Nombre del Estudiante: Julio Cesar Piña Sánchez

ID del Estudiante: UM84223EL93441

***Polímeros Especiales para Tecnologías Espaciales***

**MASTER IN ELECTRICAL ENGINEERING**

**MAJOR IN AERSPACE SCIENCE**

**Atlanta, Georgia**

**Agosto 2024**

**Índice**

[Introducción 3](#_Toc174788372)

[1. ¡Qué son los Polímeros? 5](#_Toc174788373)

[1.1. Propiedades del Polímero. 7](#_Toc174788374)

[1.1.1. Propiedades Mecánicas 7](#_Toc174788375)

[1.1.2. Propiedades Químicas 8](#_Toc174788376)

[1.1.3. Propiedades Ópticas 8](#_Toc174788377)

[1.1.4. Propiedades Eléctricas 8](#_Toc174788378)

[1.1.5. Propiedades de los Polímeros para Aplicaciones Aeroespaciales 9](#_Toc174788379)

[1.2. Tipos de Polymeros 10](#_Toc174788380)

[1.2.1. Elastómeros 10](#_Toc174788381)

[1.2.2. Termoplásticos 11](#_Toc174788382)

[1.2.3. Termoestables 11](#_Toc174788383)

[1.2.4. Otras Clasificaciones: 11](#_Toc174788384)

[1.2.5. Tipos de Polímeros Especiales para Tecnologías Aeroespaciales 12](#_Toc174788385)

[1.3. Procesamiento de Polímeros 13](#_Toc174788386)

[1.3.1. Prácticas actuales de Procesamiento de Polímeros 13](#_Toc174788387)

[1.3.2. Operaciones de procesamiento de polímeros (''Acabado'') posteriores al reactor 15](#_Toc174788388)

[1.3.3. Operaciones de Composición de Polímeros 17](#_Toc174788389)

[1.3.4. Operaciones de Procesamiento de Polímeros Reactivos 18](#_Toc174788390)

[1.3.5. Operaciones de Mezcla de Polímeros (Composición) 19](#_Toc174788391)

[1.3.6. Operaciones de Fabricación de Productos de Plástico 21](#_Toc174788392)

[1.3.7. Operaciones de Procesamiento de Polímeros en Línea 22](#_Toc174788393)

[1.3.8. Procesamiento de Polímeros Especiales para Tecnologías Aeroespaciales 24](#_Toc174788394)

[1.4. Aplicaciones de los Polímeros 25](#_Toc174788395)

[1.4.1. Aplicaciones de los Polímeros en la Ingeniería Aeroespacial 27](#_Toc174788396)

[1.5. Diferencias entre los polímeros terrestres y espaciales 30](#_Toc174788397)

[1.6. Proveedores de Polímeros utilizados en las Tecnologías Aeroespaciales 31](#_Toc174788398)

[Conclusiones 38](#_Toc174788399)

[Referencias Bibliográficas 40](#_Toc174788400)

# Introducción

En el campo de la innovación aeronáutica, que avanza a gran velocidad, la demanda de materiales avanzados nunca ha sido tan apremiante. Una de las categorías de materiales más prometedoras son los polímeros extraordinarios, que ofrecen propiedades especiales que mejoran la ejecución, disminuyen el peso y aumentan la resistencia en distintas aplicaciones aeronáuticas.

Los materiales convencionales, como los metales y la cerámica, han prestado buenos servicios al sector. Sea como fuere, con la creciente acentuación de la eficiencia del combustible, la vida útil y la multifuncionalidad, los polímeros extraordinarios se están desarrollando como una práctica electiva o complemento. Estos polímeros avanzados pueden fabricarse para cumplir requisitos particulares, revolucionando así los planes y la eficiencia operativa en los sectores aeroespacial comercial y militar.

La industria aeronáutica puede ser una confirmación de la inventiva humana, que amplía los límites del diseño y la ciencia de los materiales para crear maravillas que se oponen a la gravedad. En este avance es fundamental el papel que desempeñan los polímeros de forte. Estos materiales poco comunes, construidos con estructuras atómicas exactas y propiedades poco comunes, han acabado siendo cruciales en la creación de la siguiente era de componentes para aviones, transbordadores y aviación.

