.
- Elasticidad, maleabilidad y flexibilidad duradera.
- Excelentes propiedades de aislamiento eléctrico.
- Resistencia a la tracción.
- Propiedades antiespumantes.
- Resistencia microbiana [10].

Aplicaciones:

- Los productos agrícolas que fertilizan y protegen las cosechas utilizan las propiedades de control de espuma, esparcibilidad y penetración de las siliconas para maximizar la cobertura de pulverización y absorción del suelo.
- Revestimiento, sellado e impermeabilizado de diversas uniones y juntas en automóviles, embarcaciones y aviones.
- También son utilizadas en bolsas de aire para diferentes tipos de vehículos.
- Tienen propiedades de humectación, así como la capacidad para esparcirse que garantizan suavidad y uniformidad en la aplicación de lociones y productos de limpieza facial.
- Son incompatibles al crecimiento microbiano
- Las siliconas han revolucionado la industria textil. Confieren una variedad de propiedades al "tacto" y mejoran las propiedades de las telas tales como la durabilidad, resistencia a la abrasión, repelencia al agua y control de arrugas. Las telas recubiertas con silicona son utilizadas para fabricar desde ropa hasta velas para navegar, paracaídas y globos aerostáticos.
- Los selladores de silicona mantienen las juntas de edificios y otras estructuras herméticas y a la vez elásticas.
- La silicona mejora la rentabilidad, durabilidad y desempeño de paneles solares y dispositivos fotovoltaicos ya que pueden soportar los implacables rayos del sol, año tras año. Las células solares están hechas de silicio, y las siliconas se utilizan en el montaje e instalación de los paneles como adhesivos, selladores, encapsulantes y como recubrimiento de protección [10][11].

Figura 22. Ejemplo de la aplicación de silicona como sellador.

Fuente: https://www.handfie.com///wp-content/uploads/2016/10/wysiwyg/Tecnicas/aplicaciones_de_silicona.jpg **[22]**

5. Neopreno

Este es un polímero derivado del cloropreno, conocido también como poli cloropreno. Utilizándose como base para producir adhesivos, así como un sellador para la elaboración de mangueras por su inercia química, siendo esta característica la que le permite un poco tendencia a reaccionar con pocas sustancias químicas [12].

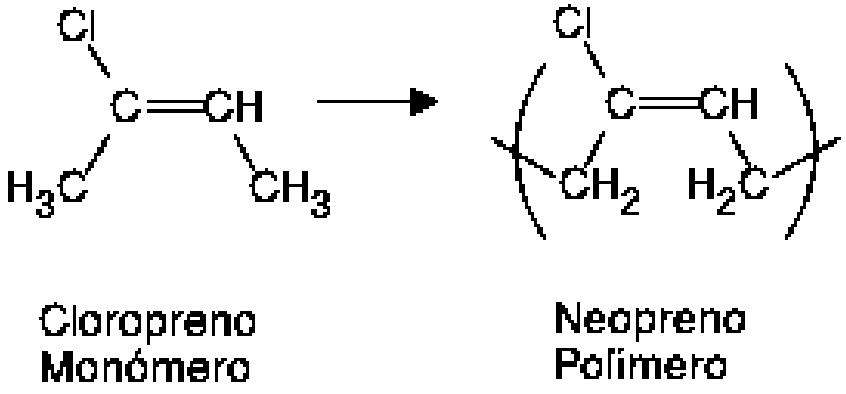


Figura 23. Reacción de Formación del Neopreno.

Fuente: https://www.textoscientificos.com/imagenes/quimica/xneopreno-1.png.pagespeed.ic.ptwotCdy6w.webp **[23]**.

Características:

- Alta resistencia al ozono.
- Resistencia aceptable a agentes químicos y solventes.
- No se distorsiona con la flexión.
- Resistencia a la luz del sol.
- Su estructura puede ser modificada por la copolimerización del cloropreno con el azufre.
- Resiste las inclemencias del clima y la torsión.
- Flexibilidad [12].

Aplicaciones:

- Trajes para buceo (aplicación más común).
- Juntas y tuberías.
- Tubos para laboratorio.
- Cintas y líquidos adhesivos.
- Recubrimiento de cables fuertes.
- Solventes.
- Neumáticos para coches.
- Control de vibración y aislamiento acústico, entre otras [12].

6. Acrilo Nitrilo-NBR

El caucho acrilo nitrilo- NBR o conocido frecuentemente como caucho nitrílico es un tipo de caucho sintético. Los nitrílicos son los cauchos sintéticos con mejor resistencia a los aceites e hidrocarburos alifáticos [13].

Figura 24. Caucho NBR utilizado en mangueras de combustible.

Fuente: https://www.decaucho.top/wp-content/uploads/2018/10/gasolina.jpg **[24]**.

Su resistencia a aceites e hidrocarburos es mayor al aumentar su contenido en acrilonitrilo (ACN). Se pueden clasificar en Bajo contenido (18% ACN), Medio contenido (34% ACN) y Alto contenido (50% ACN) [13].
La fracción que contiene de polibutadieno es la que le da sus características elásticas. Mientras que la fracción de poliacrilonitrilo es la que les proporciona su resistencia a compuestos no polares, tales como gasolinas, aceites y disolventes hidrocarbonados [13].

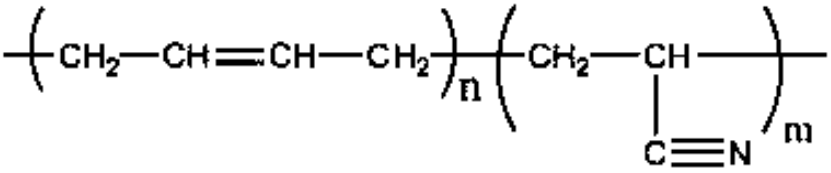


Figura 25. Molécula del Acrilo nitrilo NBR.

Fuente: https://4.bp.blogspot.com/-YaDrFTfzzi4/TyAApPNIQYI/AAAAAAAABrU/s0pA1Vwjas8/s1600/Nitrile_Butadiene_Rubber.jpg [25].

Tipos de Caucho Nitrilo

Caucho nitrilo carboxilado (XNBR). Este caucho ha sido químicamente modificado con ácido carboxílico. El resultado da una mejor resistencia a la abrasión y destrucción que el tradicional NBR. Las piezas en XNBR se aplican en montajes dinámicos tal como cierres y limpiadores de barras [13].

- **Caucho nitrilo hidrogenado (HNBR)**. Es resultado de hidrogenar el caucho acrilo nitrilo NBR original. Con esto resultan polímeros altamente resistentes a la temperatura, a los aceites calientes y al ozono [13].
- **Caucho nitrilo entrecruzado**. Son polímeros ramificados altamente entrecruzados por adición de un monómero difuncional. Estos productos se utilizan habitualmente en piezas moldeadas para generar, con suficiente fuerza de moldeo o presión, la eliminación del aire atrapado [13].
- **Caucho nitrilo con antioxidante**. Al caucho nitrílico original se le añade un antioxidante polimerizado, lo que provee de protección adicional al NBR durante prolongados tiempos de servicio en exposición de aire y fluidos [13].

Propiedades:

- Excelentes propiedades físicas.
- Buen comportamiento al hinchamiento en medios como los aceites o las gasolinas.
- Excelente resistencia a los aceites
- Es ideal para mangueras de transporte de aceites, rodillos de impresión, etc.
- Gran resistencia a la permeabilidad al aire y a otros gases hidrocarbonados como gas natural, propano y butano.
- Muy buena adhesión a los metales.
- Requiere del uso de agentes de protección para un mejor desempeño [13].

Aplicaciones:

- Juntas de estanqueidad de aceites y gasolinas en bridas, racors, pletinas, tanques y depósitos, etc.
- Juntas para gas y ácidos tipo diafragmas, membranas y deflectores.
- Manguitos de compensación en uniones de tuberías y canalizaciones.
- Protecciones y recubrimientos contra ácidos y aceites.
- Todas aquellas aplicaciones que han de mantener sus características elásticas y su resistencia mecánica después de un contacto prolongado o permanente con fluidos hidrocarbonados.
- Juntas y compensadores de expansión [14].

7. Caucho EPDM

El caucho EPDM es una mezcla entre etileno-propileno-dieno. Está compuesto entre un 45% y 75% de etileno, siendo en general más resistente cuanto mayor sea este porcentaje. Los cauchos EPDM pueden ser vulcanizados por azufre o por peróxidos. Son los cauchos sintéticos de más baja densidad [15].

Características:

- Gran aislamiento eléctrico.
- Excelente resistencia a los agentes atmosféricos.
- Resistencia ante ácidos, álcalis y a los productos químicos en general.
- No son adecuados en contacto con gasolinas, grasas, aceites y disolvente hidrocarbonados.
- Excelente resistencia al envejecimiento, incluso a la intemperie o altas temperaturas, al ozono y a la oxidación.
- Temperatura de trabajo entre los -40º y 140ºC [15].

Aplicaciones:

- Manguitos de compensación en uniones de tuberías y canalizaciones.
- Apoyos estructurales en edificaciones, bandas de apoyo de vigas y jácenas.
- Recubrimientos para aquellos entornos que estén en contacto con productos químicos.
- Aplicaciones exteriores ya que resisten bien los cambios de temperatura, ambiente marino, la acción del ozono y la climatología adversa.
- Juntas y compensadores de expansión [16].

Figura 26. Parque Infantil con caucho EPDM.

Fuente: https://www.decaucho.top/wp-content/uploads/2018/10/Parque-infantil-con-suelo-caucho-EPDM.jpg **[26]**.

2.3 Proceso de Manufactura.

El polietileno (PE) es probablemente el polímero que más se ve en la vida diaria, haciéndose con este plástico las bolsas para almacén, frascos de champú, juguetes e incluso chalecos a prueba de balas [22]. Este es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes. Las secciones gruesas son translúcidas y tienen una apariencia de cera. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados [21].

Figura 27. Muestra de Pellets de polietileno.

Fuente: https://concepto.de/wp-content/uploads/2018/10/polietileno2-e1539191423257.jpg **[27]**

Las propiedades de las resinas de polietileno se deben principalmente, sino exclusivamente a tres propiedades moleculares básicas: densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular. Estas propiedades básicas a su vez dependen del tamaño, estructura y uniformidad de la molécula de polietileno. Algunas de las propiedades que hacen del polietileno una materia prima tan conveniente para miles de artículos manufacturados son, entre otras poco peso, flexibilidad, tenacidad, alta resistencia química y propiedades eléctricas sobresalientes [21].

Figura 28. Envases de polietileno.

Fuente: http://moldplast.com.co/wp-content/uploads/2015/04/venta-envases-plasticos-600x391.jpg **[28]**

Tipos de Polietileno

En general hay dos tipos de polietileno:

De baja densidad (LDPE)

De alta densidad (HDPE).

El de baja densidad tiene una estructura de cadena enramada, mientras que el polietileno de alta densidad tiene esencialmente una estructura de cadena recta [21].

El polietileno de baja densidad fue producido comercialmente por primera vez en el Reino Unido en 1939 mediante reactores autoclave (tubular) necesitando presiones de 14.500 psi (100 Mpa) y una temperatura de unos 300 º C. El polietileno de alta densidad fue producido comercialmente por primera vez en 1956-1959 mediante los procesos de Philips y Ziegler utilizando un catalizador especial. En estos procesos la presión y temperatura para la reacción de conversión del etileno en polietileno fueron considerablemente más bajas. Por ejemplo, el proceso Philips opera de 100 a 150 º C y 290 a 580 psi (2 a 4 MPa) de presión [21].

Sobre 1976 se desarrolló un nuevo proceso simplificado a baja presión para la producción de polietileno, el cual utiliza una presión de 100 a 300 psi (0.7 a 2 Mpa) y una temperatura de unos 100 º C. El polietileno producido puede describirse como un polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y tiene una estructura de cadena lineal con ramificaciones laterales cortas, inclinadas [21].

Figura 29. Envases de polietileno de alta densidad.

Fuente:
http://www.dicterecuador.com/assets/images/subcategorias/ALTA%20DENSIDAD,%20SOPLADO.jpg **[29]**

2.3.1 Síntesis del Polietileno.
Estructura Química

El etileno (C_2H_4) es un hidrocarburo gaseoso comúnmente producido por el **craqueo de etano**, que a su vez es un componente principal del gas natural o puede ser destilado del petróleo. **Las moléculas de etileno se componen esencialmente de dos unidades metílicas** (CH_2) unidas entre sí por un doble enlace entre los átomos de carbono una estructura representada por la fórmula $CH_2 = CH_2$. Bajo la influencia de catalizadores de polimerización, el doble enlace puede romperse y el enlace simple extra resultante se utiliza para unirse a un átomo de carbono en otra molécula de etileno [23].

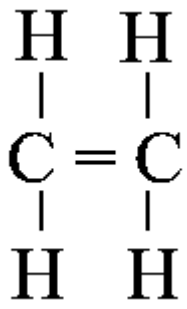


Figura 30. Molécula de Etileno

Fuente: Propia **[30]**

Este al ser un compuesto químico orgánico relativamente simple, tiene diferentes maneras para ser producido mediante mecanismos de reacción o polimerización, ya sea por radicales libres, polimerización aniónica, por coordinación de iones o cationes. Formando así mismo un tipo diferente de polietileno dependiendo de la reacción que lo produjo [24].

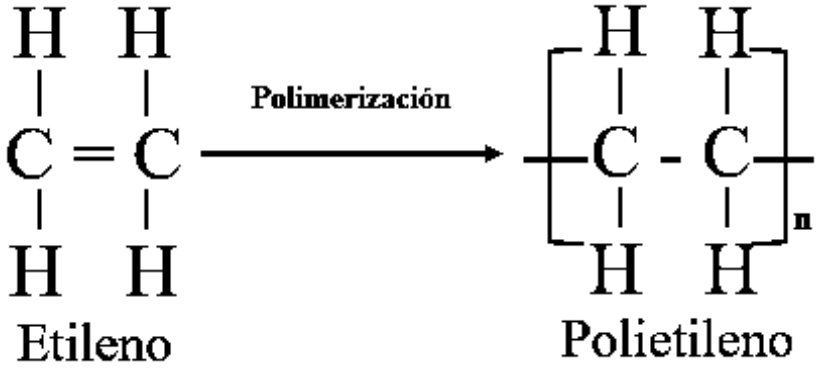


Figura 31. Reacción de Polimerización de Etileno a Polietileno.

Fuente: Propia [**31]**

Debido a que los catalizadores son altamente reactivos, el etileno debe ser de gran pureza. Las especificaciones típicas son <5 ppm de agua, oxigeno, así como otros alquenos. Contaminantes aceptables incluyen N_2, etano y metano. El etileno se produce generalmente a partir de fuentes petroquímicas, pero también puede ser generada por la deshidratación del etanol [26].

El etileno es una molécula bastante estable que se polimeriza en contacto sólo con los catalizadores. La conversión es altamente exotérmica. Para la polimerización del eteno se utilizan cloruros u óxidos metálicos. Los catalizadores comunes constan de cloruro de titanio (III), llamado catalizadores Ziegler-Natta. Otro catalizador común es el catalizador Philips, preparado mediante el depósito de Oxido de Cromo (VI) sobre sílica. El polietileno puede ser producido por polimerización de radicales, pero esta ruta es sólo de utilidad limitada y generalmente requiere un equipo de alta presión [26].

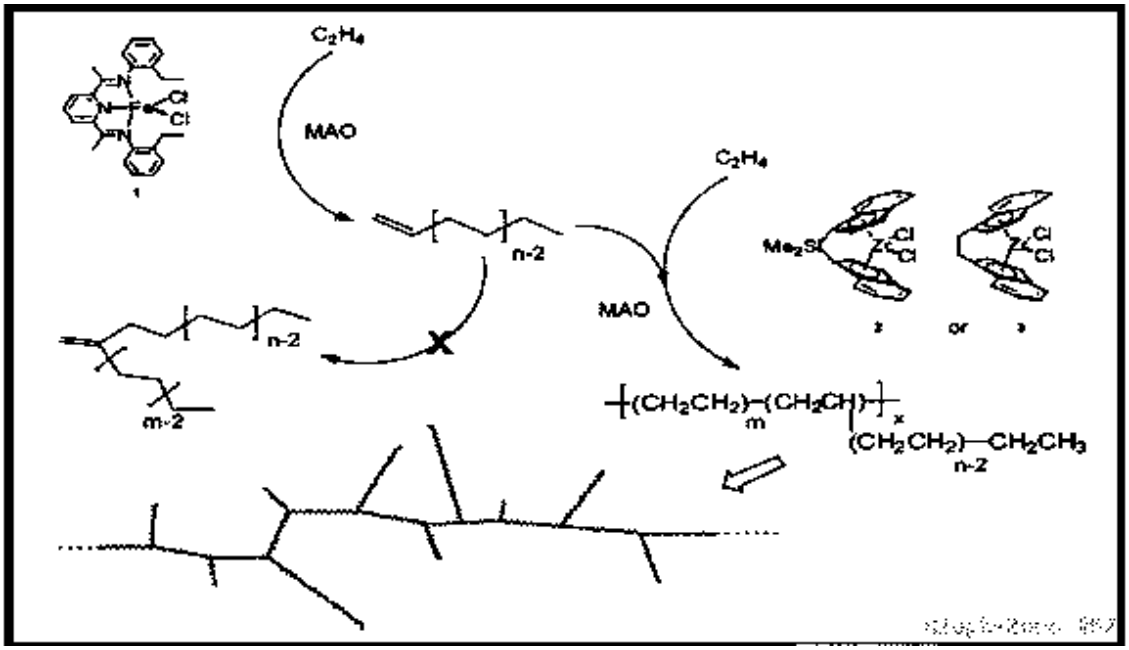
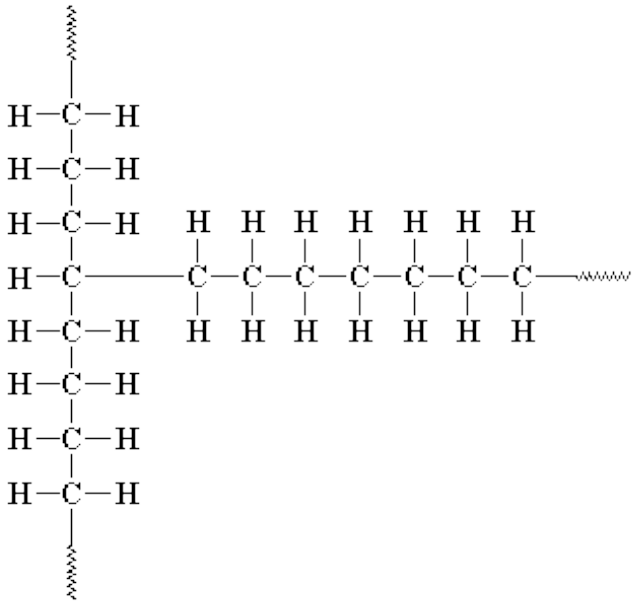


Figura 32. Síntesis del Polietileno a partir de Metalocenos.

Fuente: http://www.comprendamos.org/alephzero/57/57_sintesis.jpg **[32]**

La estructura simple repetida miles de veces en una sola molécula, es la clave para las propiedades del polietileno [23]. Siendo la forma en la que la estructura está constituida la que le dará sus propiedades, adoptando dos formas de manera general, como son una lineal y otra ramificada.

Las versiones ramificadas son conocidas como polietileno de baja densidad o LDPE. Más sin embargo también hay una versión lineal de este tipo polímero de baja densidad, conocido como un copolímero más duro y resistente con un soporte lineal [23] [25]. Este material LDPE (ramifico) ofrece una buena resistencia a la corrosión y baja permeabilidad, puede ser usado en aplicaciones donde la resistencia a la corrosión es importante, pero la rigidez, altas temperaturas y fuerza estructural no [25]. Las propiedades del LLDPE en el estado fundido y en la parte terminada son funciones del peso molecular, la distribución de pesos moleculares, DPM, y de la densidad de la resina.



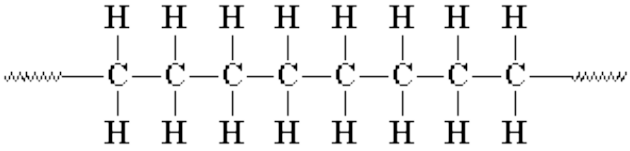
Fuente 33. Polietileno De Baja Densidad (Ramificada).

Fuente: http://www.pi-dir.com/quimica/industria/ldpe.gif **[33]**.

Las resinas lineales de baja densidad, son el crecimiento más rápido de los polietilenos, debido a su penetración el mercado de las películas ofreciendo un balance de resistencia y rigidez. El LLDPE es usado puro o en una mezcla rica con LDPE en equipos de extrusión diseñados para optimizar la salida [25].

Mientras las versiones de alta densidad son exclusivamente conformadas de cadenas lineales de etileno clasificándose en HDPE que es el Polietileno de Alta Densidad y UHMWPE que es el polietileno de alto peso molecular [23]. Es un material termoplástico parcialmente amorfo y parcialmente cristalino. El grado de cristalinidad depende del peso molecular, de la cantidad de monómero presente y del tratamiento térmico aplicado. El HDPE, representa la parte más grande de aplicaciones del polietileno. El HDPE ofrece una excelente resistencia al impacto, peso ligero, baja absorción a la humedad y alta fuerza extensible, además de que

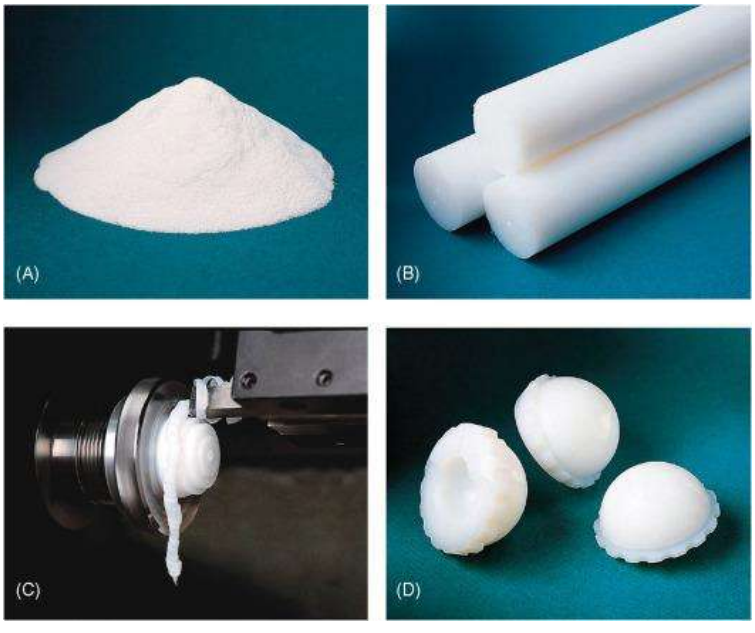
no es toxico. El proceso de obtención del HDPE se hace mediante la polimerización del etileno a baja presión [25].



Fuente 34. Polietileno De Alta Densidad (Lineal).

Fuente: http://www.pi-dir.com/quimica/industria/hdpe.gif **[34**]

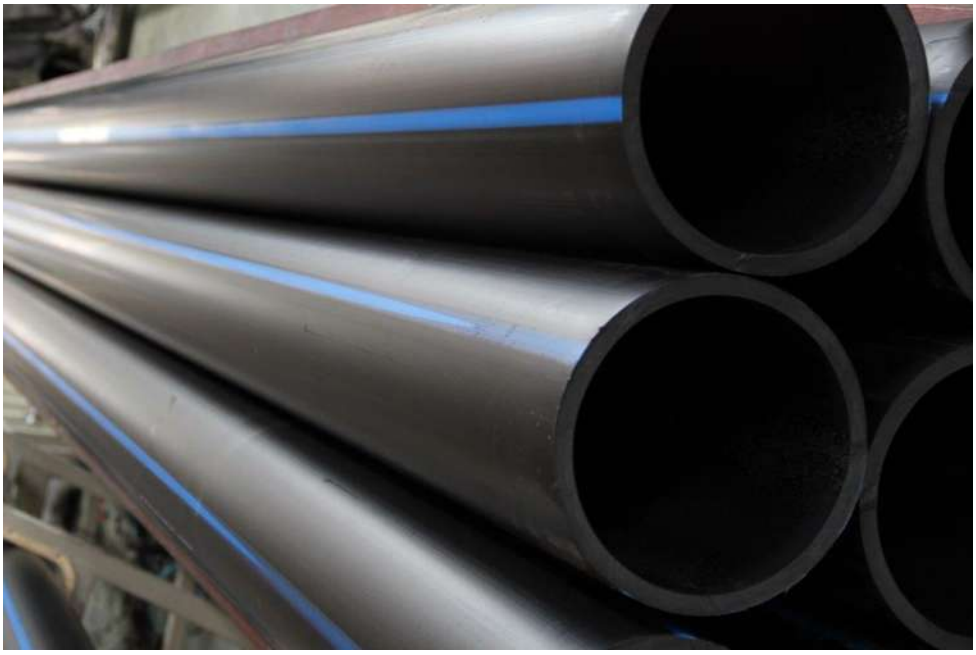
Mientras el UHMWPE es un tipo de polietileno que presenta un peso molecular ultra alto de tres a seis millones gramos por cada gramo-mol. El UHMWPE puede ser utilizado grandes láminas de este material en lugar de hielo para pistas de patinaje. El UHMWPE ofrece ciertas propiedades sobresalientes que lo califican como plástico de ingeniería. Su resistencia química es elevada y tiene una gran resistencia al envejecimiento, abrasión, al impacto y a la fatiga. Este material se conserva rígido aun cuando se someta a un calentamiento continuo, esto es debido a los puntos de entrecruzamiento que posee y que imposibilitan el deslizamiento de las macromoléculas [25].



Fuente 35. Algunas Aplicaciones del Polietileno De Alta Densidad.
Fuente: https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780323354011000028-f02-01-9780323354011.jpg **[35].**

Características:

- Tienen una alta resistencia química.
- Eléctricamente se consideran aislantes.
- Poseen un bajo coeficiente de fricción por lo que se consideran blandos.
- Tienen una baja resistencia mecánica, así como una baja resistencia a la degradación ambiental [20].



Fuente 36. Polietileno De Alta Densidad En Tuberías.