Caracterizados por su especial combinación de calidad, solidez, ligereza y resistencia a condiciones extraordinarias, los polímeros de reclamo han revolucionado el plan de la aviación. Nada que ver con los materiales convencionales, estos polímeros ofrecen una solución a medida para las rígidas necesidades de la industria, permitiendo la creación de naves aéreas que no sólo son competentes, sino también más seguras y fiables.

Desde el enorme campo de los vuelos comerciales hasta el vanguardista ámbito de la investigación espacial, los polímeros de resistencia han encontrado aplicaciones en prácticamente todos los puntos de vista de la innovación aeronáutica. Su capacidad para resistir los rigores de las grandes elevaciones, las temperaturas fluctuantes y las situaciones destructivas los convierten en la opción preferida para componentes básicos como fuselajes, motores, aportes y estructuras electrónicas.

A medida que la industria aeronáutica avanza en su persistente interés por el desarrollo, los polímeros de resistencia se erigen como una base de avance. Su potencial para dar forma al largo plazo del vuelo es gigantesco, prometiendo proporcionar vehículos de aviación realmente más eficaces, económicos e innovadores.

Llevo 30 años trabajando en el sector y eso es lo que mejor se me da, además de ser un soñador con una mente siempre activa. Actualmente, voy a realizar un ensayo para cumplir un requisito de mis estudios de ingeniería eléctrica aeroespacial. Durante mi búsqueda de un lugar donde trabajar y hacer lo que me apasiona, encontré una empresa llamada Solvay, para la cual trabajo como contratista. Mi trabajo es de electricista de controles eléctricos industriales.

Esta empresa se dedica a fabricar los mejores polímeros especiales para su uso dentro y fuera del planeta. Entre sus clientes se encuentran la NASA, el ejército estadounidense y Tesla, por nombrar algunos, lo que demuestra el alto nivel de calidad que exigen sus productos. Mi trabajo consiste en dar soporte y reparar algunas de las máquinas que los científicos utilizan para producir estos materiales. Sin embargo, en este caso concreto, para realizar mi ensayo titulado «Polímeros especiales para tecnologías aeroespaciales», me centraré en los materiales producidos en Solvay. Intentaré dar un alcance comprensible y centrado, con el objetivo de realizar un buen ensayo. Nos centraremos en los materiales que mencionaré a continuación, explicando cada uno de ellos, sus aplicaciones y sus aportaciones al mundo.

# ¡Qué son los Polímeros?

Los polímeros están por todas partes. Basta con mirar a nuestro alrededor. Tu botella de agua de plástico. Las puntas de goma de silicona de los auriculares de tu teléfono. El nylon y el poliéster de tu chaqueta o tus zapatillas. La goma de los neumáticos del coche familiar. Ahora mírate al espejo. Muchas proteínas de tu cuerpo también son polímeros. Piensa en la queratina, el material del que están hechos tu pelo y tus uñas. Incluso el ADN de tus células es un polímero. (Perkins, 2022)

Por definición, los polímeros son moléculas de gran tamaño formadas por la unión (enlace químico) de una serie de bloques de construcción. La palabra polímero viene del griego y significa “muchas partes”. Cada una de esas partes es lo que los científicos llaman un monómero (que en griego significa “una parte”). Piense en un polímero como en una cadena en la que cada eslabón es un monómero. Esos monómeros pueden ser simples -sólo un átomo o dos o tres- o pueden ser complicadas estructuras en forma de anillo que contienen una docena o más de átomos. (Perkins, 2022)

En un polímero artificial, cada uno de los eslabones de la cadena suele ser idéntico a sus vecinos. Pero en las proteínas, el ADN y otros polímeros naturales, los eslabones de la cadena a menudo difieren de sus vecinos. En algunos casos, los polímeros forman redes ramificadas en lugar de cadenas simples. Independientemente de su forma, las moléculas son muy grandes. De hecho, son tan grandes que los científicos las clasifican como macromoléculas.

Las cadenas poliméricas pueden incluir cientos de miles de átomos, incluso millones. Cuanto más larga sea una cadena polimérica, más pesada será. Y, en general, los polímeros más largos darán a los materiales fabricados con ellos una mayor temperatura de fusión y ebullición. Además, cuanto más larga sea la cadena de un polímero, mayor será su viscosidad (o resistencia a fluir como un líquido). La razón: Tienen una mayor superficie, lo que hace que quieran adherirse a las moléculas vecinas. (Perkins, 2022)



**Figura 1**. El ADN, almacén de información genética de la vida, es una larga molécula formada por una serie de unidades químicas más pequeñas que se repiten. Como tal, es un polímero natural.