Fuente: https://http2.mlstatic.com/tuberia-de-polietileno-de-alta-densidad-lisa-y-corrugada-D_NQ_NP_804507-MLM26867495542_022018-F.jpg **[36].**

Polipropileno (PE)

Es un termoplástico que es obtenido por la polimerización del propileno, subproducto gaseoso de la refinanación del petróleo. Todo esto desarrollado en presencia de un catalizador, bajo un cuidadoso control de temperatura y presión. El Polipropileno se puede clasificar en tres tipos (homopolímero, copolímero rándom y copolímero de alto impacto), los cuales pueden ser modificados y adaptados para determinados usos [31]. Su **clasificación como elemento reciclable** lleva por símbolo un triángulo, dentro un 5 y debajo las letras PP El **polipropileno** es un tipo de plástico que puede ser moldeado con la calefacción solamente, es decir, es un termoplástico [32]. El polipropileno, pertenece al grupo de los termoplásticos, es una cadena larga de polímero, hecha del monómero de propileno. Después de la exposición del propileno al calor y a la presión con un catalizador activo metálico, el monómero de propileno se combina para formar una cadena larga de polímero, llamada "propileno", del griego "poli" que significa muchos y "mero" que significa unidades [34].

Tiene propiedades similares al polietileno (PE), pero con un punto de ablandamiento más alto [32]. Es un plástico muy duro y resistente, es opaco y con gran resistencia al calor pues se ablanda a una temperatura más elevada de los 150 º C [34].

Figura 37. Bolsas de polipropileno. Fuente: https://http2.mlstatic.com/productos-polipropileno-polietileno-degradable-D_NQ_NP_619852-MLM29463210638_022019-F.jpg **[37]**

Estructura Química

El polipropileno es un polímero estructuralmente vinílico, lo que se refiere a que está formado por una cadena principal exclusivamente de átomos de Carbono (grupos de metilos), que se ha formado mediante una reacción en cadena o de adición, al momento de la aplicación del catalizador.

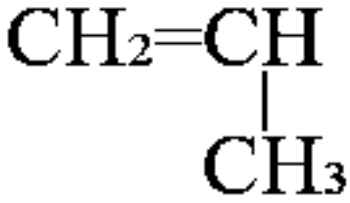


Figura 38. Monómero de Propileno.

Fuente: Propia **[38]**

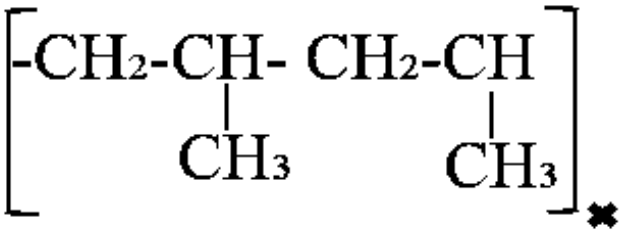


Figura 39. Polímero de Propileno

Fuente: Propia **[39]**

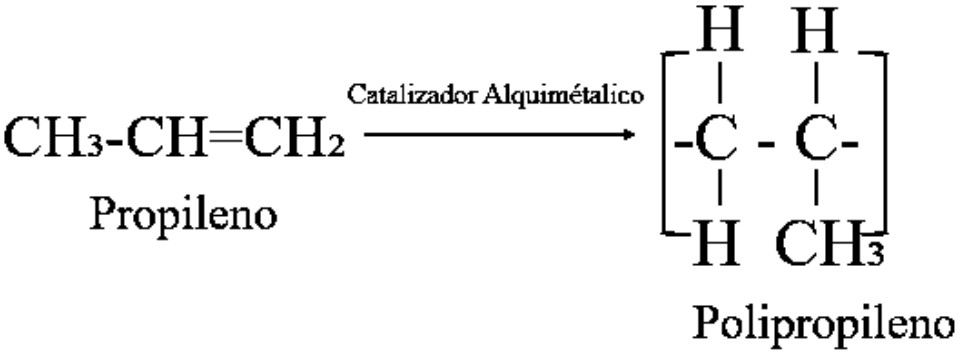


Figura 40. Reacción de polimerización del Polipropileno.

Fuente: Propia **[40]**

La clasificación más importante del polipropileno se basa en su estructura química [34]. Ya que es a partir de la tacticidad o formación que adopten las moléculas que lo forman el polímero adquiere sus propiedades. Cuando todos los grupos metilo están del mismo lado se habla de "polipropileno isotáctico"; cuando están alternados a uno u otro lado, de "polipropileno sindiotáctico"; cuando no tienen un orden aparente, de "polipropileno atáctico", siendo estos tres tipos los conocidos como homopolímeros [35], es decir un solo grupo de monómeros iguales en la misma cadena, mientras si se agrega entre un 5% y 30% de etileno durante la polimerización se forma el copolímero, los cuales tienen una mayor resistencia al impacto a comparación de los homopolímeros.

El polímero atáctico, es caracterizado por sus características pegajosas, amorfas y bajo peso molecular. Proveen el mismo efecto de un plastificante, reduciendo la cristalinidad del polipropileno. Una cantidad pequeña del polímero atáctico el final del polímero puede ser usado para proporcionar ciertas propiedades mecánicas, como rendimiento a bajas temperaturas, elongación, propiedades de procesabilidad y ópticas [34]. Las siguientes ilustraciones muestran la estructura molecular de los polímeros expuestos, siendo las esferas rojas las que simbolizan el átomo de Carbono y las azules las que representan en el Hidrógeno.

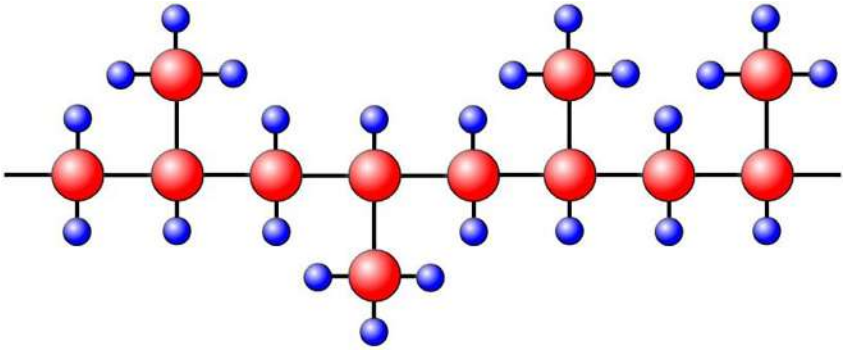


Figura 41. Polipropileno Atáctico.

Fuente:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2e/Atactic_polypropylene.svg/300px-Atactic_polypropylene.svg.png **[41]**

Polímero Isotáctico. Desde el punto de vista comercial, el polipropileno isotáctico es el más importante en comparación con el atáctico y el sindiotáctico; el propileno isotáctico es la estructura más stereo-regular del polipropileno. Por esto, es logrado un alto grado de cristalinidad. Como resultado, muchas propiedades mecánicas y de procesabilidad del polipropileno son altamente determinadas por el nivel de isotacticidad y su cristalinidad. Aunque el incremento de la cristalinidad del polipropileno hace al material menos duro que le polietileno [34].

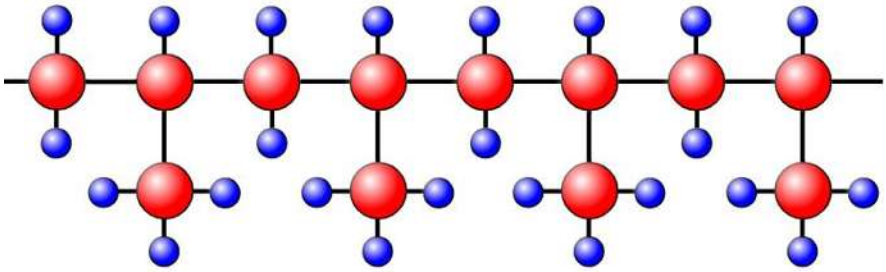


Figura 42. Polipropileno Isotáctico.

Fuente:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/84/Isotactic_polypropylene.svg/300px-Isotactic_polypropylene.svg.png **[42]**

El polipropileno sindiotáctico. Este tipo presenta muy poca cristalinidad debido a la forma alterna que toman los grupos metilos al estar en esas posiciones alternas a lo largo de la cadena, lo cual lo hace ser más elástico que el polipropileno isotáctico [35]. Este ha llegado a ser recientemente una realidad comercial [34].

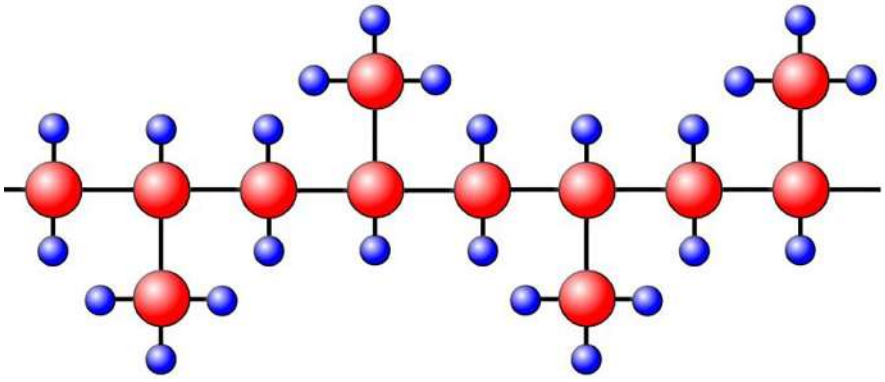


Figura 43. Polipropileno Sindiotáctico.

Fuente:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e6/Syndiotactic_polypropylene.svg/300px-Syndiotactic_polypropylene.svg.png **[43]**

Características:

- Resistencia a la distorsión térmica.
- Excelentes propiedades eléctricas.
- Resistencia a la fatiga.
- Químicamente inerte. Alta resistencia química a los disolventes.
- Poca resistencia a la radiación ultravioleta. Así como aumento de la sensibilidad a la luz UV y agentes oxidantes, sufriendo a la degradación más fácilmente.
- Moldeable, con alta resistencia a la fractura por fractura y flexión [32] [33].

Figura 44. Pellets de Polipropileno.

Fuente:
https://www.portaldelcomercio.com/image.php?width=360&height=203&cropratio=16:9&image=https://www.portaldelcomercio.com/images/anuncio/14435-img_1677.png **[44]**

En su mayoría los termoplásticos son sintetizados por el proceso de polimerización en el que muchas pequeñas moléculas se enlazan covalentemente para construir cadenas moleculares muy largas, llamadas ***monómeros*** *(del griego "mono" que significa "uno" y "meros" que significa "parte"*). La cadena formada por unidades de monómeros se llama ***polímero*** *(del griego "polis" que significa "muchos" y "meros" que significa "parte").* Sabiendo esto, ahora conocemos que el proceso por en que se combinan los monómeros se llama ***polimerización con aumento de cadena*** [1]**.**

Estructura del enlace covalente de una molécula etileno

La molécula de etileno C_2H_4, está constituida químicamente por un enlace covalente doble entre los átomos de carbono y por cuatro enlaces covalentes sencillos entre el carbono y los átomos de hidrógeno (como se muestra en la figura).

Este tipo de molécula hidrogeno-carbonada tiene un doble enlace de carbono a carbono, diciendo entonces que es una **molécula insaturada** [1]**.**

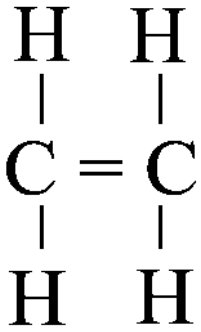


Figura 45. Molécula Etileno

Fuente: Propia **[45].**

Estructura del enlace covalente de una molécula de etileno activada

Cuando una molécula de etileno esta activada su enlace doble se encuentra abierto (como se muestra en la figura 38), por lo que se vuelve un enlace covalente sencillo, dejando un electrón libre para el enlace covalente con otro electrón libre de otra molécula [1].

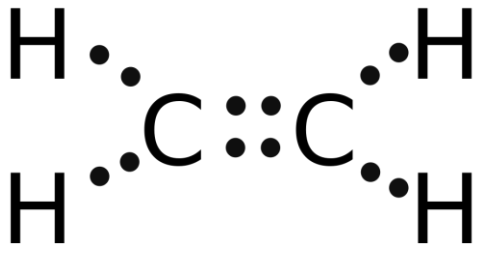


Figura 46. Molécula Etileno Activada
Fuente: Propia **[46]**

Así una vez que esto ocurre el proceso comienza, uniendo diferentes ***unidades monoméricas*** hasta formar una cadena molecular la cual conocemos como ***polímero***, llamando a este proceso ***polimerización*****.** Conociendo esto, decimos que el producto prolifero de la polimerización del etileno se le conoce como ***polietileno*** [1]**.**

Etapas de la Polimerización en Cadena

El conjunto de reacciones de polimerización que van desde monómeros de etileno hasta polímeros lineales como el polietileno, se ha dividido en tres etapas para su estudio, las cuales son: ***Iniciación (1), propagación (2) y terminación (3)*** [1]**.**

Iniciación

Para llevar a cabo este proceso se necesita un catalizador que ayude a la formación de radicales libres que para el caso del etileno serán los peróxidos orgánicos, los cuales son por su naturaleza poseen un electrón libre que puede unirse covalentemente a otro en otra molécula y formar el enlace [1].

En la siguiente figura podemos ver cómo funciona el mecanismo en que una molécula de peróxido de hidrógeno se rompe para formar dos radicales libres mediante la aplicación de calor y con esto formar el enlace covalente.

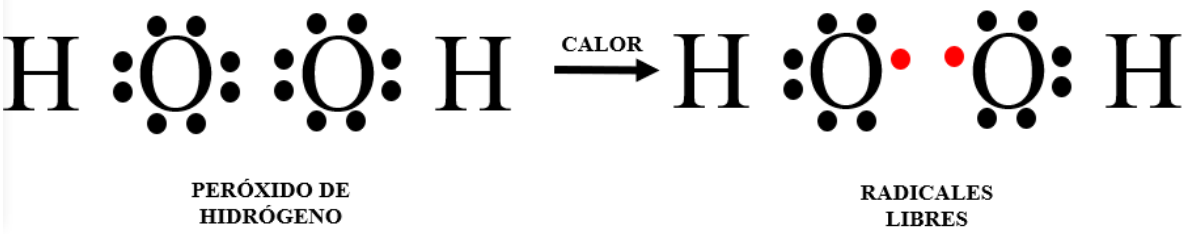


Figura 47. Formación de los radicales libres para el enlace covalente.

Fuente: Propia **[47]**

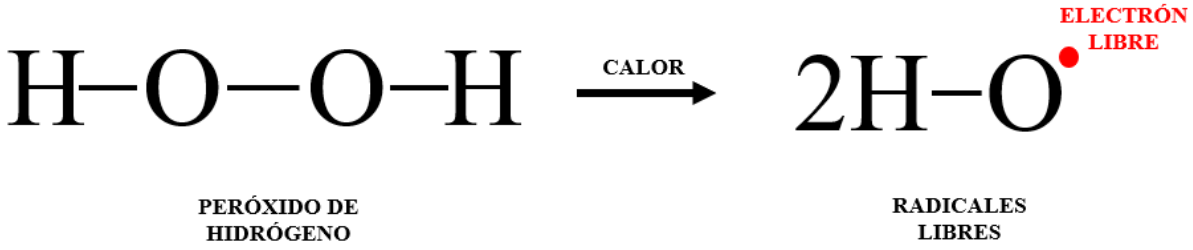


Figura 48. Formación de enlace covalente mediante notación en líneas rectas.

Fuente: Propia **[48]**

En el proceso de polimerización en cadena vía radicales, se precisa que un peróxido orgánico se descompone de la misma manera que el peróxido de hidrógeno **R-O-O-R** [1]**.** Donde R representa una cadena o grupo funcional orgánico.

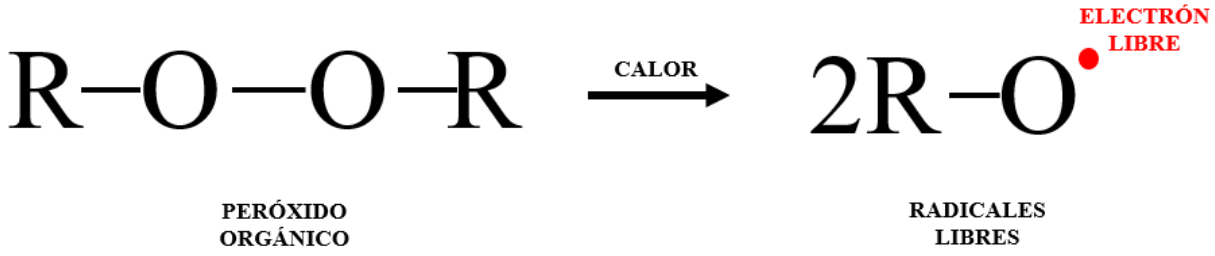


Figura 49. Polimerización en cadena por grupos funcionales orgánicos.

Fuente: Propia **[49]**

El radical libre formado en la descomposición del peróxido orgánico puede reaccionar con la molécula de etileno para formar un nuevo radical libre de una cadena más larga, como se muestra en la siguiente figura.

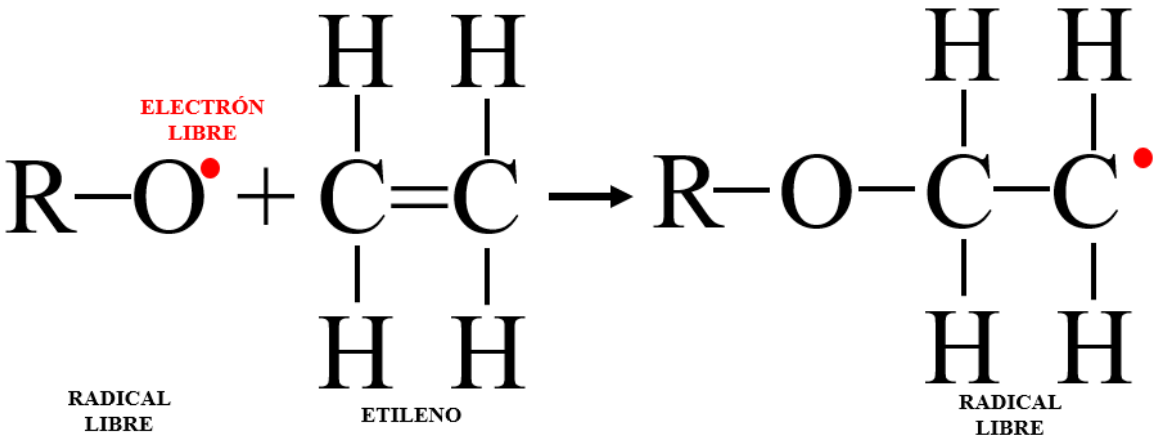


Figura 50. Reacción de polimerización en cadena larga del Etileno a partir de catalizadores orgánicos.

Fuente: Propia **[50]**

Propagación

Es la continuación de la reacción, añadiendo secuencias monoméricas para alargar la cadena, transformando el doble enlace de terminación del extremo del etileno en uno simple al

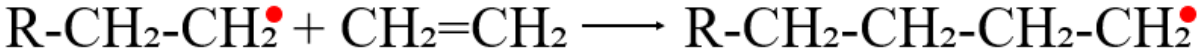


Figura 51. Propagación. Proceso de extensión de la cadena polimérica.

Fuente: Propia **[51]**

momento de la unión con el siguiente radical libre, contribuyendo así con la extensión con enlace covalente de dicho radical alargando así la cadena y por ende continuando con el proceso de polimerización [1].

Algo importante que se debe tomar en cuenta hasta este punto es que, el grado de polimerización o GP es un valor que dependerá de una manera significativa dependiendo del tipo de polímero [1], ya que esta cantidad nos dará las veces que se repite una unidad monomérica en el polímero de estudio [17]. Un ejemplo en este aspecto es que el GP para el polietileno comercial en promedio se encuentra entre 3500 y 25000 [1].

Terminación

Terminación o fase final del proceso del proceso, se da cuando un radical libre finalizador se adhiere o con la colisión entre dos cadenas combinándolas deteniendo el proceso de alargamiento de la cadena o propagación [1][18].

Así pues, decimos que este proceso de reacción biomolecular puede tener dos caminos: **Terminación por combinación y Terminación por desproporción** [19]**.**

Terminación por combinación, la cual da como resultado la formación de un polímero (muerto) con un tamaño igual a la suma de las unidades monoméricas de que constaba cada radical [19].

Terminación por desproporción, que da como resultado dos moléculas de polímero, una saturada y otra insaturada [19].

2.4 Manufactura De Los Termoplásticos
Procesos de Conformación de Elementos Poliméricos

Existen muchos procesos para transformar los gránulos o pastillas de plástico en productos conformados como pueden ser láminas, barras, secciones extruidas, tuberías o partes moldeadas acabadas [29]. Por ende, el procedimiento utilizado dependerá si el polímero es termoestable o termoplástico. Por ejemplo, si el material es un termoplástico se cuidará la temperatura de ablandamiento, así como la estabilidad atmosférica del material a conformar, junto con su geometría [30].

Así pues, de una manera más general los termoplásticos son calentados en condiciones suaves para poder conformarlos y posteriormente enfriarlos [29]. Algo bueno en este tipo de polímeros, ya que esta propiedad les da un punto beneficioso hablando económicamente de ellos al volverlos reciclables una vez que la vida útil del producto que fue termina, dando la posibilidad de volver a fundirlos y remoldar a algo nuevo [30]. Mientras los termoestables, al no estar completamente polimerizados cuando llega la etapa de procesado para dar una forma final, precisan una reacción química que entrecruce las cadenas poliméricas para dar lugar a un material polimérico reticulado. Consiguiendo el final de la polimerización con una aplicación de calor y presión o por la acción catalítica a altas temperaturas o temperatura ambiente [29]. A diferencia de los termoplásticos, los termoestables no son reciclables ya que estos no se funden. Son más inertes químicamente que los termoplásticos y utilizan temperaturas de trabajo más elevadas que los termoplásticos [30].

El **Moldeo** es el procedimiento más común para conformar plásticos, existiendo varias técnicas como son: por compresión, por transferencia, por soplado, por inyección y por extrusión [30]. Las cuales se explicarán a continuación dependiendo del tipo de polímero ya sea, termoestable o termoplástico.

Figura 52. Trabajadores procesando pellets por inyección.
Fuente: http://www.plastico.com/documenta/imagenes/114227/Maquinas-de-moldeo-por-inyeccion-automatizadas-y-en-combinacion-con-fabricacion-aditiva-de-Arburg-GR.jpg **[52]**

Proceso de Fabricación de Materiales Termoplásticos

Moldeo por Inyección. Este proceso consiste en la fusión del material, junto con colorantes o aditivos, para luego forzarlo bajo presión dentro de un molde. Este molde es refrigerado, el material se solidifica y el artículo final es extraído. Este método es usado para hacer muchos tipos de artículos, como por ejemplo frascos, tapas, muebles plásticos, cuerpos de electrodomésticos, aparatos domésticos y piezas de automóviles. El polipropileno es apreciado por su fácil proceso y por sus excelentes propiedades finales, que incluyen baja densidad, alto brillo y rigidez, resistencia térmica y química, entre otras [27].

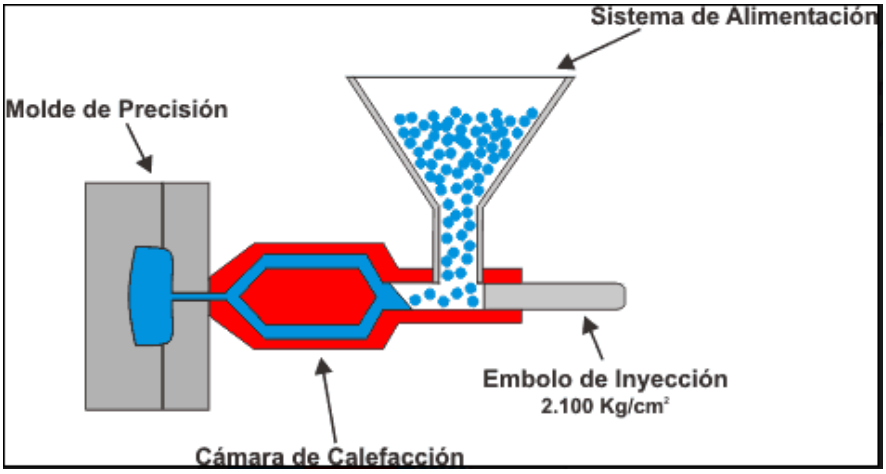


Figura 53. Moldeo por Inyección.

Fuente: https://lh6.googleusercontent.com/uXSwlKt0QmdYZDEa5S3B_BGZXhXZ9GGsamHjgD54YX4PQfu2eYV7kkEMRUaotnVpZ68eSsmevem5fe-iBol3FCi1i2Cwdmlez-dfiKIrutmFxGuJxRzHznOeNnHaRcojL9gkd-RW **[53]**

Las principales ventajas de este moldeo son la de facilitar la producción de piezas de alta calidad a altos niveles de producción, los procesos tienen relativamente un bajo costo, se pueden conseguir buenas terminaciones en las partes moldeadas facilitando la producción de formas complicadas y es un proceso altamente automatizado sin embargo; sus desventajas se presentan en el alto precio de la maquinaria, que implica una alta necesidad de producir un gran número de piezas, así como controlar estrechamente el proceso para conseguir un producto de calidad [36].

Extrusión. La extrusión de polipropileno es un desarrollo industrial mecánico, en donde se ejecuta una acción de moldeado del plástico que, por fluido continuo con presión y empuje, se le hace pasar por un molde específico que le ofrecerle la forma deseada. El plástico es calentado hasta el estado de fusión por resistencias que están en el cañón de la extrusora, y el husillo fuerza a la resina a pasar por el cabezal otorgándole la forma deseada, bien sea de lámina, alguna forma cilíndrica como los tubos de PVC y tiras [28].