La lana, el algodón y la seda son materiales naturales a base de polímeros que se han utilizado desde la antigüedad. La celulosa, principal componente de la madera y el papel, también es un polímero natural. Otros son las moléculas de almidón que producen las plantas. [Un dato interesante: tanto la celulosa como el almidón están hechos del mismo monómero, el azúcar glucosa. Sin embargo, tienen propiedades muy diferentes. El almidón se disuelve en agua y puede digerirse. Pero la celulosa no se disuelve y no puede ser digerida por el ser humano. La única diferencia entre estos dos polímeros es cómo se han unido los monómeros de glucosa]. (Perkins, 2022)

Los seres vivos construyen proteínas -un tipo particular de polímero- a partir de unos monómeros llamados aminoácidos. Aunque los científicos han descubierto unos 500 aminoácidos diferentes, los animales y las plantas sólo utilizan 20 de ellos para construir sus proteínas. En el laboratorio, los químicos tienen muchas opciones para diseñar y construir polímeros. Pueden construir polímeros artificiales a partir de ingredientes naturales. O pueden utilizar aminoácidos para construir proteínas artificiales distintas de las fabricadas por la madre naturaleza. Lo más habitual es que los químicos creen polímeros a partir de compuestos fabricados en el laboratorio. (Perkins, 2022)

## Propiedades del Polímero.

Los polímeros presentan una amplia gama de propiedades que son cruciales para sus aplicaciones en diversos campos. Estas propiedades pueden clasificarse en características mecánicas, químicas, ópticas y eléctricas, cada una de ellas influida por la estructura molecular del polímero.

### **Propiedades Mecánicas**

* **Resistencia a la Fuerza**: Mide la fuerza de elongación que puede soportar un polímero antes de fallar. Generalmente, la resistencia a la tracción aumenta con cadenas de polímero más largas y mayor entrecruzamiento entre cadenas. (Wikipedia contributors, 2024)(Libretexts, 2020)
* **Módulo de Young**: Cuantifica la elasticidad de un polímero, definida como la relación entre la tensión y la deformación en la región elástica. Depende de la temperatura y es crítico para aplicaciones que requieren respuestas elásticas específicas. (Wikipedia contributors, 2024)
* **Viscoelasticidad**: Los polímeros presentan un comportamiento elástico dependiente del tiempo, que puede analizarse mediante análisis mecánico dinámico (AMD). Esta propiedad es esencial en aplicaciones en las que los polímeros se someten a cargas variables a lo largo del tiempo. (Wikipedia contributors, 2024)
* **Cristalinidad**: Los polímeros pueden ser cristalinos o amorfos. Los polímeros cristalinos tienden a ser más duros y resistentes a los impactos, mientras que los polímeros amorfos son generalmente más flexibles y pueden ser transparentes. (Prajapati et al., 2021)(Libretexts, 2020).

### **Propiedades Químicas**

* **Fuerzas Intermoleculares**: La fuerza de las interacciones entre cadenas de polímeros, como los enlaces de hidrógeno y las interacciones dipolo-dipolo, afecta significativamente a propiedades como la resistencia a la tracción y el punto de fusión. Por ejemplo, los polímeros con fuertes enlaces de hidrógeno (como los que contienen enlaces de uretano) tienen mayores puntos de fusión y resistencia a la tracción que los que tienen fuerzas de Van der Waals más débiles. (Wikipedia contributors, 2024)(Prajapati et al., 2021).
* **Solubilidad**: Los polímeros varían en su solubilidad en distintos disolventes, lo que afecta a sus aplicaciones. Muchos polímeros sintéticos son hidrófobos, mientras que los naturales pueden ser hidrófilos, lo que influye en su comportamiento en entornos con humedad. (Xometry, 2023)

### **Propiedades Ópticas**

Los polímeros pueden ser opacos o transparentes en función de su estructura. Los polímeros cristalinos suelen ser opacos, mientras que los amorfos pueden ser transparentes, dependiendo de su grado de cristalinidad y de métodos de procesado como el estiramiento biaxial. (Xometry, 2023) (Prajapati et al., 2021)

### **Propiedades Eléctricas**

La mayoría de los polímeros son excelentes aislantes y tienen altos voltajes de ruptura, lo que los hace adecuados para aplicaciones eléctricas. Sin embargo, algunos polímeros presentan propiedades conductoras únicas que pueden aprovecharse en aplicaciones electrónicas avanzadas. (Xometry, 2023).

### **Propiedades de los Polímeros para Aplicaciones Aeroespaciales**

Los polímeros desempeñan un papel crucial en las aplicaciones aeroespaciales debido a sus propiedades únicas que mejoran el rendimiento, reducen el peso y mejoran la eficiencia. Estas son las propiedades clave que hacen que los polímeros sean adecuados para esta industria:

* **Ligereza y Alta Resistencia:** Los polímeros, en particular los compuestos poliméricos reforzados con fibras (FRPC), son conocidos por su alta resistencia específica, lo que significa que proporcionan una excelente relación resistencia-peso. Esta característica es vital en aplicaciones aeroespaciales, donde la reducción del peso puede mejorar la eficiencia del combustible y el rendimiento general ((PDF) the Role of Advanced Polymer Materials in Aerospace, 2013) (Dyer & Kumru, 2023) (Rhiannon & Davis, 2023).
* **Estabilidad Térmica:** Ciertos polímeros, como los ésteres de cianato y los compuestos termoplásticos, presentan una elevada estabilidad térmica, lo que los hace adecuados para aplicaciones a altas temperaturas. Esta propiedad es esencial para componentes expuestos a condiciones operativas extremas, como piezas de motores y componentes estructurales (Dyer & Kumru, 2023) (Hechtel, 2021).
* **Resistencia Química:** Los polímeros demuestran una buena resistencia a los combustibles, lubricantes y diversos productos químicos, lo que es fundamental para las aplicaciones aeroespaciales en las que los materiales están expuestos con frecuencia a entornos difíciles. Esta resistencia ayuda a mantener la integridad y longevidad de los componentes de las aeronaves (Hechtel, 2021) (Rhiannon & Davis, 2023).
* **Electrical Insulation:** Muchos polímeros poseen excelentes propiedades de aislamiento eléctrico, necesarias para los sistemas eléctricos aeroespaciales. Materiales como los fluoropolímeros y los termoplásticos de alto rendimiento se utilizan para el aislamiento en aplicaciones de alta tensión, garantizando la seguridad y la fiabilidad (Hechtel, 2021) (Wright, 1991).
* **Flexibilidad de Moldeo y Fabricación:** Los polímeros pueden moldearse fácilmente en formas complejas, lo que permite diseños innovadores que pueden mejorar la aerodinámica y la funcionalidad. Esta facilidad de procesamiento los hace ideales para la producción en masa en la industria aeroespacial. (Wright, 1991)(Rhiannon & Davis, 2023)
* **Ductility and Fatigue Resistance:** Los compuestos termoplásticos ofrecen ductilidad y resistencia a la fatiga, que son importantes para los componentes sometidos a tensiones y esfuerzos repetidos durante las operaciones de vuelo. Esta propiedad ayuda a prevenir fallos y prolonga la vida útil de las piezas de las aeronaves. (Hechtel, 2021)(Wright, 1991)
* **Baja Densidad:** La baja densidad de los polímeros contribuye a reducir el peso de las estructuras aeroespaciales, lo que constituye un factor crítico para mejorar la eficiencia y el rendimiento del combustible. Esta propiedad permite diseñar aviones más ligeros sin comprometer la resistencia. (Wright, 1991)(Rhiannon & Davis, 2023)

## Tipos de Polymeros

Existen varias formas de clasificar los polímeros, pero los tipos más comunes son:

### **Elastómeros**

Los elastómeros son gomas o materiales elásticos similares al caucho. Tienen fuerzas intermoleculares bajas entre las cadenas, lo que permite que éstas se muevan entre sí con facilidad. Esto confiere a los elastómeros su elasticidad característica y su capacidad para recuperar su forma original tras la deformación. Algunos ejemplos son el caucho natural y el caucho de silicona (Libretexts, 2021).

### **Termoplásticos**

Los termoplásticos son duros a temperatura ambiente, pero se vuelven blandos y fluidos cuando se calientan. Esto permite moldearlos y darles forma con facilidad. Cuando se enfrían, conservan su nueva forma. Los termoplásticos no sufren cambios químicos en el proceso de calentamiento y enfriamiento. Algunos ejemplos son el polietileno, el polipropileno, el poliestireno y el cloruro de polivinilo (PVC). (Admin, 2023)(Libretexts, 2021).