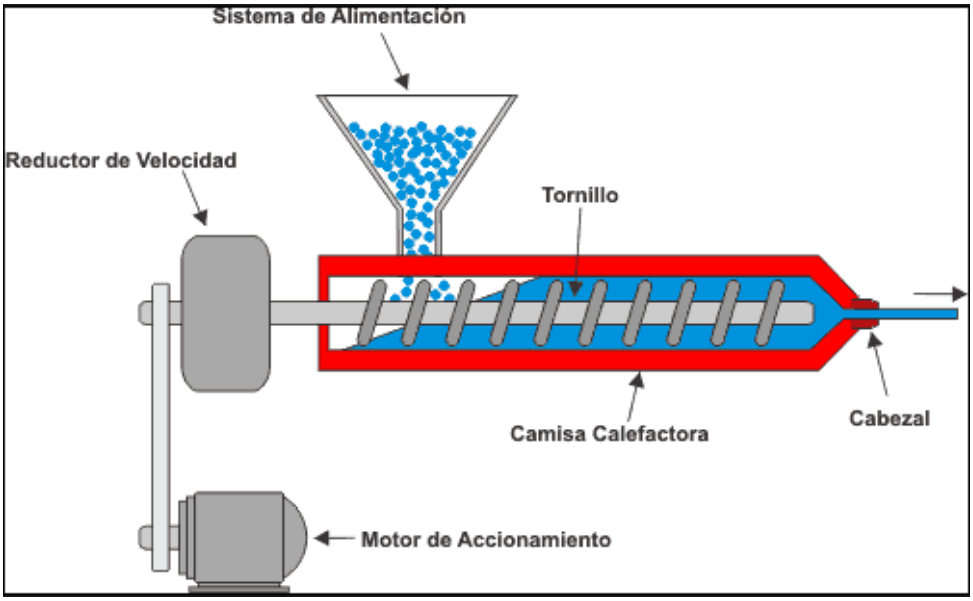


Figura 54. Proceso de Moldeo por Extrusión

Fuente: https://lh5.googleusercontent.com/b67e5JgK34hwEwmV_EyOdQZY1hmjJre-lyox7f_DKuVBnnNZl2yyFVaQixWcEsOTb2TPZA5dDPzChFz-FIkikzfSgiqmR3o2NERuXdqHiJnt5sH6ZEwCASDI63anLPSTTynTMbrq **[54]**

Este proceso se lleva a cabo mediante la inyección de una resina termoplástica dentro de un cilindro calentado (camisa calefactora) y al plástico fundido se le fuerza a pasar, mediante un tornillo giratorio, a través de una abertura o cabeza que conduce a una matriz adecuadamente preparada para obtener configuraciones continúas como se muestra en la Figura 54. Después de la salida de la matriz, la pieza extrusionada debe ser enfriada por debajo de la temperatura de transición vítrea para asegurar una estabilidad dimensional, siendo este enfriamiento realizado normalmente mediante un sistema de agua o chorro de aire [37].

Moldeo por Soplado. El moldeo por soplado es un desarrollo que se utiliza para crear piezas de plástico huecas como botellas o recipientes desechables, esto se consigue por medio de la propagación del material a través de la presión que ejerce el aire en las paredes de la preforma si se tratase de soplado por inyección. Este desarrollo se constituye de numerosas fases, la primera es la obtención del material a soplar, luego viene la etapa de soplado que se ejecuta en el molde que tiene la geometría final, probablemente haya una etapa intermedia entre ambas para calentar el material si fuera primordial, a continuación, se enfría la parte y al finalizar el proceso se expulsa. Para hacer más simple el enfriamiento de las piezas los moldes están provistos de un sistema de refrigeración y es así como de esta forma se aumenta el nivel productivo [28].

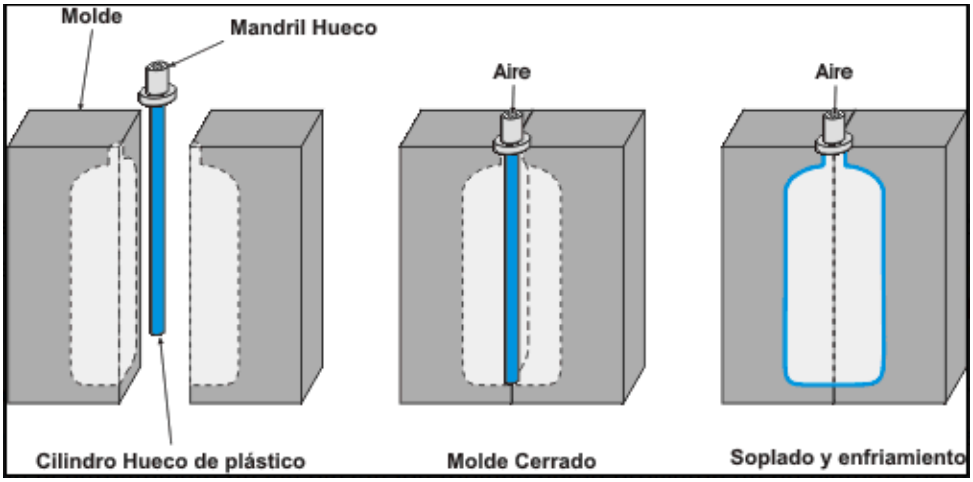


Figura 55. Proceso de Moldeo por Soplado

Fuente: https://lh3.googleusercontent.com/n8lpoMrbWajnxWKFNisZKBDXcxlgFeQ9ycwS_00RxYW31Y8VNAiSpfHwg4tEnKkSBQ9Dw83NZNnaRfi9n24mW8hdQJtzYbEs8ksHnr7EMJu-c89AnNh4_dqQC2ZsU6v0lgcKvit- **[55]**

Proceso de Termoformado. La técnica de termoconformado o Termoformado es un desarrollo que consistente en calentar una plancha o lámina de termoplástico semielaborado, de manera que al ablandarse puede ajustarse a la forma de un molde por acción de presión al vacío o por medio de un contra molde. De esta forma se otorga la construcción de piezas de

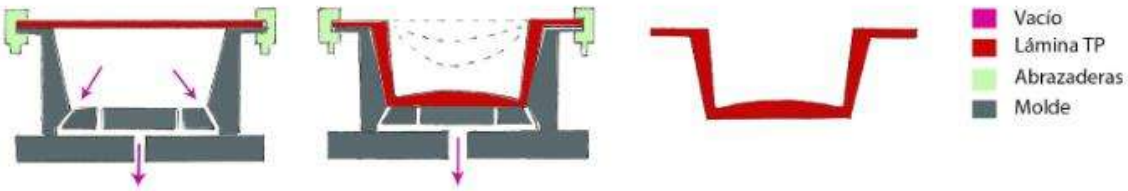


Figura 56. Proceso de Termoformado.

Fuente: https://lh4.googleusercontent.com/gTcXF1fYndhZv-RMiHPIBetH8MR1Otjb_qZ9wsCojpQMzu2pxphwwh6YIe4qo9VoM-y5bsLhoBQdk3MqSuoiCeDyjPoKfkekk0w7vwNb5ox7VMXQpH9rSHIyu8qRudA_WEClmyol **[56]**

enorme superficie y estrechas paredes, como son bañeras, cuadros interiores de electrodomésticos, cuadros de puertas de coches o embarcaciones. Toda clase de envases de industria alimentaria, como son vasitos de yogur, hueveras, envases con diferentes cavidades para repostería, tarros particulares de mantequilla o mermelada, al igual que hay otros productos que se fabrican por este procedimiento como son las advertencias de tránsito, complementos de lámparas, cajones, vajillas, envases para alimentos, juguetes, cabinas con transparencia de aviones o limpiaparabrisas de barcos [28].

2.5 Problemática Ambiental Generada Por Los Plásticos
Caso Especial De La Contaminación Del Agua Por Los Microplásticos

Los microplásticos o microesferas, son partículas de plástico que miden menos de 5 milímetros, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) utiliza este parámetro para clasificarlos [37]; sin embargo, hay autores que aplican la misma norma a partículas <2mm, de <1 mm, o incluso de <500 µm. Como Anthony L Andrady que apuntan a la necesidad de emplear tres términos diferentes para tres rangos de tamaños por debajo de los 5 mm en función de las distintas características físicas y los impactos biológicos que ocasionan, clasificándolos en: mesoplásticos (500 µm – 5 mm), microplásticos (50 – 500 µm) y nanoplásticos (<50 µm) [38].

Figura 57. Concentración de microplásticos.

Fuente: https://ingenierowhite-yg0kpbofhvqfr.netdna-ssl.com/sitio_core/wp-content/uploads/2019/08/microplasticos.jpg **[57]**

Estos fragmentos se encuentran presentes en una multitud de productos de higiene como cremas exfoliantes, pasta dental, jabones, en las fibras sintéticas de la ropa, entre otros [37]. Dando así de una manera más generalizada una clasificación en dos tipos, los cuales entran en el grupo de los primarios y los secundarios.

Microplásticos primarios, se consideran como aquellos que, después de su uso, llegan al medio natural en su forma original, es decir, en el mismo estado en el que se han sintetizado. Este tipo, se encuentra mayoritariamente en forma de gránulo (microesferas) por lo que una vez se usan, se cuelan por el desagüe y debido a su pequeño tamaño, se pierden entre los filtros y no se tratan en las depuradoras [39]. Estos son fabricados específicamente para ser utilizados en productos como: exfoliantes, dentífricos, productos de limpieza, entre otros [37].

Microplásticos secundarios, son aquellos que se degradan o se separan de otro material, ya sea por un proceso de deterioro o de deshechos plásticos más grandes [37]. Por lo tanto, esto significa que proceden de la **fragmentación de grandes estructuras sintéticas** o bien, de la liberación de fibras durante el lavado de telas, prendas de ropa y alfombras (microfibras) [39]. Por ejemplo, aquellas microfibras que se desprenden de ciertas prendas en el momento de lavarlas y que por su tamaño no pueden ser filtradas [37].

Figura 58. Contaminación con plásticos que tienden microplásticos secundarios.

Fuente: https://www.elheraldodesaltillo.mx/wp-content/uploads/2019/03/Hidrocarburos-plaguicidas-y-pl%C3%A1sticos-principales-contaminantes-del-Golfo-de-M%C3%A9xico.jpg **[58]**

Ambas categorías son extremadamente **tóxicas y persistentes en el medio**. Esto se debe principalmente al origen de sus componentes, formados mayoritariamente por dos tipos de plástico el polietileno y el polipropileno [39].

El primero, **el polietileno** (PE), es un componente poco degradable pero muy simple y económico de sintetizar, por no decir que es el componente plástico que más se utiliza a escala mundial, como por ejemplo en bolsas de plástico, botellas de plástico, algunos cosméticos y jabones. El segundo es **el polipropileno** (PP), utilizado normalmente para fabricar tapones y fibras sintéticas de prendas de ropa y otras telas textiles [39].

Hay más plásticos derivados que contribuyen en la **contaminación por microplásticos**, como por ejemplo el poliestireno (PS), el polivinilo (PV) o el nylon, que actúan con la misma toxicidad y agresividad sobre el medio ambiente que los mencionados con anterioridad [39].

Efectos en la biota y la cadena trófica

Una vez conocido el tema y origen de estos, cabe en gran importancia hacer la mención de las consecuencias y afectaciones producidas por su presencia en el medio, siendo más puntuales el medio acuático, el cual es el que se encuentra más afectado por este tipo de contaminante. La presencia de esto, puede afectar a los seres vivos del medio de diversas formas, pudiendo identificar como principales, ser ingeridos, transferirse a través de la cadena trófica, interaccionar en la incorporación de otros contaminantes, así como modificar los

Figura 59. Afectación por plástico en la fauna marina. Fuente: https://revistamarina.cl/wp-content/uploads/2018/06/plastico-en-el-mar3-612x422.jpg **[59]**

hábitats del medio marino [40]. Los microplásticos pueden envenenar a los animales cuando son ingeridos, lo cual puede afectar de manera negativa al suministro de alimento de los seres humanos, teniendo registros que indican que más de 260 especies, incluidos invertebrados, han ingerido plástico o han quedado enredados en elementos plásticos, siendo la segunda afectación mencionada la que les causa por lo regular muerte por cortes profundos, úlceras o simplemente por inanición [41].

Más sin embargo los microplásticos son más dañinos por su efecto invisible, al ser ingeridos por estas especies, sufriendo directamente intoxicación o un efecto de transporte que, al ser consumidos por elementos simples en la cadena alimenticia, después serán consumidos por elementos más complejos que podrían o serán consumidos por el ser humano, causando afectaciones más amplias que abarcan toda la cadena.

Al ser confundidos con alimentos tradicionalmente [41], los mamíferos marinos, tortugas y aves marinas han sido los testigos mortales más evidentes de estas afecciones, si bien cada vez es más amplio el rango de organismos afectados, incluidas especies de peces e invertebrados y hasta los diminutos copépodos. Según un estudio reciente, el número de especies de aves, tortugas y mamíferos marinos afectados por esta causa ha aumentado de 143 (33%) a 233 (44%), y en particular para el caso de las aves, la presencia de plásticos en las colonias de aves marinas y costeras y su ingesta es cada vez mayor. Una de las primeras aves que atestigua esta ingestión fue un paíño boreal en Terranova en 1962. La primera tortuga con plástico conocida data de 1968, y la primera ballena en 1979. Incluso el caso de los peces, a pesar de ser menos evidente, es también conocido desde 1972. Actualmente, se han documentado casos de ingestión de macroplásticos en un amplio abanico de organismos,

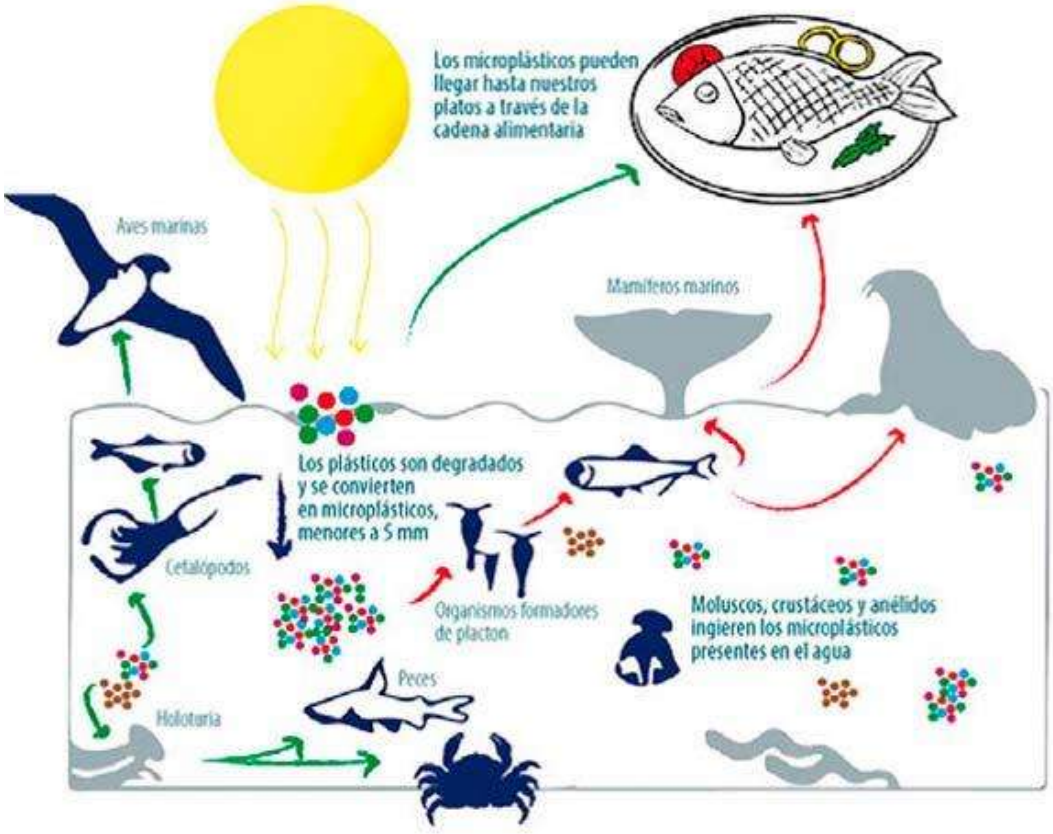


Figura 60. Ingesta de plástico en la fauna marina a través de la cadena trófica.

Fuente: https://www.salyroca.es/media/salyroca/images/2017/09/12//2017091217144219213.png
[60]

incluyendo cetáceos dentados, como los zifios, delfines o los cachalotes, hasta algunas especies de peces de valor comercial como el arenque y la caballa, los atunes del Mediterráneo y el bacalao del Atlántico [40].

La ingestión de microplásticos por organismos de los eslabones inferiores de la cadena trófica (fitoplancton y zooplancton) puede ser una ruta de entrada para niveles superiores de la cadena trófica, a través del consumo de presas previamente contaminadas por estos elementos. Además, el hecho de que parte del zooplancton realice migraciones diarias a diferentes profundidades le convierte en un vector de transporte de microplásticos hacia mayores profundidades de las que habitualmente se encuentran estos elementos, estando disponibles para diversas cadenas alimenticias. Estudios realizados en los últimos años han demostrado la transferencia trófica de microplásticos entre peces y cigalas, y entre copépodos

Figura 61. Impactos de los microplásticos y macroplásticos.

Fuente: https://i.pinimg.com/originals/15/27/ef/1527efdbd109a241377f6c29306d974e.jpg **[61]**

y macrozooplancton. Aunque aún son escasos los estudios de transferencia trófica hasta los eslabones superiores de aves acuáticas y mamíferos marinos, algunos trabajos, como por ejemplo el realizado por Erickson y Burton en 2003, ya han demostrado esta transferencia. En este caso, encontraron microplásticos en lobos marinos, y los investigadores determinaron que la presencia se debía a la ingesta de Electrona subaspera (una especie de pez linterna), que a su vez había obtenido los microplásticos ingiriendo copépodos, que se encuentran dentro del mismo rango de talla que los microplásticos finales encontrados en los lobos marinos [42].

Microplásticos en alimentos y sus consecuencias

Parte de ese plástico acaba inevitablemente en el plato. La cantidad ingerida dependerá del menú. Los amantes del marisco son quienes lo tienen peor: un estudio de la Universidad de Gante (Bélgica) estima que se tragan unas 11.000 partículas de plástico al año. De esta cantidad, unas 100 partículas se acumulan en el cuerpo y el resto se eliminan [43].

Muchas especies de peces **comen plástico como si fuera plancton,** y algunas incluso lo prefieren, con nefastas consecuencias para su salud, por supuesto. Aunque estas partículas se concentran en los sistemas digestivos de los peces, las más pequeñas, las nanopartículas se filtran hasta los músculos y no pueden evitarse por muy bien que se limpien. Así, las micropartículas **se encuentran en pescados de consumo humano** como el bacalao, el abadejo o la caballa. “Microplásticos contaminantes en los tejidos comestibles del pescado comercial” [43].

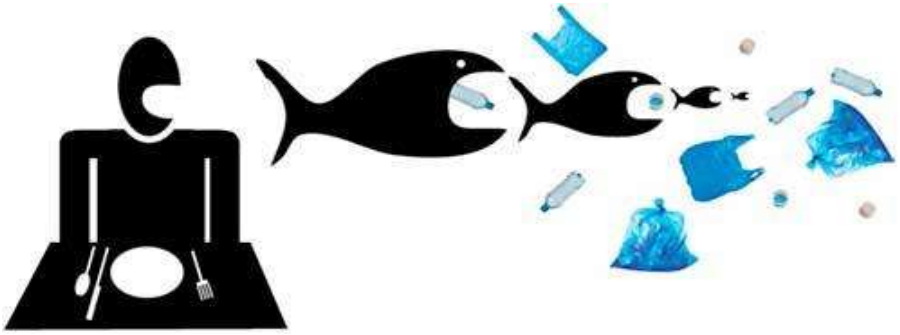


Figura 62. Microplásticos a través de la cadena alimenticia.

Fuente: http://www.delfinio.com/wp-content/uploads/2017/09/cadena_alimenticia.jpg
[62]

Los daños en la salud son causados por el polímero y sobre todo por los **componentes tóxicos** que incorporan, como bisfenoles, ftalatos, antimicrobianos, retardantes de llama, colorantes y otros agentes químicos.

Figura 63. Evidencia de la presencia de microplásticos en heces humanas.

Fuente: https://www.tekcrispy.com/wp-content/uploads/2018/10/microplasticos-2.jpg **[63]**

Una vez dentro de la cadena alimentaria humana, los microplásticos cargan con compuestos tóxicos como los hidrocarburos policíclicos aromáticos, los bifenilos policlorados, las dioxinas o los pesticidas que se encuentran en el agua [43].

Cuando los plásticos son ingeridos, estas sustancias pueden liberarse en el intestino o **interferir con la absorción de nutrientes** o los procesos fisiológicos. Muchas se relacionan con trastornos de los sistemas endocrino, nervioso e inmunitario, y con enfermedades crónicas, degenerativas, neurológicas e, incluso, cáncer [43]. La presencia de estas macropartículas de plástico de en el intestino podría afectar la respuesta inmune del sistema digestivo o podría ayudar a la transmisión de químicos tóxicos y patógenos, advirtieron los investigadores [44].

Al respecto, el investigador Philipp Schwabl, catedrático en la Universidad Médica de Viena y autor principal del estudio, puntualizó:

"Aunque hay algunas indicaciones iniciales de que los microplásticos pueden dañar el tracto gastrointestinal al promover reacciones inflamatorias o la absorción de subproductos dañinos, se necesitan más estudios para evaluar los peligros potenciales que representan los microplásticos para los seres humanos" [44].

Según la ecotoxicóloga Heather Leslie, de la Universidad de Maine, las nanopartículas de plástico podrían inducir respuestas inmunitarias, **alterar la expresión de genes** y causar muerte celular, entre otros efectos. Podrían, incluso, traspasar la placenta y la barrera hematoencefálica que protege el cerebro [43].

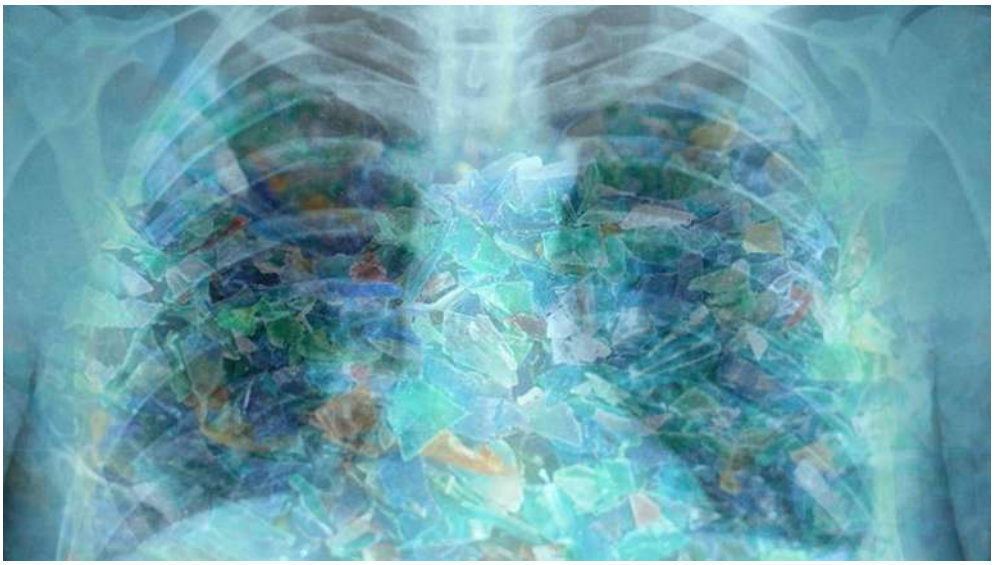


Figura 64. Imagen demostrativa de microplásticos no excretados.

Fuente: https://ecoosfera.com/wp-content/imagenes/2019/06/plastico-comida-cuanto-ingerimos-microplastico-consecuencias-3.jpg **[64]**

2.6 Reciclaje de Plástico

El proceso de reciclaje del plástico pasa por varias fases. Dejando en síntesis el proceso, en primer lugar, se recolecta en industrias o en los contenedores de color amarillo, se limpian con productos químicos, se seleccionan por tipo de plástico, y posteriormente se funden para obtener nueva materia prima, que puede moldearse de nuevo [45]. Así pues, la clasificación se dará en siete grupos, asignando el "Código de Identificación de Plásticos, identificándolos con un número del 1 al 7 ubicado al interior del símbolo internacional del reciclado (triangulo en flechas de seguimiento) [46].

Figura 65. Depósitos para selección de reciclaje. Fuente: http://www.fajardopr.org/web/images/stories/generales/recycle-containers%20crop.jpg **[65]**

Estos símbolos desarrollados en 1988 por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI por sus siglas en inglés), identifican el contenido de resina del recipiente en el que se han colocado los símbolos. Durante más de 20 años, el sistema del Código de Identificación de Resinas de la SPI ha facilitado el reciclaje de los plásticos después de utilizados por el consumidor [48]. Una vez conocido esto podemos comenzar con la denominación de cada uno, así como sus características.

Figura 66. Códigos De Identificación.

Fuente: https://2.bp.blogspot.com/-_11hF9HgXgE/TjFvrWpMFuI/AAAAAAAAAys/vk59hpJxvjM/s1600/%25C3%25ADndice3.png **[66]**

Clasificación de Resinas Plásticas

1. **PET (Polietileno tereftalato)** El PET comúnmente utilizado en la producción de botellas para bebidas [46]. Siendo un material económico, es ligero y susceptible al reciclado, teniendo una temperatura de transición vítrea de 80°C [47]. A través de su reciclado se obtiene principalmente fibras para relleno de bolsas para dormir, alfombras, cuerdas y almohadas [46].

Figura 67. Botellas de PET

Fuente: http://www.haicom.com.mx/images/magic/productos/soplado-plastico-pvc-pet-policarbonato-2.jpg **[67]**

2. **PEAD (Polietileno de Alta Densidad).** Es un polímero con una alta resistencia química, con una temperatura de transición vítrea que va desde los -35°C a los 120°C [47]; por lo que normalmente se utiliza en envases de leche, detergente, aceite para motor, etc. [46].

Figura 68. Envases PEAD.

Fuente: https://5.imimg.com/data5/HN/KX/MY-1215697/plastic-hdpe-oil-2c-cosmetic-2c-powder-2c-chemical-jars-containers-500x500.jpg **[68]**

3. **PVC (Cloruro de Polivinilo).** Son polímeros con una mayor resistencia química que los anteriores; pero con la peculiaridad principal de al ser aplastados adquieren un color blanquecino en las zonas afectadas [47]. Son utilizados principalmente para la elaboración de envases de aceite de cocina, artículos de servicio para restaurantes de comida rápida y tiende a ser reciclado para la creación de tubos de drenaje e irrigación [46]. Posee una temperatura de transición vítrea de 80°C [47].

Figura 69. Elementos de PVC

Fuente: https://www.hogar.mapfre.es/wp-content/uploads/2018/08/como_curvar_un_tubo_de_pvc-1100x408.jpg **[69]**

4. **PEBD (Polietileno de Baja Densidad).** Este es un polímero fuerte, flexible y transparente utilizado para bolsas e incluso taparroscas y posee una temperatura de transición vítrea que va desde -35°C a 120°C [47].

Figura 70. Ejemplos de PEBD en bolsas.

Fuente: http://idealhn.com/Maplasthn/assets/img/compras/tres/bolsaCamiseta.jpg **[70]**

5. **PP (Polipropileno).** Es un polímero con un alto punto de fusión, utilizados para contener líquidos y alimentos calientes, como pueden ser botellas de salsa de tomate, tapas, botellas medicas [47]. Este tipo de plástico al ser reciclado se utiliza como viguetas, peldaños para registro de drenaje y cajas de batería para auto [46]. Su temperatura de transición vítrea va desde -15°C a 25°C [47].

Figura 71. Ejemplos de PP.

Fuente: http://dunham-bush.com.my/wp-content/uploads/2016/05/ClearTint_transparent_colors.jpg **[71]**

6. **PS (Poliestireno).** Es un polímero con un bajo punto de fusión utilizado para platos, tazas, estuches de CD, recipientes de comidas, etc. [47]. Al reciclarse se puede utilizar para la creación de viguetas de plástico, cajas de cintas para casetes y macetas [46]. Su temperatura de transición vítrea es de 100° C [47].

Figura 72. Elementos típicos de Poliestireno.

Fuente: https://www.sinembargo.mx/wp-content/uploads/2019/05/poliestireno-1200x733.jpg **[72]**

7. **Otros.** Estos son la combinación de diferentes plásticos, por lo que no suelen ser reciclados, ejemplos de estos son: botellas de kétchup para exprimir, platos para hornos de microondas, etc. Estos plásticos no se reciclan porque no se sabe con certeza que resinas los conforman [46].

Figura 73. Combinación de polímeros.

Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/Plastic_household_items.jpg **[73]**

2.6.1 Tipos de Reciclaje

En síntesis, existen dos métodos para el tratamiento y proceso de reciclaje del plástico, el cual dependerá mucho del producto final que se desee obtener a partir de la materia prima a tratar, dividiendo estos dos procesos en reciclaje mecánico y reciclaje químico.

Reciclaje Mecánico

Este proceso consiste en trocear el material e introducirlo en una extrusora para fabricar granza reciclada y después transformarla mediante extrusión e inyección que serán acompañados de otros procedimientos. Este tipo de reciclaje se considera exclusivo para aquellos productos procedentes del consumo [51].

Las fases que lleva este proceso se pueden dividir en 6 pasos hasta la obtención de la granza:

1. **Recepción de materias primas**. La cual consiste en este caso, en ser todo aquel material susceptible a ser reciclado (PEAD, PEBD, PP, PET, PS), el material debe estar preclasificado por calidad y puede proceder de rechazo industrial, posconsumo y agrícola. Estos materiales pueden llegar a las plantas en cajas, sacos, Big Bags, triturados, en contenedores (Granel) o balas [49].

Figura 74. Recepción de materias primas (PET)

Fuente: https://bbnn.b-cdn.net/wp-content/uploads/pexels-photo-802221.jpeg **[74]**

2. **Proceso de selección.** No todos los plásticos son iguales ni pueden recibir los mismos tratamientos, por lo que esta fase se encarga de separarlos por tipo de material, por colores, por tamaños, según las necesidades y objetivos del reciclado [50]. Así una vez seleccionada la materia prima pasará por un riguroso proceso de selección divido en dos fases, las cuales son:

2.1 Separación de materiales no aptos por su tipología, los cuales se separan de aquellas materias plásticas diferentes a las que en el momento de consumo correspondan a la calidad en proceso, etiquetas, materias férricas, tierras…etc. Con este proceso se garantiza una calidad óptima, aumentando las capacidades productivas, evitando una producción ineficiente, y servirá para llevar un control sobre la materia prima suministrada por las fuentes de aprovisionamiento [49].

2.2 Segregación de colores de plástico a consumir, siendo en esta fase en la que se consigue un menor consumo de colorantes, lo que da un beneficio mayor tanto económico como medioambiental, así como una mayor variedad en los productos terminados ofreciendo diferentes gamas de colores [49].

Figura 75. Proceso de selección manual. Fuente: https://www.eluniverso.com/sites/default/files/styles/powgallery_1024/public/fotos/2015/11/pr11frt151115fsdphoto01.jpg?itok=3fvZ7Ai0 **[75]**

3. **Trituración.** Esta fase consiste en convertir los plásticos en pequeños trozos o granos [50]. Las piezas se rompen y desmenuzan a través de trituradores de gran capacidad productiva, por medio de un juego de cuchillas giratorio, reduciéndolas a pequeños trozos según el diámetro de la criba. Con el triturado se logra que la granulometría del plástico sea homogénea lo que facilita las posteriores labores de transporte, lavado y secado [49].

Figura 76. Proceso de triturado de plástico.

Fuente: https://ecologismos.com/wp-content/2014/09/Maquina-para-reciclar-plasticos.jpg **[76]**

4. **Lavado**. Esta fase se lleva a cabo en tanques de agua para eliminar cualquier resto de suciedad o impropios [50]. Una vez triturado, el plástico se introduce en unos lavaderos industriales. Unas aspas remueven el agua de manera que el plástico quede mojado totalmente y en el fondo de los lavaderos quedarán depositadas posibles impurezas como tierra, piedras, metales, cartón, PVC y cualquier otro material más denso que el agua [49].

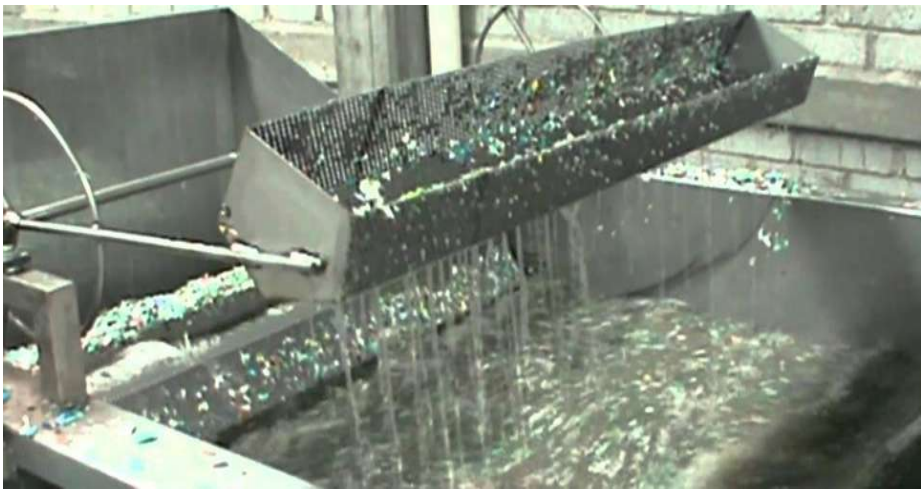


FIGURA 77. Lavado del producto triturado.

Fuente: https://i.ytimg.com/vi/nJj23hTrCuc/maxresdefault.jpg **[77]**

5. **Secado y centrifugado.** El material extraído de los lavaderos pasa a las centrífugas donde además de hacer las funciones de secado eliminarán por completo cualquier impureza que aún pudiera escapar de los lavaderos [49].

Figura 78. Máquina centrifugadora para plástico.

Fuente: https://images.ssstatic.com/centrifugadora-secadora-para-plasticos-10717664z2-10065967.jpg **[78]**

6. **Granceado.** Esta principal etapa consiste en homogeneizar el material para convertirlo en granza para posibilitar su posterior transformación [50]. Una vez triturado, lavado y secado el plástico se almacena en silos, donde será mezclado mediante un proceso mecánico, hasta conseguir un material homogéneo en color, textura y comportamiento [49], dejándolo preparado para el proceso de transformación que se aplique.

Figura 79. Granceado de plástico.

Fuente: https://www.picda.com/wp-content/uploads/2017/01/SECADO.jpg **[79]**

Una vez obtenida la granza del polímero, se dice que ya está el material preparado para convertirlo a nuevos productos, mediante diferentes métodos como son la extrusión, inyección, compresión y moldeo por soplado.

- **Extrusión.** Una vez calentado el material se somete a presión mediante una prensa para que pase a través de un troquel. Al enfriarse el plástico se solidifica manteniendo la nueva forma adquirida [50].

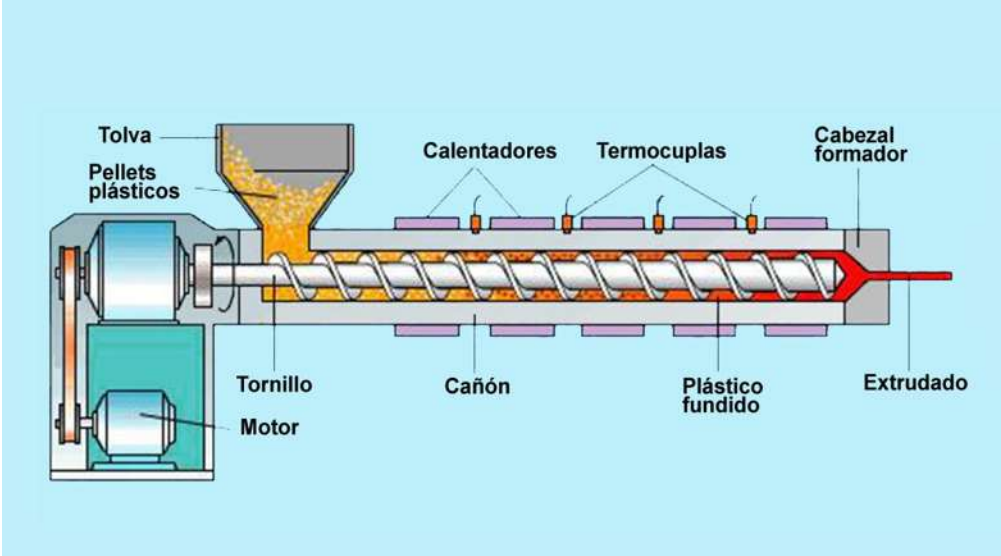


Figura 80. Esquema del funcionamiento básico de una máquina de extrusión.

Fuente: https://3.bp.blogspot.com/-9Vyihep7Z40/WM_UWMSXgvI/AAAAAAAAFKI/g_bSM-igosc_vd45XfKqeKDeVtMX35KCACLcB/s1600/Extrusora%2Besquema.jpg **[80]**

- **Inyección.** Este método consiste en inyectar el plástico fundido en un molde cerrado a presión y frío a través de un orificio. Una vez se enfría, el plástico se solidifica y se obtiene la pieza [50].

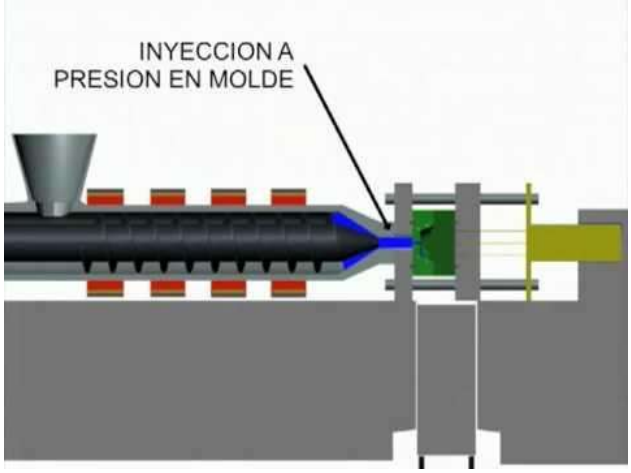


Figura 81. Esquema del proceso de Inyección de plástico.

Fuente: https://i.ytimg.com/vi/4kVGXWtnXGM/hqdefault.jpg **[81]**

- **Moldeo por soplado.** Esta técnica es utilizada para producir piezas de plástico huecas, como botellas. Consiste en la inyección de plástico en un molde, y a continuación introducir aire a presión, para que el plástico fundido se adhiera a las paredes del molde y se solidifique en esa forma [50].

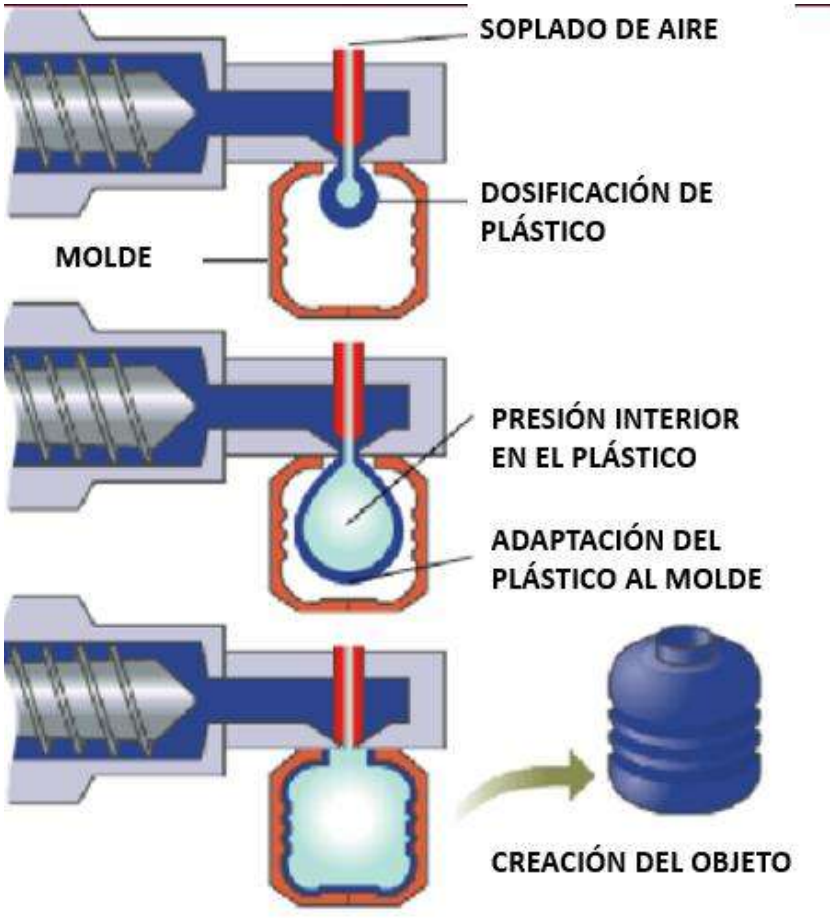


Figura 82. Esquema básico del funcionamiento del moldeo por soplado.

Fuente: http://www.edu.xunta.gal/centros/iessantomefreixeiro/system/files/plastico.pdf **[82]**

- **Compresión.** Consiste en colocar el material en un molde abierto y aplicarle presión mediante una prensa para que el material adopte la forma del molde [50].

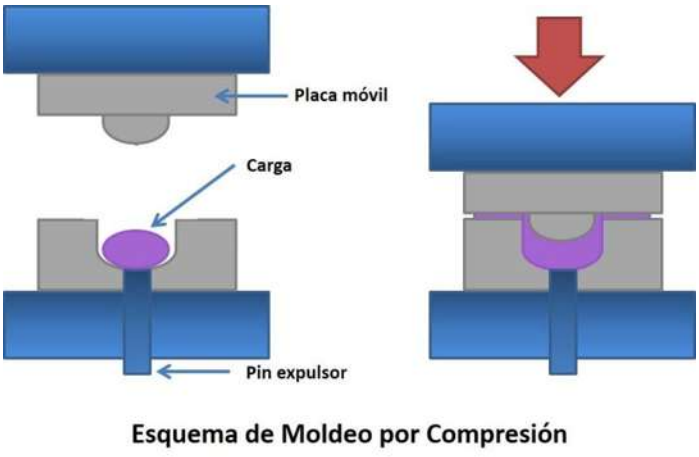


Figura 83. Esquema de Moldeo por Compresión

Fuente: https://todopolimeros.files.wordpress.com/2016/11/compresic3b3n.jpg?w=1017&h=679&crop=1 **[83]**

Reciclaje Químico

El reciclaje químico puede considerarse un proceso complementario al mecánico ya que ofrece posibilidades que resuelven las limitaciones que el mecánico no, entre ellas la necesidad de disponer de grandes cantidades de plásticos, así como una limpieza optima en estos para ser tratados y tener un buen producto final [52]. Este método consiste en la degradación del polímero mediante la aplicación térmica o de catalizadores, que se encarguen de romper las macromoléculas y que resulten únicamente moléculas simples [50]. En otras palabras, lo que se busca es descomponer el polímero para obtener sus componentes iniciales(monómeros) y así disponer de ellos como y cuando se requiera [52].

Tipos de Reciclaje Químico

Pirólisis. Se trata de la descomposición química del plástico causada por altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Se consigue reducir el volumen de residuo y conseguir sustancias que pueden usarse como combustible o productos químicos [50].

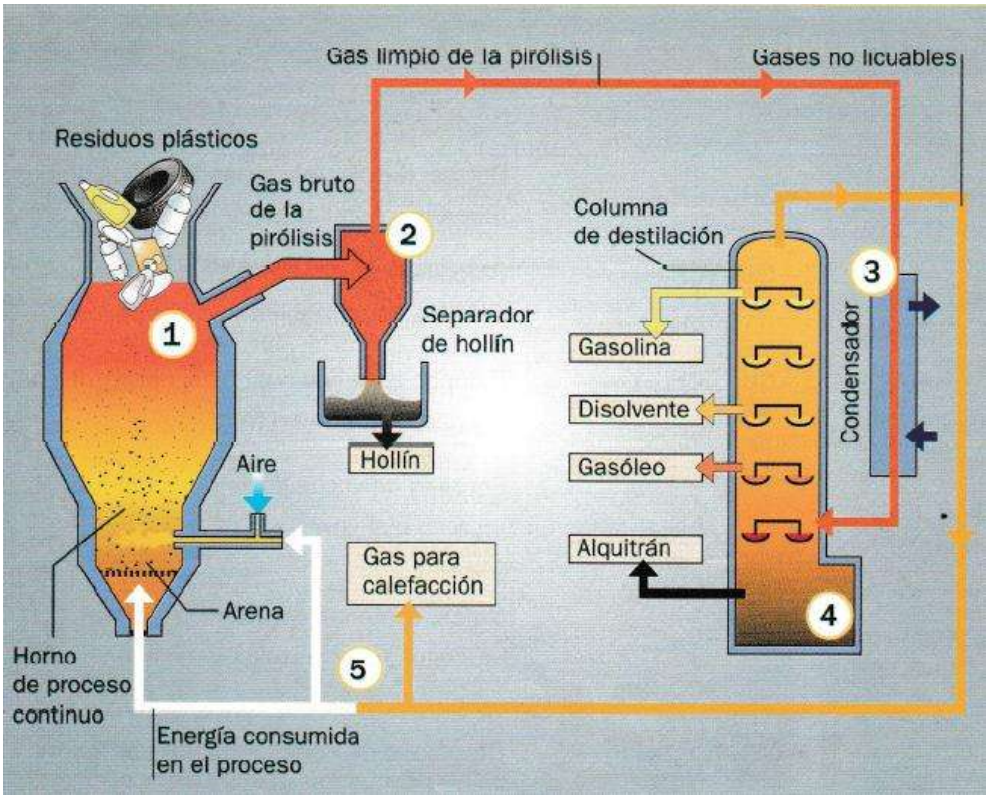


Figura 84. Esquema básico del proceso Pirolisis.

Fuente: http://contentmapas.didactalia.net/imagenes/usuarios/ImagenesCKEditor/545a9b9a-96b3-4d5d-a323-d4365f24f8df/caa29222-9899-4e26-8def-9a6e754ce518.png **[84]**

Gasificación. Este método convierte el plástico en un gas combustible mediante una serie de reacciones en presencia de oxígeno o hidrógeno [50].

Figura 85. Máquina de Gasificación.

Fuente: https://i.ytimg.com/vi/k1mv1s15tmw/maxresdefault.jpg **[85]**

Craqueo. Similar al proceso que se utiliza con el petróleo, consiste en la ruptura de las moléculas de un compuesto para producir otras más simples, mediante altas temperaturas y un catalizador [50].

Figura 86. Planta de craqueo catalítico.

Fuente: https://i.ytimg.com/vi/f6aE--AGGLs/maxresdefault.jpg **[86]**

2.7 Fundamentos del Cemento y del Concreto

2.7.1 Definición

El cemento Pórtland es un conglomerante hidráulico que al ser hidratado se solidifica y endurece. Se obtiene mediante un proceso industrial, pulverizando a un grado de finura determinado una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, previamente sometida a cocción, que se denomina *Clinker Pórtland*, al cual se le adiciona sulfato de calcio como anhidrita ($CaSO_4$), yeso ($CaSO_4$-$2H_2O$) o hemihidrato ($CaSO_4$-$½H_2O$), para regular el tiempo de fraguado. Según las propiedades que se requieran o para auxiliar la molienda, además se le pueden incorporar otros materiales como:

- Puzolanas que son materiales naturales, artificiales o subproductos industriales silíceos o silico-aluminosos, o una combinación de ambos, los cuales no endurecen por sí mismos, pero finamente molidos, reaccionan en presencia de agua a la temperatura ambiente con el hidróxido de calcio y forman compuestos con propiedades cementantes. Proceden de algunas de las tierras diatomáceas, horstenos opalinos, pizarras, tobas y pómez, así como de diferentes productos de calcinación y de algunas de las arcillas más comunes como la montmorilonita y la caolinita. Dentro de estos materiales se consideran las cenizas volantes que se obtienen de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas con carbones pulverizados, mediante la precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión.

- Escoria granulada de alto horno, es decir, el residuo no metálico que se obtiene en el alto horno por la fusión de minerales de fierro, enfriado bruscamente con agua o vapor y aire, compuesto principalmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos.

- Humo de sílice, que es una puzolana muy fina constituida esencialmente por sílice amorfa, obtenida como un subproducto de la fabricación de silicio o aleaciones con arco eléctrico de ferro-silicio.

- Caliza, que es un material de naturaleza inorgánica de origen mineral carbonatado, compuesto principalmente por carbonatos de calcio en forma de calcita [64].

2.8 Clasificación

El cemento Portland es clasificado de acuerdo a su composición, su resistencia a la compresión y según sus características especiales acorde la norma N-CMT-2-02-001-02.

2.8.1 Según su Composición

- **Tipo CPO (cemento Pórtland ordinario).** El producido mediante la molienda del clinker Pórtland y sulfato de calcio. Cuando el proyecto no establezca el tipo de cemento Pórtland por usar en cada caso, se entenderá que se trata de cemento Tipo CPO.
- **Tipo CPP (cemento Pórtland puzolánico).** El que resulta de la molienda conjunta del clinker Pórtland, puzolanas y sulfato de calcio.
- **Tipo CPEG (cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno).** El producido mediante la molienda conjunta del clinker Pórtland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.
- **Tipo CPC (cemento Pórtland compuesto)**. El que se obtiene de la molienda conjunta del clinker Pórtland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En este tipo de cemento la caliza puede ser el único componente adicional al clinker Pórtland con el sulfato de calcio.
- **Tipo CPS (cemento Pórtland con humo de sílice).** El que resulta de la molienda conjunta del clinker Pórtland, humo de sílice y sulfato de calcio.
- **Tipo CEG (cemento con escoria granulada de alto horno).** El producido mediante la molienda conjunta de clinker Pórtland, sulfato de calcio y mayoritariamente escoria granulada de alto horno [64].

2.8.2 Según Su Resistencia A La Compresión

Según su resistencia mecánica a la compresión, determinada de acuerdo con el procedimiento descrito en el Manual M-MMP-2-02-004 *Resistencia a la Compresión del Cemento,* los cementos Pórtland se clasifican en las clases resistentes que indica la siguiente tabla.

Clase resistente	Resistencia a la compresión Mpa (Kg/cm^2)		
	A 3 días	A 28 días	
	mínimo	Mínimo	máximo
20	-	20 (204)	40 (408)
30	-	30 (306)	50 (510)
30R	20 (204)	30 (306)	50 (510)
40	-	40 (408)	-
40R	30 (306)	40 (408)	-

Figura 87. Clases de Resistencias de los Cementos Pórtland.

Fuente: Norma N-CMT-2-02-001-02 **[87]**

Para identificar un cemento Pórtland, la clase resistente se anotará inmediatamente después de la designación del tipo de cemento que se indica en el Inciso B.2.1. de esta Norma, por ejemplo:

- CPO 30, cuando se trate de un cemento Pórtland ordinario con una resistencia normal mínima de treinta (30) megapascales (306 kg/cm^2).
- CPEG 40R, si se requiere un cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno, que tenga una resistencia normal mínima de cuarenta (40) megapascales (408 kg/cm^2) y deba cumplir con una resistencia inicial mínima de treinta (30) megapascales (306 kg/cm^2) [64].

2.8.3 Según Sus Características Especiales

Los cementos Pórtland pueden presentar una o más de las características especiales que indican la siguiente Tabla que aparece en la norma.

Característica especial	Nomenclatura
Resistente a los sulfatos	RS
Baja reactividad álcali-agregado	BRA
Bajo calor de hidratación	BCH
Blanco	B

Figura 88. Características Especiales de los Cementos Pórtland.
Fuente: Norma N-CMT-2-02-001-02 **[88]**

Para identificar un cemento Pórtland con una característica especial, la nomenclatura de ésta será anotada inmediatamente después de la designación del tipo de cemento que se indica en el Inciso B.2.1. y de la clase resistente que se señala en el Inciso B.2.2. De tener dos o más características especiales, sus nomenclaturas se anotan siguiendo el orden descendente de la Tabla 2 de esta Norma, separándolas con una diagonal, por ejemplo:

- **CPO 30 RS**, cuando se trate de un cemento Pórtland ordinario con una resistencia normal mínima de treinta (30) megapascales (306 kg/cm^2) y que sea resistente a los sulfatos.

- **CPEG 40R BRA/BCH**, si se requiere un cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno, que tenga una resistencia normal mínima de cuarenta (40) megapascales (408 kg/cm^2), una resistencia inicial mínima de treinta (30) megapascales (306 kg/cm^2), baja reactividad álcali- agregado y bajo calor de hidratación [64].