### **Termoestables**

Los termoestables pueden moldearse a temperatura ambiente o superior, pero cuando se calientan fuertemente sufren un cambio químico irreversible y se vuelven duros e infusibles. No pueden volver a fundirse ni moldearse después de este proceso de curado. Algunos ejemplos son las resinas epoxídicas, las resinas de poliéster y el caucho vulcanizado (Libretexts, 2021).

### **Otras Clasificaciones:**

* Los polímeros lineales tienen cadenas largas y rectas sin ramificaciones. (Admin, 2023)
* Los polímeros ramificados tienen cadenas laterales que se ramifican de la cadena principal (Admin, 2023)



**Figura 2**. Caucho natural. Látex extraído del árbol del caucho (Hevea brasiliensis) en Malasia.

* Los polímeros reticulados tienen cadenas conectadas por enlaces covalentes entre sí, formando una red (Admin, 2023)(Libretexts, 2021).
* Los polímeros naturales se encuentran en la naturaleza, como las proteínas, la celulel caucho (Admin, 2023)(Wikipedia contributors, 2024) (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2024).
* Los polímeros sintéticos son productos fabricados por el hombre, como el nylon, el polietileno y el poliéster.

Las propiedades de un polímero dependen de factores como la rigidez de las moléculas, las fuerzas intermoleculares, la tendencia a formar regiones cristalinas y el grado de reticulación.

### **Tipos de Polímeros Especiales para Tecnologías Aeroespaciales**

Existen varios tipos de polímeros especiales utilizados en las tecnologías aeroespaciales:

* Las Poliarletercetonas (PAEK) como AvaSpire y KetaSpire PEEK se utilizan en aplicaciones aeroespaciales, con grados aprobados por Boeing que cumplen las especificaciones BMS (Syensqo, n.d.).
* Los Fluoropolímeros como ECTFE (Halar), FKM y FFKM Fluoroelastómeros (Tecnoflon) se utilizan por su resistencia química, estabilidad térmica y propiedades de sellado (Syensqo, n.d.).
* Las Poliamida-imidas (PAI) como el Torlon son polímeros de ingeniería de alto rendimiento utilizados en el sector aeroespacial (Syensqo, n.d.).
* El Sulfuro de Polifenileno (PPS), como el Ryton, es un termoplástico semicristalino utilizado en compuestos aeroespaciales (Syensqo, n.d.).
* Los compuestos poliméricos reforzados con fibra (FRPC) fabricados con resinas termoestables como la epoxi se utilizan ampliamente en estructuras aeronáuticas por sus propiedades de ligereza y alta resistencia (Dyer & Kumru, 2023)((PDF) the Role of Advanced Polymer Materials in Aerospace, 2013). Sin embargo, el impacto medioambiental de los FRPC es un problema acuciante que la química puede ayudar a resolver mediante un procesamiento y un reciclaje sostenibles (Dyer & Kumru, 2023).

##  Procesamiento de Polímeros

El procesamiento de polímeros se define como la “actividad de ingeniería relacionada con las operaciones realizadas en materiales o sistemas poliméricos para aumentar su utilidad”. Principalmente, se ocupa de la conversión de materias primas poliméricas en productos acabados, lo que implica no sólo la conformación, sino también la composición y las reacciones químicas que conducen a modificaciones macromoleculares y a la estabilización de la morfología y, por tanto, a estructuras de “valor añadido”. (Tamor & Gogos, 2006).

### **Prácticas actuales de Procesamiento de Polímeros**

En la reseña histórica anterior se han descrito las máquinas más importantes disponibles para el procesamiento de polímeros al comienzo del explosivo período de desarrollo de los polímeros y la industria del plástico, que tuvo lugar después de la Segunda Guerra Mundial, cuando, como se ha señalado anteriormente, la ciencia y la tecnología empezaron a fusionarse catalíticamente. De este modo, se cerró el siglo de la tecnología del caucho y los plásticos de 1850-1950 de la Tabla 1, caracterizado por una praxis inventiva que dió lugar a máquinas y productos que crearon una nueva clase de materiales y una nueva industria. En el medio siglo siguiente, el procesamiento de polímeros ''clásico'', que se muestra de nuevo en la Tabla 1, introdujo y utilizó el análisis de ingeniería y la simulación de procesos, así como la innovación, y creó muchas mejoras y nuevos desarrollos que han dado lugar al diverso arsenal actual de sofisticadas máquinas de procesamiento de polímeros y métodos de procesamiento de polímeros y sistemas de polímeros de complejidad y variedad cada vez mayores.