2.9 Composición del Cemento Pórtland

La composición de los diferentes tipos de cemento Pórtland estará comprendida dentro de los límites que se establecen en la siguiente Tabla de esta Norma:

Cemento Pórtland		**Clinker Portland + sulfato de calcio**	**Componentes principales**				**Componentes minoritarios [2]**
Tipo	**Denominación**		**Puzolanas [1]**	**Escoria granulada de alto**	**Humo de sílice**	**Caliza**	
CPO	Cemento Pórtland ordinario	95 - 100	--	--	--	--	0 - 5
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	50 – 94	6 – 50	--	--	--	0 - 5
CPEG	Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno	40 – 94	--	6 – 60	--	--	0 - 5
CPC **[3]**	Cemento Pórtland compuesto	50 – 94	6 – 35	6 – 35	1 – 10	6 - 35	0 - 5
CPS	Cemento Pórtland con humo de sílice	90 – 99	--	--	1 – 10	--	0 - 5
CEG	Cemento con escoria granulada de alto hormo	20 - 39	--	61 - 80	--	--	0 – 5

[1] Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales y cenizas volantes.
[2] Los componentes minoritarios pueden ser uno o más de los componentes principales, salvo que estén incluidos ya como tales en el cemento.
[3] El cemento Pórtland compuesto contendrá dos componentes principales como mínimo, excepto cuando se trate de caliza, la que puede ser el único componente principal.

Figura 88. Composición de los Cementos Pórtland.

Fuente: Norma N-CMT-2-02-001-02 **[88]**

El contenido de carbonato de calcio ($CaCO_3$) en la caliza que se utilice como componente principal del cemento Pórtland compuesto (CPC), determinado mediante cualquier método de análisis convencional, será como mínimo de setenta y cinco (75) por ciento en masa.

En cualquier tipo de cemento Pórtland el contenido máximo de trióxido de azufre (SO_3) será tal que no cauce una expansión mayor de cero coma cero dos (0,02) por ciento a los catorce (14) días de inmersión en agua, determinada de acuerdo con el procedimiento descrito en el Manual M·MMP·2·02·011, *Expansión Potencial por la Acción de los Sulfatos* [64].

2.10 Procesos de Hidratación

Cuando se agrega agua al cemento Pórtland, los compuestos básicos presentes se transforman en nuevos compuestos por reacciones químicas. Como, por ejemplo:

Silicato tricálcico + agua --> gel de tobermorita + hidróxido de calcio

Silicato dicálcico + agua --> gel de tobermorita + hidróxido de calcio

Ferro aluminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio --> hidrato de calcio Aluminato

tricálcico + agua + hidróxido de calcio --> hidrato de Aluminato tricálcico Aluminato

tricálcico + agua + yeso --> sulfoaluminatos de calcio

Las dos primeras reacciones, donde intervienen los silicatos de calcio, que constituyen alrededor del 75% por peso del cemento Pórtland, reaccionan con el agua para producir dos nuevos compuestos: gel de tobermorita el cual es no-cristalino e hidróxido de calcio que es cristalino. En la pasta de cemento completamente hidratada, el hidróxido de calcio constituye el 25% del peso y el gel de tobermorita, alrededor del 50%.

La tercera y cuarta reacciones muestran cómo se combinan los otros dos compuestos principales del cemento Pórtland con el agua para formar productos de reacción.

En la última reacción aparece el yeso, compuesto agregado al cemento Pórtland durante la trituración del clinker para controlar el fraguado.

Cada producto de la reacción de hidratación desempeña una función en el comportamiento mecánico de la pasta endurecida. El más importante de ellos es el compuesto llamado gel de tobermorita, el cual es el principal compuesto aglomerante de la pasta de cemento, porque liga o aglutina entre sí a
todos los componentes. Este gel es una sustancia dividida, muy fina, con estructura coherente, con una composición y estructura semejantes a la de un mineral natural, llamado tobermorita.

La rapidez de hidratación es afectada, además de la composición, por la finura del molido, la cantidad de agua agregada y las temperaturas de los componentes al momento de mezclarlos. Para lograr una hidratación más rápida, los cementos se trituran hasta dejarlos muy finos. El diámetro promedio de un grano de cemento Pórtland proveniente de la trituración del clinker es de alrededor de 10 μm. Las partículas del producto de hidratación, como el gel de tobermorita, son del orden de una milésima de ese tamaño, por lo que su enorme superficie específica, de alrededor de 3 millones de cm2 por gramo, produce fuerzas de atracción entre las partículas. Estas fuerzas ocasionan que las partículas de gel de tobermorita se adhieran entre sí y con otras partículas introducidas en la pasta de cemento [65].

2.11 Prefabricados De Concreto Para Pavimentos

2.11.1 Definición

Se le denomina prefabricados a los elementos ensamblados entre sí, una vez que han sido manufacturados previamente en fábrica o en otro sitio cercano a la obra [53]. Siendo esta una manera inteligente e industrializada para construir cualquier tipo de edificación de alta calidad y eficiencia energética, no sólo en un corto período de tiempo, sino también de manera rentable y segura. Entendiendo más exactamente que prefabricado significa trasladar el trabajo desde el sitio a los procesos controlados de una fábrica, lo que proporciona una calidad alta y constante que mejora la significativamente la productividad [54].

Figura 89. Prefabricados de Concreto Ecológicos.

Fuente: https://images.ssstatic.com/pavimento-100-permeable-ecologico-prefabricados-ecocreto-5264250z0-00000067.jpg **[89]**

Estando entre las principales ventajas de estos, tiempos de construcción más cortos, construcción rentable, menor huella de bióxido de carbono a comparación de la que se genera en la construcción por el concreto preparado in situ, reducción considerable en el uso de cemento, agua, acero y mano de obra, así como residuos y una notable reducción en la logística de aplicación, brindan flexibilidad en el diseño y una gran resistencia arquitectónica [54]. Presentando menores desventajas en comparación a las ventajas mencionadas, contando como desventajas notables las relacionadas al aspecto económico-financiero por la alta inversión inicial que se debe hacer, así como disposiciones relacionadas al montaje, manipulación, acarreo de las piezas y en menor grado la fabricación de las mismas, que no se considera del todo un problema, pues solo es desventajoso por el volumen que se debe crear para el consumo [55].

2.11.2 Clasificación de Elementos Prefabricados

Estos elementos se clasifican con base a tres grupos según su ***peso y dimensiones*** y según el ***formato o forma*** en la que están constituidos o el ***material*** del que están hechos [53].

2.11.3 Según el Peso Y Dimensiones.

Se clasifican en livianos, semipesados y pesados. Estando los elementos livianos como los más pequeños o ligeros con un peso inferior a los 30 kg, destinados a ser colocados de manera manual por uno o dos operarios [53], como se muestra en la Figura 88.

Figura 90. Colocación de Adoquines En Andador.

Fuente: https://civilgeeks.com/wp-content/uploads/2017/02/pavimentos-articulados-0.jpg **[90]**

Consideramos semipesados a aquellos prefabricados cuyo peso es inferior a los 500 kg, requiriéndose medios mecánicos simples a base de poleas, palancas, malacates y barretas para su colocación [53].

Figura 91. Colocación barretas para muro.

Fuente: https://2.bp.blogspot.com/G1azdVDRQ4o/VtId0MEINpI/AAAAAAAAA9w/K81zZKvoKM/s1600/pub24fig4.jpg **[91]**

Mientras tanto los de un peso superior a 500 kg se consideran pesados, requiriéndose maquinaria pesada para su colocación en obra [53], tal y como se muestra en la figura 90.

Figura 92. Montaje de Estructura Prefabricada en Puente.

Fuente: https://i1.wp.com/revealized.com/wp-content/uploads/2019/01/Montaje-de-estructura-prefabricada-de-hormig%C3%B3n-FERROVI%E2%80%A6-Flickr.jpg?fit=1024%2C768&ssl=1 **[92]**

2.11.4 Según Su Formato.

Esta clasificación está basada con la forma en la que son fabricados, siendo las principales y más importantes ***los bloques, panales y los elementos lineales.*** Estando los primero como elementos auto estables que no necesitan de apoyos auxiliares para su colocación tales como: tabiques, bloques e incluso adoquines de formas regulares [53].

Figura 93. Bloques Prefabricados.

Fuente: https://static.miweb.padigital.es/var/m_7/77/778/64183/929546-726125-prefabricados-la-antigua-fondo-1.jpg **[93]**

Dejando el segundo grupo de prefabricados como el de los paneles, el cual es aquel que está conformado por placas cuya relación entre grosor y superficie es significativa. Por ejemplo, muros de contención, antepechos, placas de fachadas entre otras utilidades que se les dé a estas estructuras laminares. Mientras el grupo de los Elementos lineales es aquel, que está conformado por secciones esbeltas de sección transversal reducida en relación con su longitud. Por ejemplo, las vigas, columnas y pilotes [53].

Figura 94. Paneles Prefabricados.

Fuente: https://bloquescando.com/wp-content/uploads/2016/12/cerramiento-panel-de-hormigon-01-500x500.jpg **[94]**

2.11.5 Según el Tipo de Material.

Estas estructuras prefabricadas pueden ser de diferentes tipos de material según sea la necesidad, tal sea el caso. Por ejemplo: Concreto reforzado, concreto simple, acero, madera, plástico, aluminio y madera.

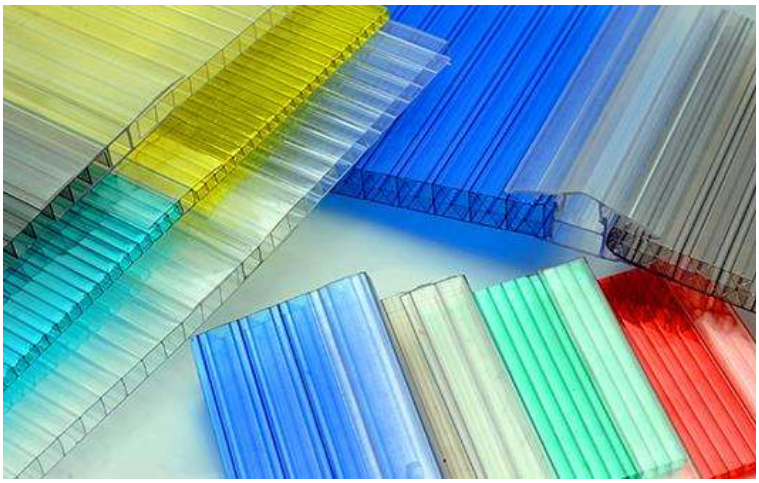


Figura 95. Láminas de Policarbonato, Prefabricado Plástico. Fuente: https://plastitec.mx/productos/img/policarbonato.jpg **[95]**

2.11.6 Proceso de Fabricación de Elementos Prefabricados.

Existen varios y diversos tipos de elementos prefabricados y de la misma manera existen diferentes tipos de procesos de fabricación de los mismos dependiendo el caso, de esta manera tenemos una mejora en la calidad del producto. Así pues, con esto dicho a continuación se muestran los pasos de una manera general para la elaboración de dichos elementos, más puntualmente elementos livianos como lo son los bloques.

1. Selección de los Agregados Pétreos.

Esta selección de agregados siempre será utilizando la materia prima más cercana que nos proporcione el medio, es decir del banco de material más cercano con el fin de un costo más económico y por la practicidad misma para trabajar en cuanto a logística. Previamente deben llevarse muestras a un laboratorio para someterlas a un análisis de Granulometría con el objeto de determinar la correcta gradación de los tamaños. La idea con esto es establecer las dimensiones que mejor se ajustan, para obtener al menor costo, la resistencia exigida**.** En este punto es probable necesitar varios tipos de agregados, gravas de máximo ¾" y arenas finas o gruesas, hasta llegar a la gradación correcta. No es fácil mantener esta homogeneidad ya que no siempre se tiene la certeza de recibir el agregado de la misma procedencia, de allí que sea importante practicar pruebas de granulometría de control. Unos de los mejores agregados son los de rio, ya que vienen lavados y libres de contaminantes como la arcilla, grasas o aceites. Deben estar libres de materia orgánica como raíces, hojas o cualquier otro elemento contaminante [56].

Figura 96. Agregados Gruesos.

Fuente: https://www.arqhys.com/contenidos/fotos/contenidos/Agregados-gruesos.jpg **[96]**

2. Selección de Agua.

Si el agua es buena para el consumo humano, entonces se considera óptima para la producción de concreto.

3. Selección de Cemento.

Esto es una selección ya que prácticamente es la base de nuestro elemento, y de esto dependerá la resistencia y calidad del mismo, conocemos de varios tipos los más importantes para la producción elementos como lo son:

- Portland Tipo I: El más común, se consigue en cualquier ferretería en bultos de 50 Kg o 42 Kg. Ofrece buena resistencia a 28 días.
- Portland Tipo III: Se solicita bajo pedido y lo suministran a granel, es un poco más costoso que el tipo I. Ofrece altas resistencias a edades tempranas. Se debe disponer de silo en la planta para su almacenamiento y dosificación. La selección de uno u otro tipo dependerá de la infraestructura física, los costos de producción y el beneficio de obtener resistencias tempranas. En nuestra planta utilizamos el Tipo I, en presentación de bultos de 50 Kg [56].

4. Dosificación.

Las proporciones de los agregados deben permitir la mayor compactación posible, con un mínimo de cemento. Esto ahorra dinero. El fabricante de las maquinas normalmente suministra unas dosificaciones, que servirán como guías para hacer las pruebas necesarias. Es importante que se realicen varios diseños de mezcla para poder determinar cual ofrece mejor relación costo-beneficio.

- **Dosificación por Peso o por Volumen**: Es inherente a la infraestructura de la que se dispone. Normalmente un sistema de dosificación por peso es costoso. Este es el mejor sistema, sin embargo, es posible hacer una buena dosificación por volumen, esto implica hacer equivalencias peso-volumen (Kg-Lt) y supervisar que siempre se mantenga la misma cantidad. Los recipientes utilizados para esta dosificación siempre beben ser los mismos. La dosificación dependerá del tipo de prefabricado a producir y de la resistencia solicitada.

- **Proporciones**: En nuestra planta se realiza la dosificación por volumen de la siguiente forma: 1: 4: 6 lo que significa que por cada parte de cemento se deben incorporar 4 de agregado fino y 6 del grueso. Esta es la proporción que funciona para nosotros, con resultados de 11 MPa en bloques de grosor 12. No quiere decir que funcionará para otros por lo que siempre se deben realizar pruebas previas.

- **Relación Agua-Cemento: (a/c)**. En los prefabricados de concreto la mezcla debe ser seca, Utilizamos la menor cantidad de agua posible porque necesitamos que el elemento se sostenga por sí mismo. La relación a/c es uno de los parámetros que más afecta la resistencia del concreto, pues a medida que aumenta, aumentan los poros en

la masa y por ende disminuye la resistencia. En nuestra planta trabajamos con una a/c=0,5.

- **Humedad Natural**: Normalmente es común recibir los agregados en la planta con cierto grado de humedad por lo que se recomienda dejarlos reposar al menos 2 días, si esto no es posible entonces se debe determinar el porcentaje de humedad para descontarlo del agua de hidratación y de esta forma no se nos altere la relación agua-cemento. En algunas visitas practicadas me he encontrado con que siempre mantienen los agregados húmedos, esto para facilitar la determinación del agua de hidratación.

- **Cantidad agua de Absorción de los Agregados: (% de absorción)**. Cuando en la mezcla se incorporan agregados secos es normal que estos absorban cierta cantidad de agua, por lo que debe determinarse este porcentaje para hacer la compensación respectiva y evitar que el concreto resulte con insuficiente agua de hidratación.

- **Cantidad Agua de Hidratación del Cemento: (% de hidratación)**. Es la cantidad de agua que necesita el cemento para poder hidratarse y llegar a obtener la resistencia exigida. Se determina por la relación a/c.

5. Proceso de mezclado.

- Orden de ingreso de la materia prima a la mezcladora: La teoría dice que se debe comenzar con el agregado grueso, después el fino y posteriormente el cemento, sin embargo, en la práctica tuvimos que cambiar ese orden, dado que nuestra mezcladora era de eje horizontal al vaciar la gravilla esta se depositaba en el fondo y había una parte que no se mezclaba correctamente. Decidimos incorporar primero la arena, después la grava y posteriormente el cemento, obteniendo mejores resultados. En última instancia se aplicaba el agua.

- Tiempos de Mezclado: Para nuestro caso eran necesarios 3 minutos. Si le damos menos no teníamos homogeneidad y si nos pasamos entonces el concreto sufre segregación de materiales. Es importante determinar el tiempo exacto [56].

Figura 97. Proceso de Mezclado.

Fuente: http://cemexparaindustriales.com/wp-content/uploads/2018/04/IMG_0368_CS-1024x683.jpg **[97]**

6. Las Bandejas

En este punto se explica las bandejas que serán utilizadas para darle los acabados a los elementos, los cuales deberán tener ciertas especificaciones como son:

- Fabricación: Por lo general el fabricante de las bandejas suministra el plano con las especificaciones necesarias para su fabricación.
- Acabados: La superficie superior debía estar completamente plana y lisa, sin separaciones entre sus tablas. No se aceptaban si estaban pandeadas. Una semana antes de su despacho debían ser sometidas a un baño de aceite quemado y secarlas a la sombra.
- Cuidados y Mantenimiento: Después de cada uso se le debe pasar una espátula para desprender los residuos de concreto y una vez a la semana un baño con aceite quemado. Deben ser correctamente almacenadas para evitar que se doblen [56].

Figura 98. Elaboración de Bloques.

Fuente: https://i.ytimg.com/vi/SnDJseHZtS0/maxresdefault.jpg **[98]**

7. Elaboración de Bloques

- Tiempos de Vibración: En general se manejan 2 tiempos de vibrado, el primero para ayudar a llenar el molde y el segundo para compactar. Dependiendo del elemento a fabricar los tiempos varían entre 3 y 6 segundos.
- Retiro de las Bandejas: Hay dos formas de retirar las bandejas con los bloques frescos, con montacarga (sistema utilizado en instalaciones automáticas) o de forma manual. **Se deben evitar movimientos bruscos y de ser posible disponer de un carro transportador de bandejas** [56]**.**

8. Fraguado y Curado

- Transporte a la Zona de Fraguado: Se transportará el producto fresco en vehículos de bandejas con llantas de aire, se debe contar con una superficie adecuada para al tránsito de éstos, cada uno es capaz de transportar 8 bandejas con 32 bloques. Resultan muy útiles cuando de producción masiva se trata ya que también se pueden utilizar para hacer la recogida al día siguiente. Es esta zona depositamos con mucho cuidado las bandejas con los bloques frescos en el piso y allí dejamos fraguar el concreto hasta el día siguiente.

- Curado en la zona de fraguado: En esta zona permanecen toda la noche y se debe tener la precaución de no dejar que los bloques se sequen, por lo que se hace necesario disponer a una persona que permanezca rociándolos con agua. Dependiendo de la zona del país donde se produzca se hace obligatorio rociarlos más o menos. Este proceso de hacer que los elementos no pierdan el agua de hidratación y por ende afectar su resistencia, se llama curado.

Figura 99. Zona de Fraguado para Bloques.

Fuente: http://m.unikpavermachine.com/Content/upload/2017244706/201709081101006654588.jpg **[99]**

- Arrumes: Los arrumes corresponden a la producción de 1 día y deben colocarse los elementos trabados para darle resistencia al conjunto, no deben ser superiores a 8 filas y recomiendo tenerlos debidamente marcados con la fecha, para saber cuándo retirarlos a la zona de almacenamiento para su secado.

- Curado de los Bloques: Se puede hacer a través de cámaras de curado o manual; con el primero solo necesitan 1 día, con el segundo son necesarios 7, en donde deben permanecer cubiertos con tela de fique o polietileno y frecuentemente bañarlos con agua [56].

9. Almacenamiento

Manipulación y Arrume Definitivo:

Dado que disponíamos de una zona de curado pequeña se hacía necesario trasladar los arrumes a otra zona más amplia, la cual estaba a la intemperie, pues ya no es necesaria la protección del sol. Es importante mantenerlos secos hasta que el cliente los reciba ya que no pueden instalarse húmedos debido a la contracción lineal por secado. De esta zona son cargados a los camiones para su posterior despacho.

10. Otras Variables

- Aditivos: Este es un ítem que debe analizarse con detalle pues afecta el valor del prefabricado. A mi manera de ver no es necesario si se dispone una buena dosificación, programación y planificación de despachos.

- Colorantes: Importante en estos momentos donde los prefabricados han retomado su posición en el mercado de la infraestructura urbana. Los colorantes poseen diferentes precios dependiendo del color, normalmente los azules son los más costosos. Tienen mucha demanda.

- Instalaciones físicas: La infraestructura de que se dispone al igual que su diseño, zonificación, circulaciones y demás pueden afectar la calidad de los prefabricados. Es importante disponer una amplia zona para el correcto almacenamiento de la materia prima, así como también del producto terminado. La zona de fraguado debe estar lo más cerca posible de la zona de producción. Mientras menos se manipulen los elementos mejores resultados se obtendrán.

- Condiciones ambientales: No es lo mismo producir en la costa Atlántica que en el interior del país debido a las condiciones ambientales, la radiación solar, la humedad relativa y la temperatura ambiente afectan el proceso y por ende la frecuencia de curado.

- Densidad: Es la relación entre el volumen bruto y la masa (peso) de una unidad. Depende, fundamentalmente, del peso de los agregados y del proceso de fabricación (compactación dada por la máquina); y en menor grado de la dosificación de la mezcla. Se debe buscar que la densidad sea siempre la máxima que se pueda con los materiales, dosificaciones y equipos disponibles, pues de ella dependen directamente todas las demás características de las unidades como son: la resistencia a la compresión, la absorción, la permeabilidad, la durabilidad, su comportamiento al manipuleo durante la producción, transporte y manejo en obra; su capacidad de aislamiento térmico y acústico.

4.5 Equipos De Fabricación

Entrados en materia podemos decir que existen diferentes métodos para la elaboración de estos elementos, enumerando en la siguiente clasificación los diferentes tipos de maquinaria utilizada.

Prensa Fija

Este es un modelo económico para emprendedores, de países en desarrollo, con un proyecto de hacer productos de concreto y hormigón de calidad, a nivel industrial; o para fabricación de piezas especiales [57].

Figura 100. Prensa Fija P-50.

Fuente: http://www.grupoee.com/prefabricados-concreto-hormigon-prima-p50/ **[100]**

Se trata de prensas fijas con una capacidad de producción importante, siendo además robustas y muy fáciles de manejar y de mantener. Tanto la producción del hormigón, como la fabricación de piezas, son procesos automáticos.

Una vez vibradas las piezas sobre bandejas de madera o metálicas, estas son retiradas por un operario, con un carrito, para transportarlas al área de curado. Con posterioridad, las piezas serán paletizadas manualmente. Bandejas metálicas o de madera [57].

Prensa SYNCRO

Este modelo trabaja con bandeja de madera o metálica con un largo que va desde 1200 mm a 1400 mm y un ancho que va desde 600 mm hasta 900 mm.

Figura 101. Prensa SYNCRO.

Fuente: http://www.grupoee.com/prefabricados-de-concreto-y-hormigon-syncro/ **[101]**

La **SYNCRO** es una prensa fija y automática, robusta de fácil manejo y mantenimiento mínimo; pero con una capacidad de producción importante y un sistema de vibración sincronizada accionada por un motor de 15Kw alimentado por convertidor de frecuencia.
El circuito de la instalación puede ir con configuración en línea o en U, con un conjunto de ascensor y descensor de 5 alturas que agiliza el traslado de las bandejas a los secaderos mediante una carretilla. Con respecto al paletizado, puede llevar un paletizador neumático o automático electrónico. El circuito en U permite añadir puestos de volteo y lubrificación de bandejas.

En todas sus opciones la prensa puede complementarse con equipo para fabricar productos con doble capa [58].

Prensa Megablock

La prensa modelo Megablock destaca por ofrecer la más alta productividad del mercado (más de 4.500 bloques de 20 cm. por hora, 18 piezas por bandeja) gracias a su sistema de vibración modular (patentado), accionado por un solo motor de 45 kW, en base a 2 mesas de vibración independientes, lo que permite una compensación del llenado mediante la regulación independiente de los parámetros de vibración de cada una de las mesas. Además, el sistema incluye un encóder para controlar electrónicamente y con la máxima precisión la frecuencia y la amplitud de la vibración.

En resumen, la vibración modular es un sistema muy fiable y experimentado, rápido y productivo, y con unas mínimas exigencias en cuanto a su funcionamiento y mantenimiento. La prensa Megablock se puede ofertar para trabajar con bandejas de madera, plástico o metálicas, con medidas entre 1.200 y 1.500 mm (tanto de largo como de ancho), y con equipo de doble capa opcional.

Figura 102. Prensa Megablock.

Fuente: http://www.grupoee.com/prefabricados-de-concreto-hormigon-megablock/ **[102]**

La vibración modular consiste en dos ejes vibrante Sincronizados unidireccionalmente. Cada uno de ellos lleva, a la vez, dos masas excéntricas que, a plena carga y a velocidad, sin parar, se suman o se compensan, consiguiendo vibrar o no, con el motor siempre en funcionamiento.
Logros de la vibración modular: Ahorro de energía en los arranques y frenadas, ahorro de tiempo en los arranques y paradas (sobre dos segundos por ciclo), que no haya disgregación de material, al ser el paro de vibración instantáneo [59].

Esplitadora

Esplitadoras automáticas y semiautomáticas para el corte de bloques de Hormigón, tienen un funcionamiento semiautomático.

Figura 103. Esplitadora.

Fuente: http://www.grupoee.com/esplitadoras-bloques-concreto-hormigon/ **[103]**

Equipada con cuchillas y soporte para bloques de hormigón desde 40 hasta 230 mm de altura. Cuchillas de 600 mm de longitud. Opcional: Pinzas mecánica de paletización / pórticos [60].

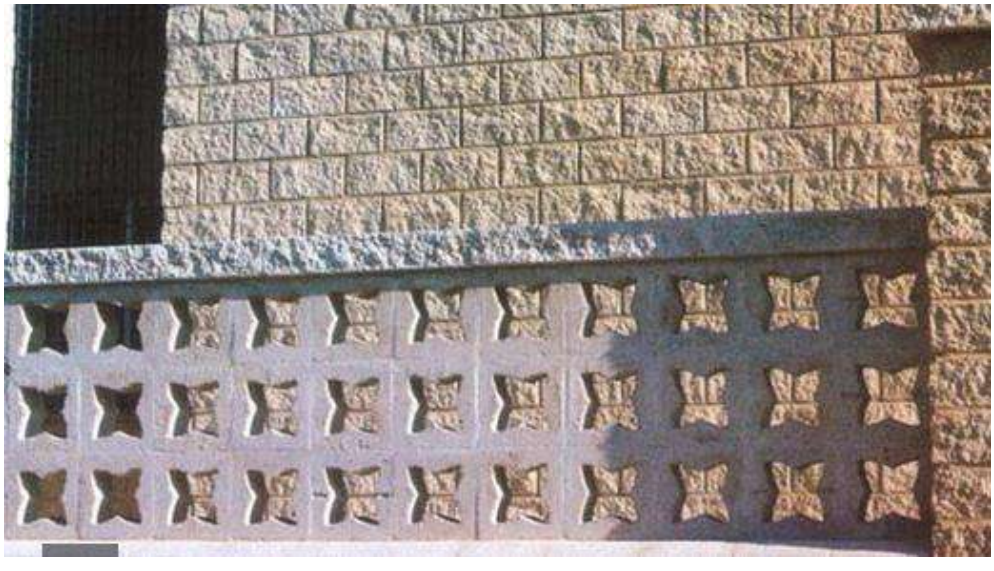


Figura 104. Corte Final Con Esplitadora.

Fuente: http://www.grupoee.com/esplitadoras-bloques-concreto-hormigon/ **[104]**

2.12 Método de Colocación de Adoquines

En la vida laboral existen varias maneras para emplear a los prefabricados de concreto y con ello diferentes metodologías para sus distintas aplicaciones, así pues, definimos de una manera más puntual el método para la colocación de un pavimento de adoquines, resumiéndolo en diez pasos para una correcta aplicación.

Figura 105. Colocación de Adoquines.

Fuente: https://www.breinco.com/breincosmartblog/wp-content/uploads/2018/04/como-colocar-un-pavimento-de-adoquines-breinco-opt-710x347.jpg **[105]**

1.- Evaluación del Producto

Se debe cotejar el producto entregado con el pedido realizado: comprobar el formato, el color, el acabado de la superficie y la cantidad. En caso de diferir hay que solicitar una verificación con el contratista / proveedor antes de la instalación [71].

Figura 106. Muestras de Adoquín

Fuente: https://docplayer.es/docs-images/65/52835177/images/1-0.jpg **[106]**

2.- Pendiente Transversal

En el momento de planificar la sección de pavimento se requerirá una pendiente transversal mínima de un 2% y de un 4% en suelos sensibles al agua. Está pendiente se elaborará desde la ejecución de la subbase [71].

3.- Confinamiento Perimetral

Las superficies construidas con adoquines de concreto necesitan generalmente delimitar el contorno de la construcción con un encintado estable para impedir desplazamientos horizontales. Es recomendable concretar las distancias de acuerdo con el ancho del producto para agilizar el trabajo. Para el confinamiento de la superficie adoquinada se pueden utilizar bordillos instalados con una cimentación a base de concreto adecuados a la altura que requiera dicha superficie [71].

4.- Capa Base

Debe ser resistente a la deformación (y suficientemente permeable al agua). No se debería de ningún modo anegamiento de aguas por encima de una capa base. Debe tener un espesor específico según las cargas de tráfico y el tipo de explanada existente. Debe ser plana y portante. La capa de protección contra las heladas, en caso necesario también debe formar parte de la capa de base [71].

5.- Lecho De Arena

Debe tener un espesor uniforme, que generalmente es de 4 cm +/- 1 cm. Debe ser uniforme en toda su superficie. No podemos utilizarla para compensar las irregularidades de la capa base [71].

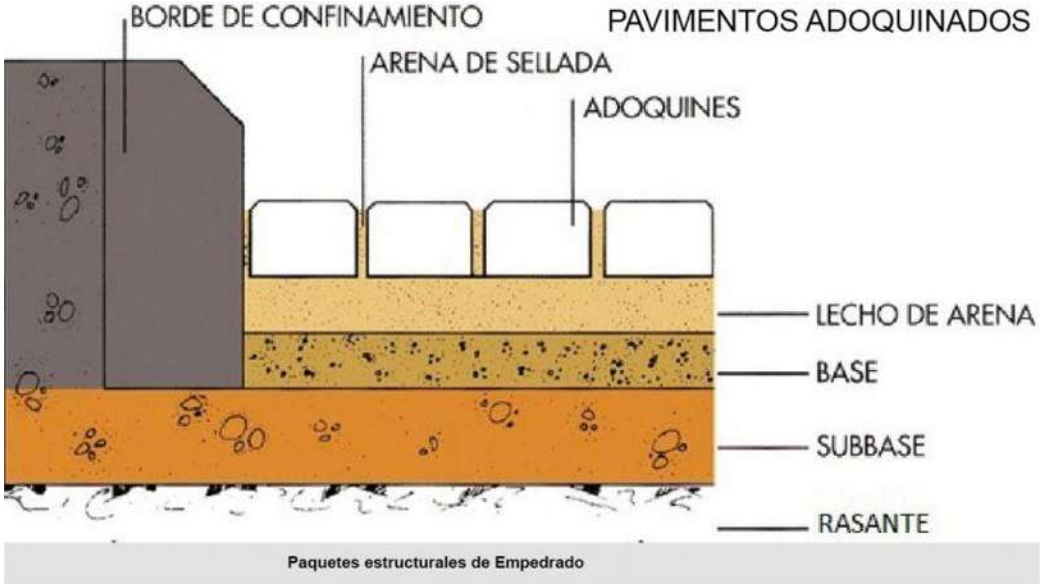


Figura 107. Esquema Básico un Pavimento Adoquinado.

Fuente: https://eldiariodetandil.com/contenido/noticias/original/1490584716.jpeg **[107]**

6.- Colocación de Adoquines

Colocar los adoquines siempre de forma mezclada de tres paletas distintas. De esta forma, se evitan diferencias apreciables a gran escala en el color de la superficie [71].

7.- Instalación

Los adoquines deben estar colocados en la disposición planeada y con suficiente ancho de junta (al menos 3-5 mm).

Las piezas finales en contacto con el perímetro de confinamiento no deben ser más pequeñas que la mitad de las piezas normales y deben tener el menor canto vivo posible. Los cortes de pieza se deben realizar con una sierra de agua y con las protecciones personales necesarios (guantes y mascarilla). Para mantener la superficie limpia es recomendable limpiar la suciedad lo antes posible [71].

Figura 108. Colocación de Adoquines.

https://www.breinco.com/breincosmartblog/wp-content/uploads/2018/03/colocacion-de-adoquines-opt.jpg **[108]**

8.- Rejuntado

Para el rejuntado se debe aplicar preferentemente arena limpia, sobre todo sin arcillas. Se debe introducir el material de rejuntado con una escoba. El material debe ser estable a la filtración hacia el lecho y con la granulometría adecuada al ancho de la junta, nunca el árido de más grosor será mayor que el ancho de la junta. **Rellenar hasta el borde de la junta** [71]**.**

Figura 109. Rejuntado de Adoquines.

Fuente: https://www.breinco.com/breincosmartblog/wp-content/uploads/2018/03/relleno-de-juntas-con-arena-opt.jpg **[109]**

9.- Vibrado

Se debe elegir la máquina vibradora adecuada dependiendo del formato del adoquín y deberá tener una **base de goma para no dañar las aristas de los adoquines.**

El procedimiento de vibrado debe llevarse a cabo con la superficie seca y antes de que se empiece a utilizar. Antes de proceder a la igualación, las juntas deben estar rellenadas y el pavimento debe estar adecuadamente limpio y seco.

Si la junta se vacía, se debe repetir el proceso de rejuntado y vibrado hasta que esto no ocurra [71].

10.- Limpieza

Una vez realizada la instalación de la superficie se debe proceder a la limpieza con barrido, preferentemente con la superficie seca [71].

Figura 110. Vibrado de Adoquines.

Fuente: https://i.ytimg.com/vi/l3FGahMzxFk/maxresdefault.jpg **[110]**

Figura 111. Limpieza de Adoquines.

Fuente: https://simetrika.cl/wp-content/uploads/2017/05/IMG_0820.jpg **[111]**

2.13 Materiales Compuestos

2.13.1 Definición

Se definen como las combinaciones de dos o más materiales a partir de una unión química o no química. Estos materiales que forman el compuesto poseen propiedades mejores que las que presentan los materiales componentes por sí solos [62]. Sus propiedades son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes, por lo que dan por resultante materiales de características excepcionales muy utilizados en la industria espacial, aeronáutica, química, náutica, entre otras [61].

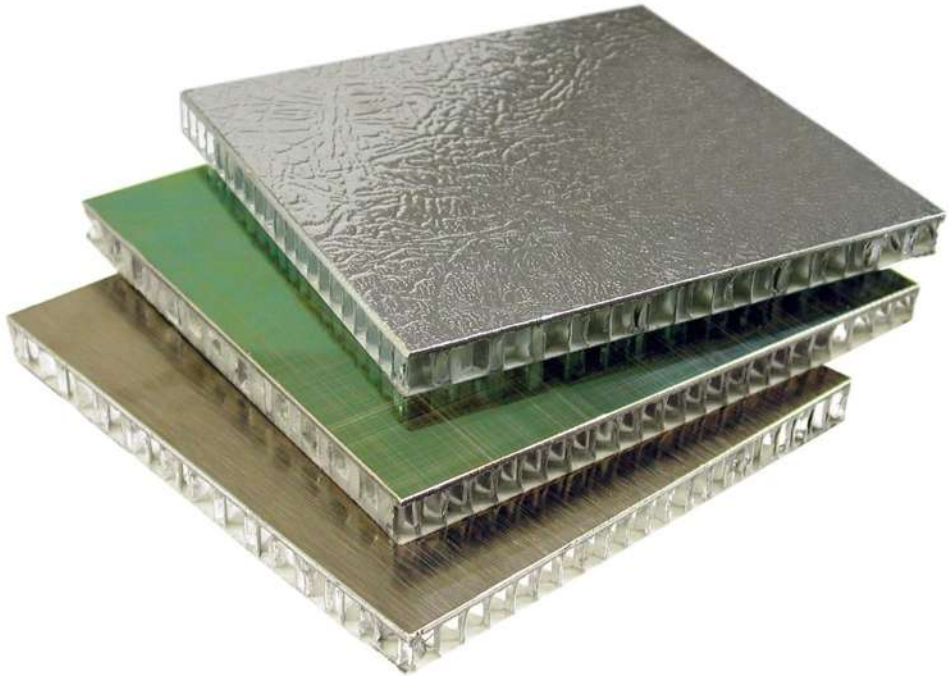


Figura 112. Estructura Tipo Sándwich de Fibra de Vidrio y Aluminio.

Fuente: http://www.climastoluca.com/wp-content/uploads/2015/01/panel-sandwich-cara-fibra-vidrio-alma-nido-abeja-aluminio-90136-3401673.jpg **[112]**

Un componente suele ser un agente reforzante como una fibra fuerte: fibra de vidrio, cuarzo o fibra de carbono que proporciona al material su fuerza a tracción, mientras que otro componente (llamado matriz) que suele ser una resina como epóxica o poliéster que envuelve y liga las fibras, transfiriendo la carga de las fibras rotas a las intactas y entre las que no están alineadas con las líneas de tensión. También, a menos que la matriz elegida sea especialmente flexible, evita el pandeo de las fibras por compresión. Algunos compuestos utilizan un agregado en lugar o en adición a las fibras.

De esta forma la matriz tiene un carácter continuo, mientras que el agente reforzante tiene un carácter discontinuo [61].

Los componentes del material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales deben poderse identificar por medios físicos, ya que son heterogéneos. El hecho de que los materiales compuestos sean heterogéneos muchas veces hace que también sean anisotrópicos (sus propiedades dependen de la orientación del material de refuerzo), por lo que hace que sus propiedades no serán las mismas en todo su volumen [62].

2.13.2 Clasificación

Los materiales compuestos se pueden clasificar en función de:

a) En función del tipo de matriz:

- **Materiales compuestos de matriz metálica (MMC):** Estos materiales tienen una alta resistencia y muy bajo peso.
- **Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC):** Mejores propiedades mecánicas que los materiales cerámicos tradicionales, como la resistencia y la tenacidad, especialmente en rangos de bajas temperaturas.
- **Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC):** Son materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, y a causa de sus propiedades físicas, pueden ser moldeados con absoluta libertad de formas [62].

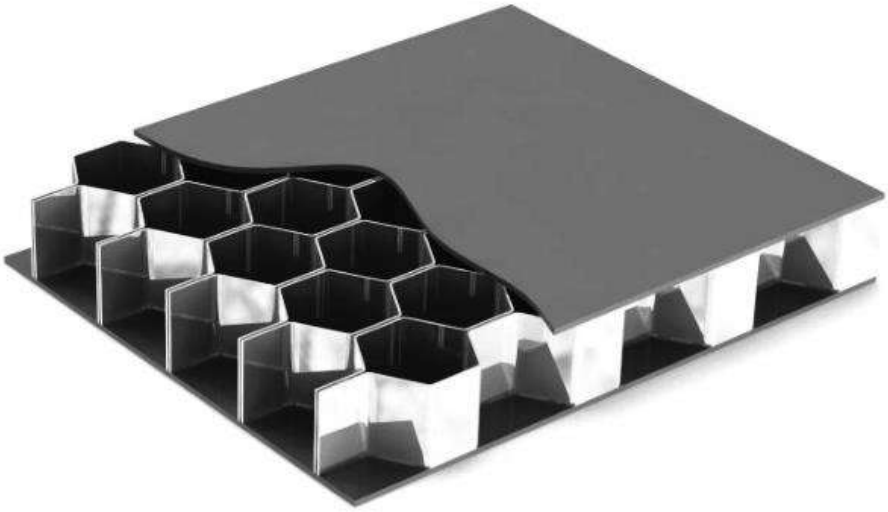


Figura 113. Estructura Tipo Sándwich de Matriz Metálica.

Fuente: https://www.researchgate.net/publication/316849097/figure/fig3/AS:493376387719168@1494641505018/Honeycomb-structure-Honeycomb-structures-are-highly-laborious-in-manufacturing-and.png **[113]**

b) En función de la forma que posea el refuerzo:

- **Compuestos reforzados por partículas:** En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. Los compuestos reforzados con partículas, se subdividen en reforzados con partículas grandes y endurecidos por dispersión.
- **Compuestos reforzados por fibras:** Los materiales reforzados por fibras son los composites más importantes desde el punto de vista tecnológico. El objetivo es conseguir materiales con una elevada resistencia a la fatiga y rigidez, a bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad, por lo que se pretende conseguir una mejor relación resistencia-peso. Esta relación se consigue empleando materiales ligeros tanto en la matriz como en las fibras, siempre que estas cumplan con las propiedades mecánicas que se quieren otorgar al composite.
  En función de la forma que posea el refuerzo:
- **Compuestos estructurales:** Un material compuesto estructural está formado tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los elementos estructurales.
  Se clasifican los compuestos estructurales en: compuestos laminares, estructuras sándwich y estructuras no-laminares [62]

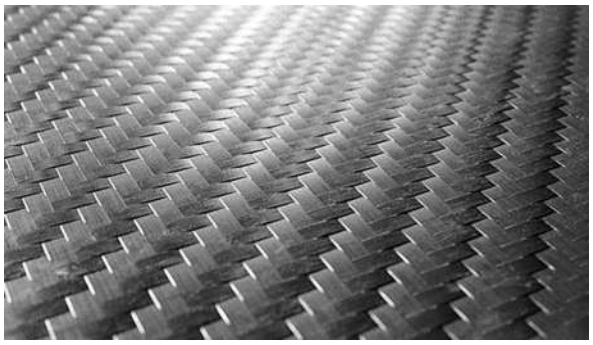


Figura 114. Compuesto Reforzado por Fibras.

Fuente: https://www.ctcalzado.org/web/image/5077/w11.jpg?access_token=0afb3d44-4097-4850-97a5-828f76fdf5d0
[114]

2.13.3 Procesos Y Equipo de Elaboración
Moldeo por colocación manual

El hand lay-up o moldeo por colocación manual es denominado así debido a las bajas o nulas presiones que necesita. Es muy utilizado en la industria aeroespacial debido a su gran flexibilidad.

Se trata de un proceso muy lento, con más de 50 etapas individuales. La etapa de colocación manual de las láminas consume en torno a la mitad del tiempo total del proceso. Los posibles defectos que pueden presentar las piezas fabricadas mediante este método son: arrugas en la

Figura 115. Moldeo Manual de Materiales Compuestos.

Fuente: https://www.ctcalzado.org/web/image/5077/w11.jpg?access_token=0afb3d44-4097-4850-97a5-828f76fdf5d0
[115]

superficie, burbujas de aire atrapadas, poros y picaduras, cuarteado y grietas, mala adherencia al molde, áreas pegajosas y afloramiento de fibras [63].

Filament Winding o Bobinado

El bobinado es un proceso de fabricación en el que se enrollan refuerzos continuos a grandes velocidades y de forma precisa sobre un mandril que rota en torno a su eje de giro. Las velocidades de trabajo se encuentran entre los 90 - 100 m/min para fibras de vidrio y entre los 15 - 30 m/min para fibras de carbono y aramida. Mediante este proceso se pueden alcanzar volúmenes de fibra de hasta un 75%, siendo posible controlar el contenido de resina. No obstante, es necesario que la pieza sea de revolución y sin curvaturas entrantes. La forma de la pieza debe permitir la extracción del mandril. Existen tres modelos de bobinado:

Bobinado helicoidal: el movimiento de rotación del mandril se combina con el movimiento de traslación longitudinal del cabezal de impregnación [63].

Bobinado circunferencial: se trata de una variante del bobinado helicoidal, pero con un ángulo de enrollado de 90º.

Bobinado polar o plano: tanto el movimiento de rotación como el de traslación longitudinal es realizado por el mandril, permaneciendo fijo el cabezal de impregnación.

Este proceso se utiliza para producir cilindros huecos de alta resistencia. La fibra es proporcionada a través de un baño de resina y después es bobinada sobre un cilindro apropiado. Cuando han sido aplicadas suficientes capas, el cilindro (mandril) se cura en un horno. Por último, la pieza moldeada es separada del mandril.

Las aplicaciones a este proceso incluyen tanques químicos y de almacenamiento de

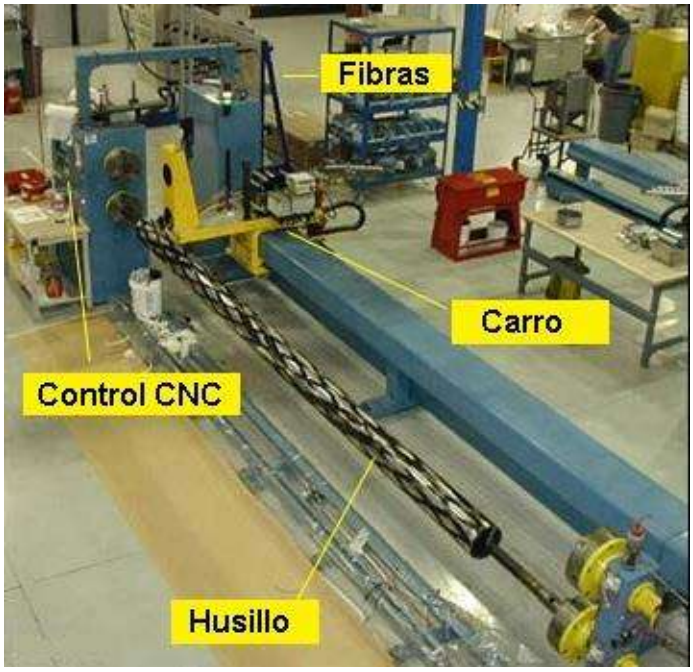


Figura 116. Bobinado de Filamentos.

Fuente: https://2.bp.blogspot.com/-cB5IYjBbkNM/TpwRljXfijI/AAAAAAAABDI/LUrucUFuP54/s1600/bobinado+de+filamento.jpg **[116]**

combustibles, recipientes a presión y cubiertas de motores de cohetes.

Los modelos del proceso proporcionan la siguiente información en función de la posición y del tiempo:

Temperatura en el interior del material compuesto y del mandril.

Grado de curado en el interior del material compuesto.

Viscosidad en el interior del material compuesto.

Posición de las fibras

Tensiones en el interior del material compuesto y en el mandril.

Nivel de porosidad en el interior del material compuesto.

Tiempo de curado.

Procesado en autoclave

Este proceso se lleva a cabo en un autoclave de materiales compuestos y es utilizado para consolidar y curar componentes realizados con materiales compuestos poliméricos, mediante el uso de temperatura y presión.

Las variables de las que depende principalmente este procesado son la temperatura y la presión aplicadas, y vienen definidas por el tipo de material a procesar:

En materiales termoestables son necesarias altas temperaturas para reducir la viscosidad del polímero e iniciar la reacción química de curado. Estas condiciones están en el rango de 175ºC y 600 KPa (poliimidas, PMR-15) pero pueden llegar en ocasiones a rangos de 300-400ºC y 1MPa (PEEK, PEI).

En materiales termoplásticos los requerimientos de temperatura no son los mismos que en termoestables, ya que no hay reacción química que activar para conseguir el curado.

El uso de presión en el proceso es necesario para mantener en todo momento las láminas juntas, y eliminar posibles defectos que pudieran formarse (poros, delaminaciones). La mayor ventaja del conformado en autoclave es la gran flexibilidad para procesar distintas familias de materiales. De hecho, cualquier material polimérico puede ser procesado, siempre y cuando su ciclo de cura se encuentre dentro de las limitaciones de temperatura y presión de la autoclave.

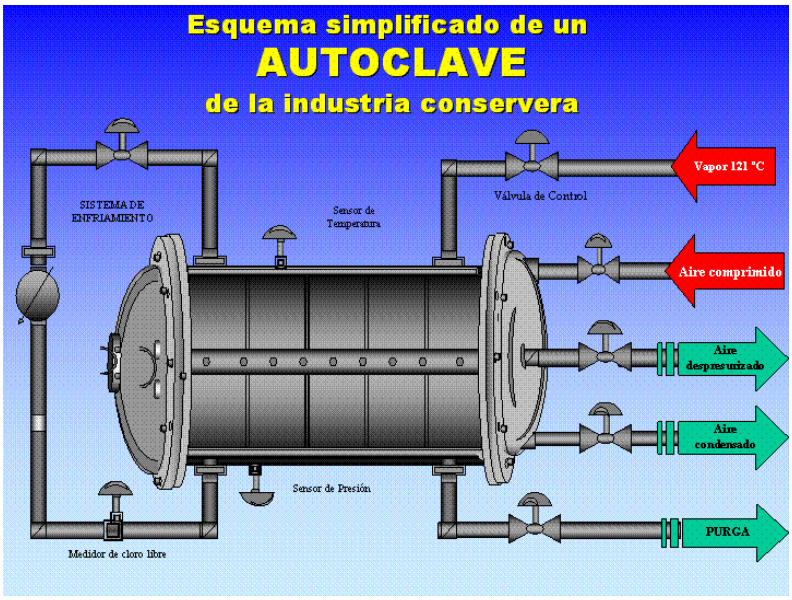


Figura 117. Bobinado de Filamentos.

Fuente: https://paparra.files.wordpress.com/2011/07/esquema.gif **[117]**

Procesos De Fabricación En Molde Cerrado

SMC (Sheet moulding compounds)

El SMC o Sheet Moulding Compounds consiste en el moldeo de una resina termoestable reforzada generalmente con fibra de vidrio en forma de hilos cortados o continuos, obteniendo la pieza final a través de polimerización de la resina por aplicación de presión y temperatura.

Este método de fabricación posee una etapa preliminar en la que se crea el preimpregnado que después se utilizará para realizar la pieza final deseada. Este pre-proceso se basa en utilizar mechas de fibra de vidrio en cordones continuos que se cortan en pedazos (de unos 5cm) sobre una capa de relleno de resina transportada sobre una película de polietileno. Posteriormente, una vez la capa inferior tiene todas las fibras distribuidas se coloca otra capa de relleno de resina sobre la primera formando un sándwich. Este sándwich se compacta y enrolla en rodillos de embalaje calibrados. Los rollos de preimpregnado se almacenarán para dejar que la fibra se asiente con la matriz termoestable. Las fibras de vidrio pueden presentarse no sólo como fibras cortadas, sino también hay casos en los que se utilizan hilos continuos o como mezcla de ambos (hilos continuos y fibras cortadas), en este último caso se obtendrían las mejores propiedades mecánicas.

Finalmente, los rollos de material compuesto se llevan a una prensa, donde se cortan con la configuración adecuada para la pieza a obtener y se colocan en un ajustado molde metálico calentado. Posteriormente la prensa hidráulica se cierra y el SMC fluye uniformemente bajo presión por todo el molde formando el producto final.

Las características principales son:

Buena estabilidad dimensional.

Excelente acabado superficial por ambas caras.

Buenas propiedades de resistencia mecánica.

Posibilidad de obtener geometrías complejas.

Alta capacidad de automatización.

Es un proceso, que por su elevada capacidad de automatización, se utiliza principalmente en producción de grandes series, siendo el automóvil su principal sector (capotas, paneles delanteros...). Este fenómeno hace que el SMC sea actualmente el método más utilizado en la fabricación de materiales compuestos con resinas termoestable.

Inyección

La infiltración de materiales compuestos por inyección, utiliza la misma tecnología que el moldeo por inyección de plásticos tradicional. Pero a diferencia de introducir en el molde únicamente un polímero (ya sea termoplástico o termoestable), se introduce el polímero más un refuerzo.

Las fibras más utilizadas son de vidrio, carbono y aramida. Estos refuerzos afectan notablemente a las propiedades mecánicas del material final. Pero por otro lado presentan algunos inconvenientes como:

Dificultad para controlar el posicionamiento de las fibras en la pieza.

Las fibras pueden reducir notablemente su longitud por rotura con el tornillo sin fin que alimenta el proceso.

Pultrusión

Se trata de un proceso automático muy versátil mediante el que se obtienen perfiles de sección constante. Se utiliza una fibra embebida en una resina termoestable, la cual reacciona cuando se aplica calor. Se tira del material (pull) para evitar roturas y desalineamiento de fibras. Mediante este proceso se puede producir cualquier sección compleja siempre que su espesor sea constante. Además, debido a la precisión de la superficie del molde se obtienen acabados de alta calidad. No obstante, la velocidad del proceso es relativamente baja (3 m/min) comparada con la velocidad de extrusión (30 m/min). Además, resulta muy complicado orientar las fibras en ángulos óptimos.

Descripción del proceso:

El proceso de pultrusión consta de varias etapas:

Las fibras de refuerzo se presentan en forma de bobinas o rollos para favorecer el flujo continuo del material.

Se colocan en carretes sobre ejes con rodamientos especiales para mantener constante la tensión del hilo al ser devanado.

Cuando las fibras se dirigen hacia el sistema de impregnación se hacen pasar por unas placas de alineamiento para evitar torsiones, nudos o daños en los refuerzos.

La clave de todo el proceso de pultrusión es el molde. Debe alinear las fibras y comprimirlas hasta la fracción en volumen deseada, asegurando el curado del material en un tiempo relativamente corto.

Alrededor del molde se colocan placas calefactadas para provocar el calentamiento de la pieza y favorecer la reacción de polimerización de la resina. El parámetro de control más importante es la temperatura interior del molde, que oscila entre los 100ºC y 150ºC.

En el mecanismo de tracción debe existir una distancia de al menos 3 metros entre éste y la salida para asegurar el correcto enfriamiento del perfil mediante convección natural o forzada (por chorro de agua o aire).

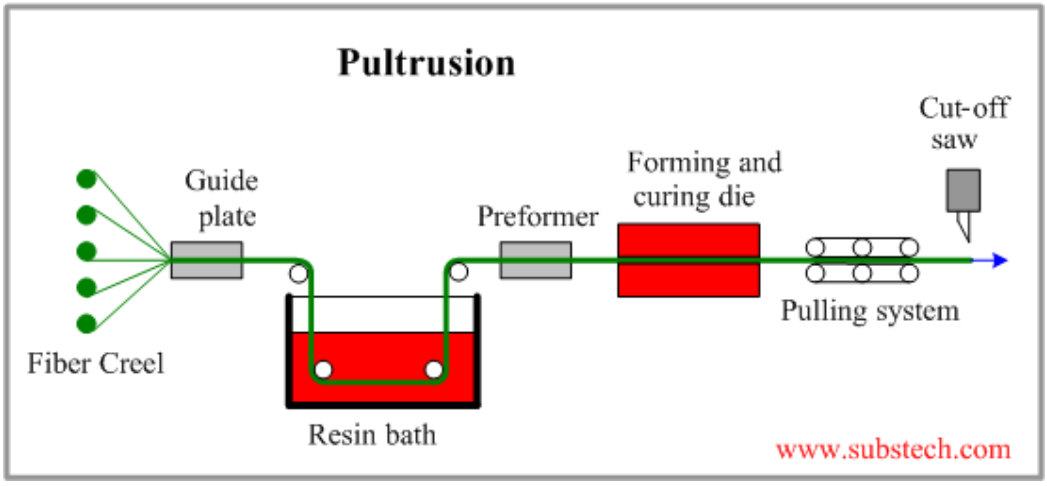


Figura 118. Esquema De Pultrusión.

Fuente: https://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=pultrusion.png [**118]**

RTM (Resin Transfer Moulding)

Se trata de un proceso de fabricación en molde cerrado a baja presión. Puede resumirse en cinco etapas:

Se coloca el tejido de fibras secas en el molde y éste es cerrado.

Se inyecta la resina en el molde mediante una bomba.

Se sella la entrada de resina y la salida de aire.

Se aplica calor (curado)

Tras un período de enfriamiento se abre el molde y se retira la pieza

Debido a la posibilidad de moldear las fibras en seco antes de la inyección de la resina, se consigue una mejor orientación de las fibras, aumentando las propiedades mecánicas del material.

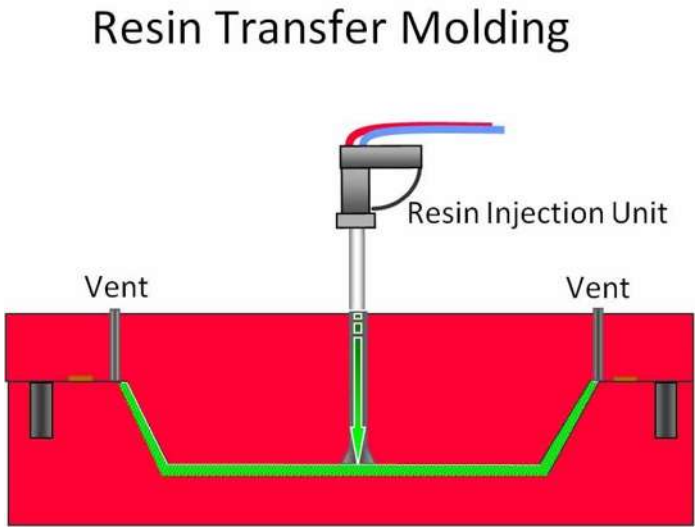


Figura 119. Esquema De RTM.

Fuente: https://www.moldedfiberglass.com/sites/default/files/user/images/MFG_rtm%20_0.jpg **[119]**

2.14 Yeso

2.14.1 Definición

El yeso es un mineral común constituido de sulfato cálcico hidratado ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), su color característico es el blanco, de aspecto terroso o compacto y suele ser bastante blando como para ser rayado con la uña. El yeso es un tipo de roca sedimentaria formado por la precipitación de sulfato de calcio en el agua del mar. Se origina en zonas volcánicas por la acción de ácido sulfúrico sobre minerales con contenido en calcio; asimismo se localiza en muchas arcillas como un producto de la reacción de la caliza con ácido sulfúrico [66].

Figura 120. Yeso Mineral.

Fuente: https://llorensminerals.com/wp-content/uploads/2019/01/Llorens-Sele0151.jpg **[120]**

El sistema de cristalización es monoclínico y su hábito granular-compacto. Se presenta en masas y también en cristales grandes con maclas en punta de flecha o punta de lanza como se muestra en la Figura 113 [67]. Industrialmente, el yeso di hidratado se calienta perdiendo parte del agua y convirtiéndose en un polvo fino semihidratado, conocido como "yeso o escayola de París" o "yeso cocido". Este al mezclarse con agua se hace una pasta que endurece formando moldes [66].

Figura 121. Preparación de Yeso.

Fuente: https://www.arkiplus.com/wp-content/uploads/2013/07/yeso.jpg **[121]**

2.14.2 Clasificación y Aplicaciones

La clasificación de este mineral aglomerante puede hacerse de diferentes maneras debido a su versatilidad de aplicaciones, así pues, siendo de manera más objetiva se hará una clasificación para los usos que se le dan en la ingeniería civil o construcción, así como la clasificación que se da en variedades comerciales según la Subsecretaría de Minería de los Estados Unidos Mexicanos.

2.14.3 Tipos de Yeso Utilizados en la Construcción

Figura 122. Esquema del Yeso en la Construcción.

Fuente: Propia **[122]**

Yeso grueso

Se emplea como pasta de agarre o sujeción. Es de mucha utilidad al hacer tabiques, revestimientos interiores, como conglomerante, entre otros.

Yeso fino

Como su nombre lo indica, es más fino que el yeso grueso. Su uso es por lo regular para dar un acabado liso.

Escayola

Es uno de los más conocidos. Es empleado para la elaboración de techos y tabiques.

Escayola especial

Se diferencia de la escayola tradicional, en que su uso es para decoración; como molduras, paneles de tabiques, placas, bovedillas, entre otros.

Yeso prefabricado Posee mayor resistencia que los finos y gruesos. Es utilizado para hacer paneles de yeso y elementos de tabiquería prefabricados [68].

2.14.4 Propiedades

La dureza del yeso es baja, de 1.5 a 2 en la escala de Mohs. La fractura es concoidea y a veces fibrosa o en finas láminas paralelas. De acuerdo a su grado de pureza, se puede decir que el yeso es traslúcido, blanco, gris, amarillento, rojizo, inclusive negro… En todo caso, es de apariencia vítrea y sedosa. Es soluble en agua (a altas temperaturas), ácido clorhídrico y alcohol etílico.

El yeso es conductor del calor y la electricidad. Por eso es también empleado en las construcciones -en interiores- como aislante térmico [67].

2.15 Óxido de Calcio

2.15.1 Definición

El óxido de calcio o más comúnmente conocido como "*cal"* es un conglomerante producto de la calcinación de la piedra caliza a una temperatura que inicie con la descomposición del óxido de calcio. Al ser oxidada se le conoce como "cal viva" u "óxido de calcio"; sin embargo, si es sometida a un tratamiento con agua, se le conoce como "cal apagada" u "hidróxido de calcio" [69].

Figura 123. Muestra de óxido de calcio o cal viva.

Fuente: http://caltek.com.co/wp-content/uploads/2019/08/cal.jpg **[123]**

Las cales deben ser blancas y libres de materias extrañas, deben rebasar el 92% en su contenido de Oxido de calcio (CaO), con un porcentaje de menos de un 4 % de anhídridos carbónico (AO_2), cuando son producidas y no más del 7% cuando se encuentra en su destino; la Sílice (SO_2) en no más del 2 %, el Hierro y el Aluminio en su forma de óxido (Fe_2O_3 y AL_2O_3), en el 1% máximo; la Magnesia (MgO) en el 1.75% y el Azufre en (S) y el Fósforo (P_2O_5) en 0.20 y 0.05% en su máxima cuantía.

Los hidróxidos de calcio o cales apagadas, además de reunir las condiciones señaladas en las propiedades de los óxidos, deberán tener un mínimo de 68 a 70% de óxido de calcio aprovechable, y más del 90% de hidróxido de calcio $(OH)_2Ca$.

2.15.2 Clasificación y Tipos de Cal

Cal Viva

Se obtiene de la calcinación de la caliza que al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada), se aplique en la construcción.

Cal hidratada

Se conoce con el nombre comercial de cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la cual es una base fuerte formada por el metal calcio unido a dos grupos hidróxidos.

Cal hidráulica

Cal compuesta principalmente de hidróxido de calcio, Sílica (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) o mezclas sintéticas de composición similar. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua.

2.15.3 Tipos de Cal con base al porcentaje de Óxido de Calcio

Cal Grasa

Es la más blanca, fabricadas con piedra caliza de gran pureza y que contenga menos de 5% de arcilla, que en presencia de agua reaccionan con fuerte desprendimiento de calor.

Cales Magras

Son las que proceden de la caliza que aunque contengan menos del 5% de arcilla, contienen más del 10% de magnesia. Estas cales al añadirles agua para hacer la cal apagada se deslíen y disuelven, por lo que no se usan en la construcción.

Cales hidráulicas

Proceden de la calcinación de la caliza que contienen más del 10% de arcilla y tiene la propiedad de poder fraguar en sitios húmedos y aún debajo del agua [69].

2.15.4 Aplicaciones

Al ser un material tan versátil podemos encontrar una diversidad de usos y aplicaciones en diferentes campos como son: la construcción, agricultura, metalurgia, entre otros. A continuación, se realizó una síntesis de las aplicaciones que se realizan en dichos campos:

- Construcción: es aplicado en el suelo para estabilizarlo, para la mezcla con cemento, como también para la fabricación de ladrillos, carreteras y obras públicas.

- Agricultura y alimentos: ayuda a mejorar los campos agrícolas, los vegetales y los animales.
- Fabricas metalúrgicas: es fundamental para la flotación, la cual separa el mineral de las impurezas ayudando también a regular el PH de las aguas con el fin de ser utilizadas en algún proceso químico. Es excelente para la fundición de cobre, zinc y plomo.

- Productos químicos: es utilizado para curaciones dentales, creaciones de medicamentos.

- Productos para el medio ambiente: la cal es necesaria para el tratamiento de aguas residuales, tratamiento de suelos contaminados, depuración de gases tóxicos, entre otros [70].

Figura 124. Estabilización de suelo con cal viva.

Fuente: https://www.maximaonline.com.ar/multimedia/noticias/img_61598_1538315065jpg.jpg **[124]**

CAPÍTULO 3
DISEÑO EXPERIMENTAL

CAPITULO 3. DISEÑO EXPERIMENTAL.

Figura 125. Esquema Experimental Del Material Compuesto.

Fuente: Propia **[125]**

3.1 Polímero

Fabricación**.** Para la elaboración de este polímero se utilizaron 200 gr de hojuela de Polipropileno (5) reciclado.

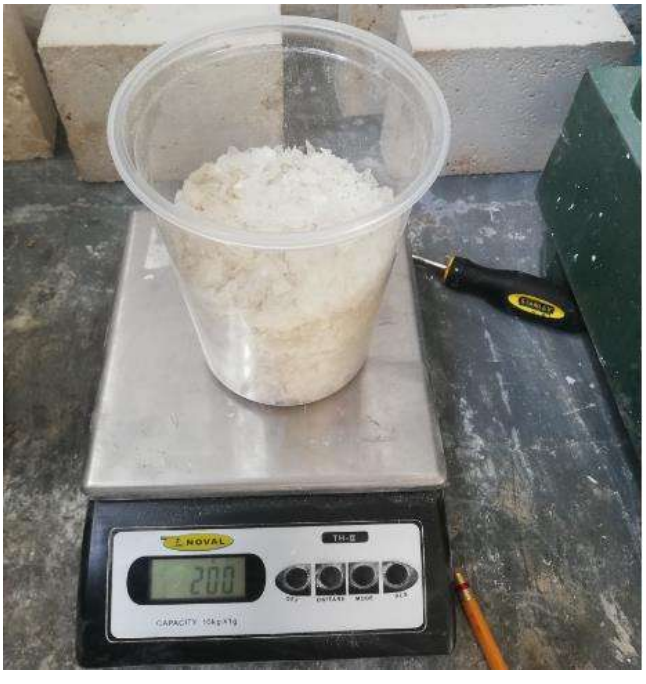


Figura 126. Muestra Representativa de Polipropileno (5).

Fuente: Propia **[126]**

Seguido de colocarlas en moldes de acero con un área interior de 175(174.8) cm^2, realizando cinco piezas por lote con la finalidad de realizar las pruebas mecánicas y tener un detalle del margen de error por pieza.

Figura 127. Preparación en los moldes para la elaboración del elemento.

Fuente: Propia **[127]**

Una vez preparadas las muestras en los moldes se pasó a colocar en el horno desde una temperatura ambiente (16° C) hasta que alcance los 220° C y comience la fusión del material, ascendiendo la curva térmica en un tiempo de una hora y media, dejándose enfriar dentro del

Figura 128. Colocación en el horno de las muestras para su fusión.

Fuente: Propia **[128]**

horno para evitar cambios bruscos de temperatura que deformen el elemento.

El resultado final será desmolado y con ello se le dio un acabado con lija para eliminar las imperfecciones que quedaron tras la fusión del elemento.

Figura 130. Muestras frías y desmoldado de las mismas.

Fuente: Propia **[130]**

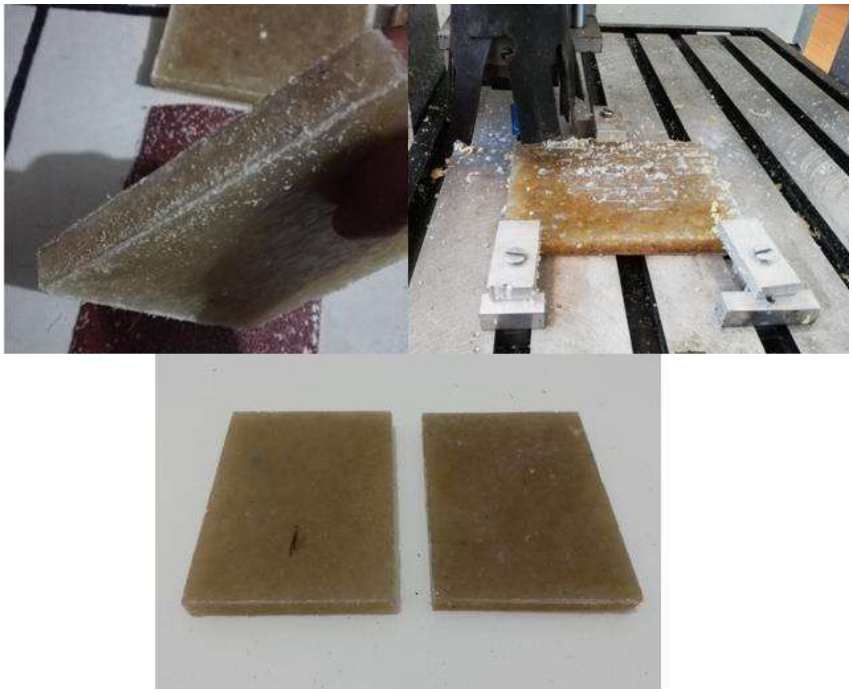


Figura 131 Lijado de los Elementos y Muestras Terminadas.

Fuente: Propia **[131]**

3.2 ECOCEMENTO

Fabricación**.** Para la elaboración de este eco material se hizo uso de dos materiales que pudiesen mantener las propiedades que un cemento convencional, los cuales fueron el óxido de calcio(cal) y el sulfato de calcio hidratado (yeso) y un agregado pétreo de grano especial como la marmolina.

La proporción utilizada para la elaboración del ecocemento fue de 1:1; mientras para la mezcla seca fue utilizado una proporción 1:2 (cementante-agregado). Siendo 500 gr de mezcla seca de ecocemento y 1000 gr de agregado pétreo.

Mientras tanto para la elaboración de la mezcla húmeda se utilizaron 375 gr de agua, dejando una relación agua-cemento de 0.65.

Figura 132. Pesaje para el Proporcionamiento con una relación a/c=0.65.

Fuente: Propia **[132]**

Se realizó el mezclado de la manera convencional en que se podría realizar para cualquier mezcla cemento-arena-agua. Una vez con la mezcla realizada se pasó a engrasar los moldes de acero (utilizados en la elaboración de las placas poliméricas) para una fácil remoción de las piezas tras un tiempo de fraguado de 24 horas.

Figura 133. Engrasado de los Moldes.

Figura 134. Colocado y fraguado de la mezcla en los moldes.

Fuente: Propia **[134]**

Figura 135. Elementos Fraguados del Ecocemento.

Fuente: Propia **[135]**

3.3 Material Compuesto

Fabricación**.** Para la elaboración de este material compuesto, se utilizó cianoacrilato de metilo la cual es una resina adhesiva que polimeriza o fragua en presencia de agua (en este caso la humedad del ambiente) formando largas cadenas, que unen las superficies [72].

Figura 136. Unión del polímero y el Ecocemento mediante Cianoacrilato de metilo

Fuente: Propia **[136]**

Figura 137. Elementos Fraguados por Cianoacrilato.

Fuente: Propia **[137]**

Figura 138. Elementos Compuestos.

Fuente: Propia **[138]**

3.4 Producto Final

Para esto solo se buscó dar una mejor presentación para nuestro adoquín, con base de una película lenticular que le dieron un cambio a la cara de nuestro producto sin cambiar las propiedades mecánicas del mismo. Asentando el recubrimiento termoplástico mediante la aplicación del mismo adhesivo que se utilizó para unir el material compuesto.

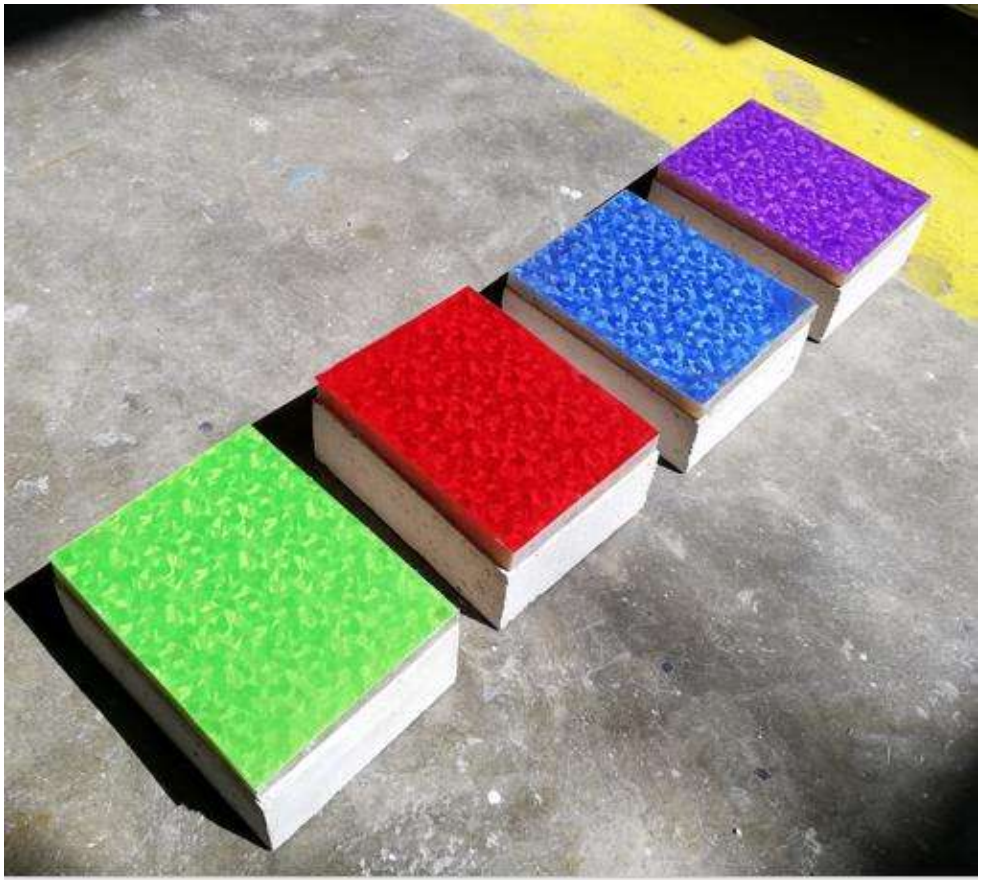


Figura 139. Modelos de Adoquín Ecológico.

Fuente: Propia **[139]**

Figura 140. Efecto lenticular reflejante de la superficie del adoquín.

Fuente: Propia **[140]**

Figura 141. Tapete de Adoquín Ecológico.

Fuente: Propia **[141]**

CAPÍTULO 4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

CAPITULO 4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

4.1 Propiedades Físicas

Polímero

Largo: 15.2 cm	Área: 174.80 cm^2	Tiempo de Fusión: 90 minutos
Ancho: 11.5 cm	Volumen: 174.80 cm^3	Punto de Fusión: 200 °C
Espesor: 1.0 cm	Peso: 200 gr	Densidad: 1.14 g/ cm^3

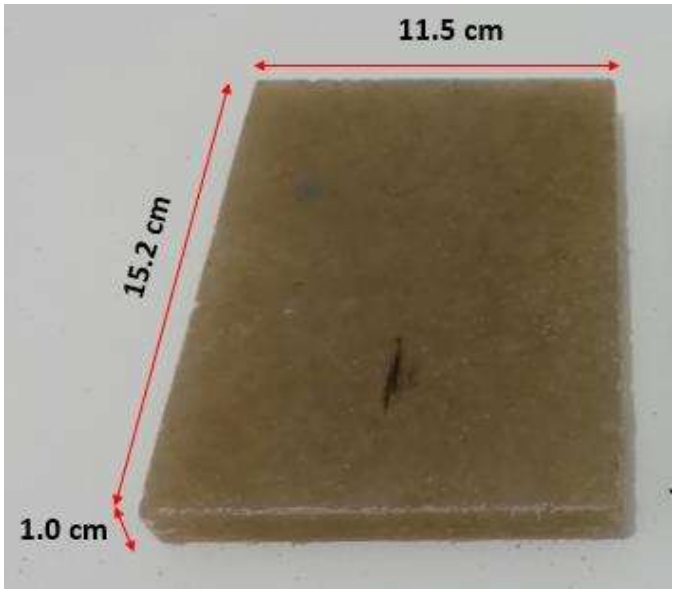


Figura 142. Dimensiones de una Placa.

Fuente: Propia **[142]**

Figura 143. Fusión de las Placas a 200 °C.

Fuente: Propia **[143]**

Ecocemento

Largo: 15.2 cm	Área: 174.80 cm^2	Tiempo de Fraguado: 20 minutos
Ancho: 11.5 cm	Volumen: 874.0 cm^3	Temperatura de Fraguado: 16 °C
Espesor: 5.0 cm	Peso: 2000 gr	Densidad: 2.28 g/ cm^3

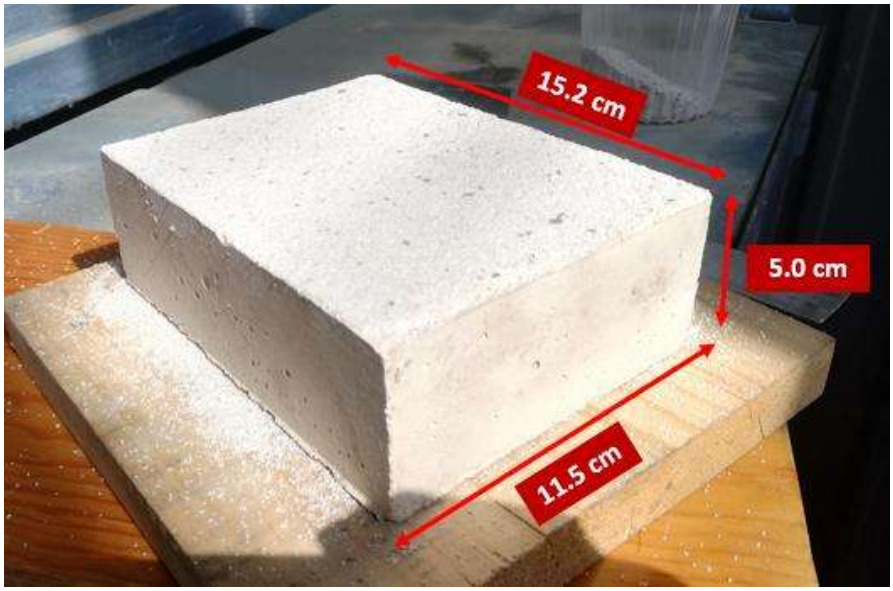


Figura 144. Dimensiones del Bloque de Ecocemento.

Fuente: Propia **[144]**

Figura 145. Piezas Fraguadas a 16 °C.

Fuente: Propia **[145]**

Material Compuesto

Largo: 15.2 cm	Área: 174.80 cm^2	Tiempo de Adhesión: 5 minutos
Ancho: 11.5 cm	Volumen: 1048.80 cm^3	Densidad: 2.10 g/ cm^3
Espesor: 6.0 cm	Peso: 2200 gr	

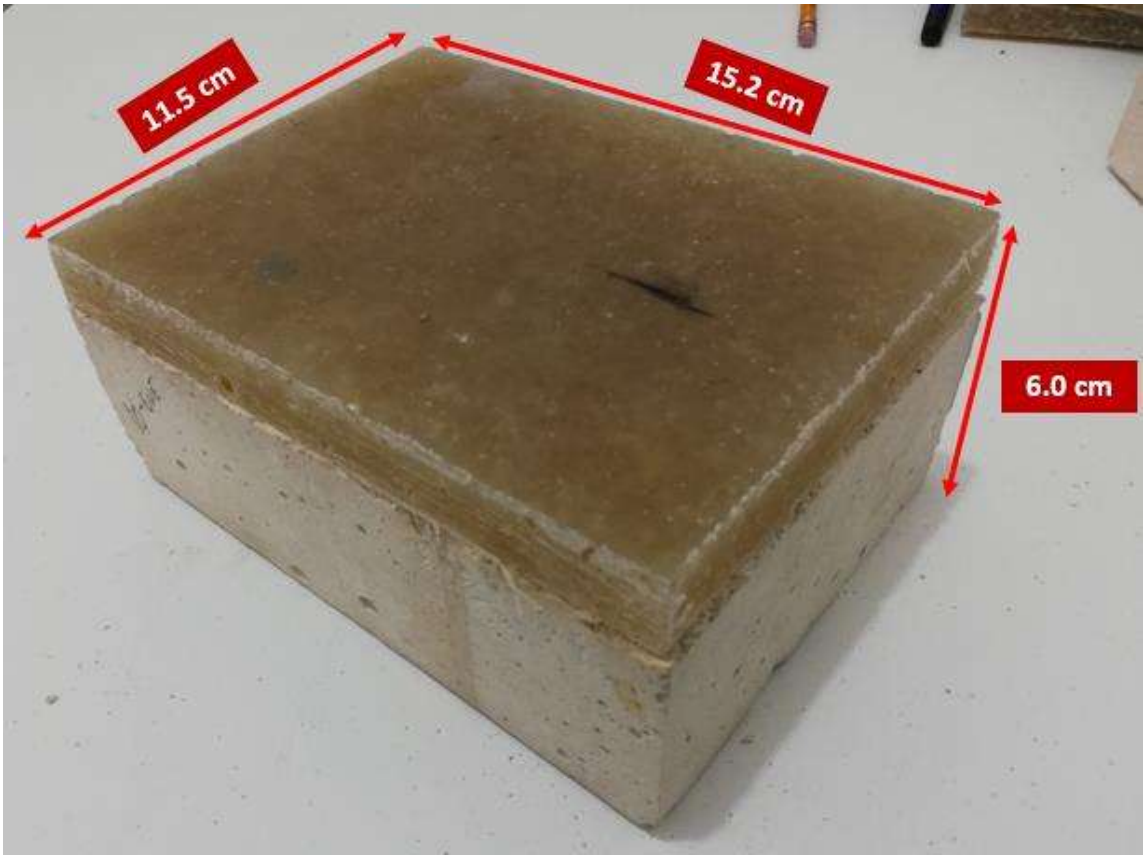


Figura 146. Dimensiones del Material Compuesto.

Fuente: Propia **[146]**

4.2 Propiedades Mecánicas

Para conocer esto, se centró en la resistencia a la compresión simple con base a la utilidad o función que tiene nuestro elemento. Pasando a utilizar una Prensa Hidráulica como apoyo para realizar los respectivos ensayos, utilizando 6 probetas en el caso de los bloques de Ecocemento, 6 en los materiales compuestos y con la excepción de las placas de polipropileno (5) que solo se utilizó una por el diseño experimental propuesto.

Polímero

.

Figura 147. Probeta 1.

Fuente: Propia **[147]**

Se realizó un cabeceado con marmolina en la parte superior de la placa de polipropileno (5) con el fin de mantener una superficie uniforme debido a las imperfecciones que suelen quedar por el choque térmico tras la fusión del polímero.

Figura 147. Cabeceado de la Probeta 1.

Fuente: Propia **[147]**

Seguido de pasar a colocarla con exclusivo cuidado para no causar variaciones de fuerza durante la aplicación de la misma.

Figura 147. Cabeceado de la Probeta 1.

Fuente: Propia **[147]**

Llevando la prueba acabo se determinó una resistencia a la compresión excelente por parte del material, llegando a presentar pocas o nulas deformaciones hasta las 116.84 toneladas de presión, por lo que se optó por detener la presión y remover la probeta, debido a que el apoyo de acero de la prensa comenzó a deformarse, como se muestra en la figura 149.

Figura 148. Probeta 1.

Fuente: Propia **[148]**

Figura 149. Apoyo Deformado.

Fuente: Propia **[149]**

Ecocemento

Las siguientes pruebas fueron aplicadas a 6 elementos fraguados a 40 días. Realizando los ensayos el día 13/01/2020.

Probeta 1

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 10.3 ton Máxima Resistencia: 11.10 ton

Espesor: 5.0 cm Peso: 2000 gr Esfuerzo: 63.50 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 11099.80 kg

Figura 150. Ensayo, fisura y falla de la probeta 1.

Fuente: Propia **[150]**

Probeta 2

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 3.40 ton

Espesor: 5.0 cm Máxima Resistencia: 11.40 ton

Peso: 2000 gr Esfuerzo: 65.22 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 11400.46 kg

Figura 151. Ensayo y falla de la probeta 2.

Fuente: Propia **[151]**

Probeta 3

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 4.00 ton Máxima Resistencia: 11.50 ton

Espesor: 5.0 cm Peso: 2000 gr Esfuerzo: 65.79 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 11500.09 kg

Probeta 4

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 2.9 ton Máxima Resistencia: 10.50 ton

Espesor: 5.0 cm Peso: 2000 gr Esfuerzo: 59.67 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 10430.32 kg

Probeta 5

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 3.0 ton Máxima Resistencia: 11.27 ton

Espesor: 5.0 cm Peso: 2000 gr Esfuerzo: 63.63 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 11122.52 kg

Probeta 6

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 3.4 ton Máxima Resistencia: 11.05 ton

Espesor: 5.0 cm Peso: 2000 gr Esfuerzo: 62.80 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 10977.44 kg

Resultado Promedio del Ecocemento

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 4.50 ton Máxima Resistencia: 11.14 ton

Espesor: 5.0 cm Peso: 2000 gr Esfuerzo: 63.42 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 11085.82 kg = 11.08 ton

Figura 152. Fallas Perimetrales en las probetas.

Fuente: Propia **[152]**

Material Compuesto

Las siguientes pruebas fueron aplicadas a 6 elementos fraguados a 40 días con adhesión del polímero a los 5 días. Realizando los ensayos el día 16/01/2020.

Probeta 1

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 4.58 ton Máxima Resistencia: 10.12 ton

Espesor: 6.0 cm Peso: 2200 gr Esfuerzo: 57.89 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 10119.17 kg

Figura 153. Ensayo, fisura y falla de la probeta 1.

Fuente: Propia **[153]**

Probeta 2

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 0.62 ton Máxima Resistencia: 8.90 ton

Espesor: 6.0 cm Peso: 2200 gr Esfuerzo: 50.92 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 8900.82 kg

Figura 154. Ensayo, fisura y falla de la probeta 2.

Fuente: Propia **[154]**

Probeta 3

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 0.85 ton Máxima Resistencia: 10.12 ton

Espesor: 6.0 cm Peso: 2200 gr Esfuerzo: 57.78 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 10099.94 kg

Probeta 4

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 2.35 ton Máxima Resistencia: 6.90 ton

Espesor: 6.0 cm Peso: 2200 gr Esfuerzo: 39.47 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 6899.36 kg

Probeta 5

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 3.0 ton Máxima Resistencia: 7.0 ton

Espesor: 6.0 cm Peso: 2200 gr Esfuerzo: 40.05 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 7000.74 kg

Probeta 6

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 4.6 ton Máxima Resistencia: 10.07 ton

Espesor: 6.0 cm Peso: 2200 gr Esfuerzo: 57.11 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 9982.83 kg

Resultado Promedio del Material Compuesto

Área de Contacto: 174.80 cm^2 Fisura: 2.67 ton Máxima Resistencia: 8.85 ton

Espesor: 6.0 cm Peso: 2200 gr Esfuerzo: 50.63 kg/cm^2

Resistencia a la compresión total de la pieza: 8850.12 kg = 8.850 ton

Figura 155. Fisura y falla de las probetas.

Fuente: Propia **[155]**

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 Polímero

La resistencia a la compresión que presentó la placa de polipropileno fue excelente debido a sus propiedades elásticas y de capacidad de deformación, siendo que la deformación del polímero fue escasa o nula por la misma situación expuesta anteriormente, quedando solo medio centímetro más como resultado del aplastamiento, prácticamente nula deformación tras 116.84 toneladas de presión en la prensa hidráulica.

Figura 156. Probeta deformada después de la prueba a compresión.

Fuente: Propia **[156]**

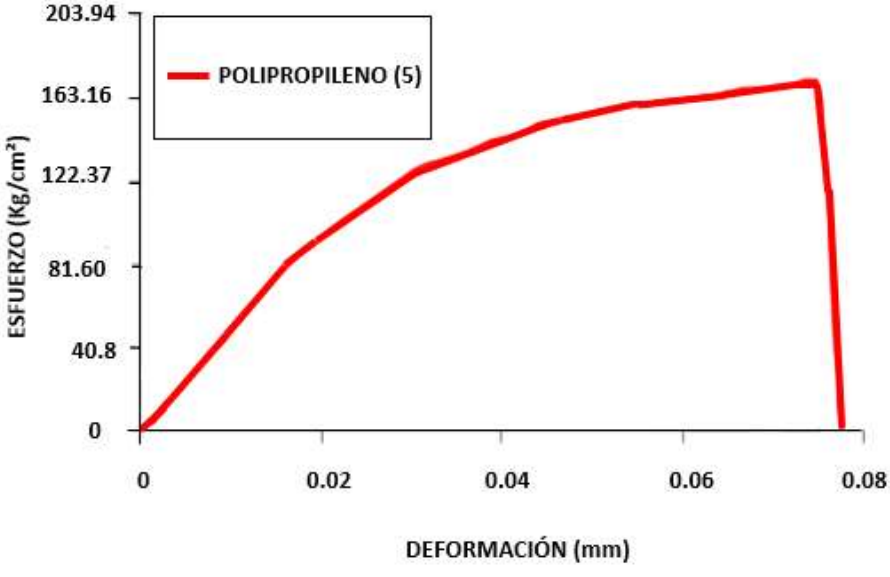


Figura 157. Grafica Esfuerzo-Deformación del Polipropileno.

Fuente: Propia **[157]**

5.2 Ecocemento

Las pruebas a compresión como fue expresado en el capítulo anterior se realizaron a los 40 días de fraguados los elementos, por lo que las resistencias por pieza no variaban de entre las once y las doce toneladas, teniendo un promedio de resistencia a la compresión de 11.08 toneladas; sin embargo, la aparición de la primera fisura fue algo que tuvo una excepción en una de las seis probetas, apareciendo está en la primera de ellas a las 10.3 toneladas, mientras en las otras piezas comenzó a aparecer a una presión más temprana que ronda entre las 3 y las 4 toneladas. Adjudicando este fenómeno a las imperfecciones que pudiesen haber sobresalido en el relieve del área de contacto con la prensa hidráulica, esto a pesar del cabeceo realizado para las mismas.

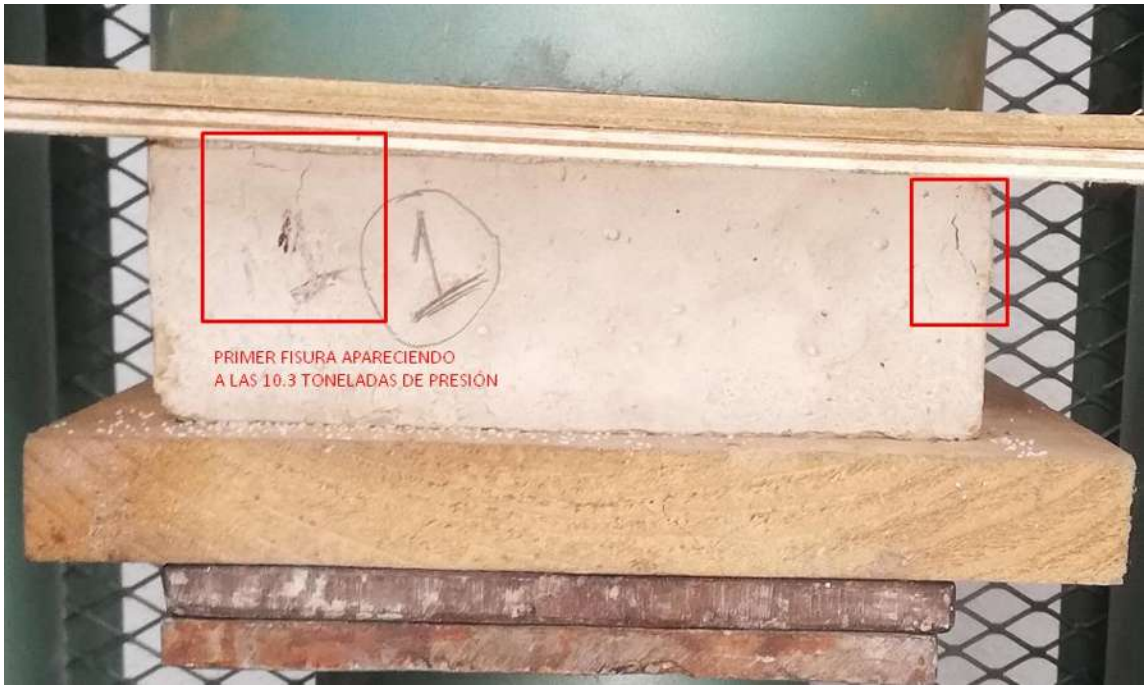


Figura 158. Primer Fisura a las 10.3 Ton.

Fuente: Propia **[158]**

Así pues, con esto dicho podemos seguir con el siguiente evento en las pruebas a compresión el cual se basa en el peculiar fallo que presentaron las probetas después de cierta resistencia, tal y como se expresó en el capítulo anterior presentando en promedio el fallo a las 11.14 toneladas de presión, teniendo entonces una resistencia por pieza de 11.08 toneladas netas y fallando de una manera perimetral y presentando una mayor resistencia al centro de la pieza como se muestra en las siguientes imágenes.

Figura 159. Fallo Perimetral de las muestras por la carbonatación.

Fuente: Propia **[159]**

Fallando de esta manera debido a la calcificación o formación de Sulfato de Calcio en forma de cristales, los cuales junto con el hidroxilo de calcio forman el cementante de nuestro Ecocemento, concentrando estos cristales al centro y dejando oquedades pequeñas en la zona perimetral del bloque, las cuales se llenan con aire generando la carbonatación y provocan el colapso por la compresión.

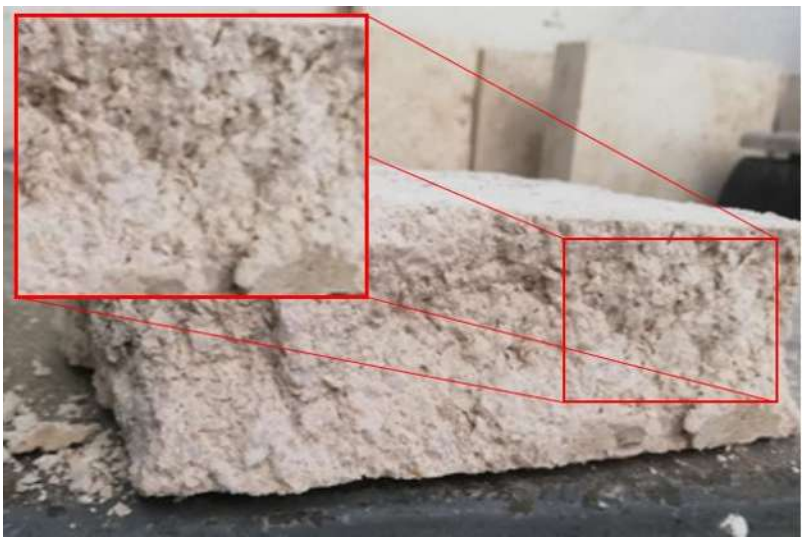


Figura 160. Cristales de $CaCO_3$+$Ca(OH)_2$+ $CaSO_4 \circ 2H_2O$ +H_2O.

Fuente: Propia **[160]**

5.3 Material Compuesto

Como se mencionó en el capítulo anterior, las pruebas fueron realizadas a 6 probetas del material compuesto con elementos de las placas de polipropileno (5) y los bloques de Ecocemento fraguados a los 40 días.

Estimando una resistencia mayor por la combinación de ambos elementos; sin embargo, se tuvo una reducción en la resistencia total a la compresión, donde esto se atribuye a las imperfecciones que quedan en la placa de polipropileno por causa del choque térmico tras su enfriamiento después de la fusión dentro del horno. Quedando entonces estos mínimos valles que quedan en el elemento incluso tras el lijado del mismo y afectando entonces en el área de contacto donde se aplicó el cianoacrilato de metilo para formar el material compuesto con la adhesión hacía el bloque de Ecocemento.

Figura 161. Valles residuales tras el lijado de la placa y fracturas tempranas por los mismos.

Fuente: Propia **[161]**

Así pues, eventualmente tras la fuerza de compresión aplicada las piezas fallaron en promedio a las 8.85 toneladas de presión, dejando el mismo tipo de falla perimetral por la carbonatación en la superficie de la pieza hacía adentro de la misma tal como se mencionó en el apartado anterior del análisis del Ecocemento, siendo la única diferencia el fallo a una presión más temprana por la unión con el polímero; sin embargo, la resistencia al centro de la pieza si se incrementó debido a la placa de polipropileno (5) que fungió como una protección que solo sufrió deformaciones en su superficie por la presión, dejando la perspectiva en planta del elemento intacta, por lo que se diría que una vez aplicado en la

realidad como adoquines colocados a hueso la falla del elemento no sería visible, así como la transmisión de cargas no se vería afectada debido a que se transmitirían al centro del elemento donde las fallas que se presentan son nulas debido a la formación de cristales de sulfato de calcio.

Figura 162. Fallas Perimetrales en el Ecocemento.

Fuente: Propia **[162]**

Figura 163. Resistencia superior al centro a causa de la carbonatación y las placas.

Fuente: Propia **[163]**

CAPÍTULO 6
CONCLUSIONES

CAPITULO 6. CONCLUSIONES.

1. A través de este trabajo de tesis fue posible obtener un nuevo producto ecológico para la industria de la construcción, con propiedades físicas y mecánicas diferentes de los productos actuales y disponibles en el mercado. Este nuevo producto ha funcionado de manera satisfactoria aportando un mayor confort en los usuarios y aprovechando materiales post-consumo.

2. El presente proyecto se desarrolló sin requerimientos o infraestructura de alta tecnología, lo que lo hace ideal para su escalamiento industrial dado que se requieren solamente moldes metálicos, molino triturador, balanzas y un horno.

3. El uso de materiales plásticos para el desarrollo de la superficie de estos nuevos adoquines lo hace ideal dado que los termoplásticos utilizados tienen un porcentaje de absorción de agua extremadamente bajo menor al 1% y además puede incluir cualquier color o acabado que se desee por su versatilidad; pudiendo crear superficies anti-derrapantes, fáciles de lavar, estéticas aislantes de las corrientes eléctricas.

4. En cuanto a la matriz de Ecocemento se concluye que aun cuando la mezcla cal-yeso no puede ser usada con fines estructurales, si puede usarse para aplicaciones no estructurales como el presente caso, siendo entonces que los envolventes de cal con los cristales de yeso incrementan su resistencia al agua, es decir disminuyen la solubilidad del yeso.

5. El material compuesto obtenido tiene una resistencia a la compresión por pieza de 8.04 toneladas en un área de 174.5 cm2 por lo tanto para construir un metro cuadrado se requieren un aproximado de 58 piezas que considerando una carga de 8.04 toneladas por pieza tenemos que un metro cuadrado sería capaz de resistir una carga uniformemente distribuida de 458.28 toneladas. De lo anterior se puede ampliar la gama de aplicaciones inicialmente propuestas.

CAPÍTULO 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DIGITALES

CAPITULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DIGITALES.

[1] William F. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ed. McGraw-Hill,1997, pp. 343.

[2] Luz Rosario Maldonado Barbero, Clasificación de polímeros, Presentación PPT publicada en 2016, https://slideplayer.es/slide/10296353/

[3] https://www.losadhesivos.com/elastomero.html

[4] https://www.mexpolimeros.com/elast%C3%B3mero%20termoplastico.html

[5] https://www.ecured.cu/Caucho#Aplicaciones_y_usos

[6] https://www.mexpolimeros.com/sbr.html

[7] https://www.monografias.com/trabajos35/caucho-sbr/caucho-sbr.shtml#clasif

[8] http://www.erica.es/web/caucho-natural/

[9] https://pslc.ws/spanish/silicone.htm

[10] https://www.quiminet.com/articulos/conozca-las-propiedades-aplicaciones-y-beneficios-de-las-siliconas-2664664.htm

[11] https://www.losadhesivos.com/silicona.html

[12] https://www.quiminet.com/articulos/el-neopreno-sus-caracteristicas-y-presentaciones-2642332.htm

[13] https://www.decaucho.top/caucho-acrilo-nitrilo-nbr/

[14] http://www.erica.es/web/nitrilo-butadieno-acrilonitrilo/

[15] https://www.decaucho.top/caucho-epdm/

[16] http://www.erica.es/web/epdm-etileno-propileno/

[17] https://www.quiminet.com/articulos/que-es-el-grado-de-polimerizacion-2560304.htm

[18] https://www.academia.edu/20792669/POLIMERIZACION

[19] J.M.G. Cowie, Valeria Arrighi, Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials, Third Edition Edit. CRC press Taylor & Francis Group, 2007, pp 62

[20] William D. Callister Jr., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Ed. Reverté, S.A., 1996, pp. 514.

[21] https://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno

[22] https://pslc.ws/spanish/pe.htm

[23] https://conceptodefinicion.de/polietileno/

[24] https://es.wikipedia.org/wiki/Polietileno

[25] https://www.quiminet.com/articulos/tipos-de-polietileno-28004.htm

[26] https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/07/polietileno-pe.html

[27] https://www.textoscientificos.com/polimeros/polipropileno/aplicaciones

[28] https://www.metacrilatos.net/2017/12/moldeos-del-polipropileno.html

[29] William F. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ed. McGraw-Hill,1997, pp. 367.

[30] William D. Callister Jr., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Ed. Reverté, S.A., 1996, pp. 515.

[31] http://www.petroquim.cl/que-es-el-polipropileno/

[32] http://canalconstruccion.com/polipropileno-usos-y-caracteristicas.html

[33] William D. Callister Jr., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Ed. Reverté, S.A., 1996, pp. 514.

[34] https://www.quiminet.com/articulos/todo-acerca-del-polipropileno-4455.htm

[35] https://es.wikipedia.org/wiki/Polipropileno

[36] William F. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ed. McGraw-Hill,1997, pp. 369.

[36] William F. Smith, Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ed. McGraw-Hill,1997, pp. 370,371.

[37]https://www.muyinteresante.com.mx/preguntas-y-respuestas/que-son-los-microplasticos/

[38] Elisa Rojo-Nieto y Tania Montoto, Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global, Ed. Ecologistas en Acción, 2007 pp. 12.

[39] https://www.ecologiaverde.com/que-son-los-microplasticos-definicion-y-tipos-1543.html

[40] Elisa Rojo-Nieto y Tania Montoto, Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global, Ed. Ecologistas en Acción, 2007 pp. 28.

[41] https://www.greenteach.es/microplasticos-consecuencias/

[42] Elisa Rojo-Nieto y Tania Montoto, Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global, Ed. Ecologistas en Acción, 2007 pp. 30

[43] https://www.cuerpomente.com/ecologia/medio-ambiente/microplasticos-contaminan-mar-llegan-nuestros-alimentos_1604

[44] https://www.tekcrispy.com/2018/10/23/microplasticos-heces-humanas/

[45] http://www.inforeciclaje.com/reciclaje-plastico.php

[46] https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-clasificacion-de-los-plasticos

[47] https://materialesdeingenieriacecar.wordpress.com/2012/03/24/reciclaje-de-polimeros/

[48] https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html

[49] http://www.recicladoslared.es/proceso-de-reciclaje-de-plasticos/

[50] https://www.recytrans.com/blog/el-reciclaje-del-plastico/

[51]http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/249/reciclaje-mecanico.html

[52]http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/250/reciclaje-quimico.html

[53] https://www.construmatica.com/construpedia/Clasificación_de_Elementos_Prefabricados

[54] https://www.elematic.com/es/concreto-prefabricado/

[55]https://www.construmatica.com/construpedia/Ventajas_y_Desventajas_de_la_Construcci%C3%B3n_Prefabricada

[56] https://www.arqhys.com/construccion/produccion-concreto.html

[57] http://www.grupoee.com/prefabricados-concreto-hormigon-prima-p50/

[58] http://www.grupoee.com/prefabricados-de-concreto-y-hormigon-syncro/

[59] http://www.grupoee.com/prefabricados-de-concreto-hormigon-megablock/

[60] http://www.grupoee.com/esplitadoras-bloques-concreto-hormigon/

[61] https://www.quiminet.com/articulos/que-son-los-materiales-compuestos-15015.htm

[62] https://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos

[63] https://es.wikipedia.org/wiki/Fabricaci%C3%B3n_de_materiales_compuestos

[64] Norma en Calidad de los Materiales: N-CMT-2-02-001-02

[65] https://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/hidratacion-del-cemento.html

[66] https://conceptodefinicion.de/yeso/

[67] https://www.rocasyminerales.net/yeso/

[68] https://www.mndelgolfo.com/tip/tipos-de-yeso-para-construccion/

[69] https://www.ecured.cu/Cal

[70] https://mycal.com.pe/los-usos-y-aplicaciones-mas-comunes-de-la-cal/

[71] https://www.breinco.com/breincosmartblog/reglas-basicas-colocacion-de-adoquines/

[72] https://bandageek.com/2014/06/como-funciona-la-kola-loka/