**Tabla 1**. Evolución histórica del procesamiento de polímeros.

Una instantánea de la situación actual de la industria del plástico en Estados Unidos, desde los puntos de vista económico y manufacturero, según los datos de la Sociedad de Industrias del Plástico (SPI) correspondientes al año 2000, muestra que ocupa el cuarto lugar entre las industrias manufactureras, después de los vehículos y equipos de motor, los componentes y accesorios electrónicos y el refinado de petróleo, en términos de envíos. En concreto:

1. El valor de los productos a base de polímeros producidos en Estados Unidos por los fabricantes de polímeros (resinas) fue de 90.000 millones de dólares. Esta industria se caracteriza por un número relativamente pequeño de empresas muy grandes, que son empresas químicas, para las que la producción de polímeros es una actividad muy considerable (por ejemplo, La Dow Chemical Company), o empresas petroquímicas, para las que, a pesar del inmenso volumen de polímeros producidos, la producción de polímeros es una actividad relativamente menor y forma parte de operaciones integradas verticalmente (por ejemplo, la Corporación ExxonMobil).

2. El valor de los productos plásticos acabados enviados por los transformadores de polímeros estadounidenses fue de 330.000 millones de dólares. Las empresas de procesamiento de polímeros son numerosas y de tamaño pequeño o mediano. Están especializadas, disponen de modestos recursos financieros y de investigación, pero en general son innovadoras, competitivas, emprendedoras y están en constante movimiento, lo que es característico del primer periodo de desarrollo de la industria del caucho y los plásticos.

3. La mano de obra estadounidense empleada por los productores de resina es de un cuarto de millón, y por los transformadores de polímeros es de un millón y medio.

A continuación se presenta, en forma de diagrama de flujo, la experiencia termomecánica de los sistemas de polímeros en los equipos de procesado utilizados para importantes actividades de fabricación de procesado de polímeros. El objetivo no es sólo informar, sino también ilustrar el carácter común inherente de las experiencias termomecánicas de los sistemas de polímeros entre los diversos tipos de equipos y operaciones utilizados, lo que ayudará a unificar y estructurar la comprensión y el análisis de los equipos y operaciones de procesamiento de polímeros.

### **Operaciones de procesamiento de polímeros (''Acabado'') posteriores al reactor**

Como se muestra en forma de diagrama de flujo en la Figura 3, el producto de un reactor de polimerización en fase gaseosa producido en una planta típica de un fabricante de polímeros (resinas) a velocidades de hasta 40 t/h, se expone a etapas de separación y secado para obtener polímero puro en forma de partículas (polvo). A continuación, se mezcla en seco con un paquete patentado de aditivos de muy baja concentración: estabilizadores térmicos, ultravioletas (UV) y oxidantes, así como coadyuvantes tecnológicos. El flujo de polvo mezclado en seco se dosifica en Co-TSEs muy grandes (mega) o fundidores/mezcladores continuos (CM), donde los procesos de manipulación de sólidos en partículas (PSH), fusión, mezcla/homogeneización, y transporte y presurización de la masa fundida deben realizarse muy rápidamente, debido a los elevados requisitos de producción.



**Figura 3**. Operaciones de Procesamiento de Polímeros (''Acabado'') posteriores al Reactor.

Esta es la primera experiencia termomecánica del polímero reactor, y no será la última. La elección del equipo Co-TSE o CM se hace sobre la base de la capacidad única de estos dispositivos para provocar una fusión muy rápida y una mezcla laminar. Nos referimos a los cuatro procesos que acabamos de comentar como los pasos elementales del procesamiento de polímeros. La corriente de polímero fundido que sale del Co-TSE o del CM, ambos con escasa capacidad de bombeo de polímero fundido, se introduce en bombas de engranajes (GP) muy grandes, que son dispositivos de bombeo/transporte de polímero fundido precisos y de desplazamiento positivo.

La masa fundida se bombea a una granuladora sumergida con una matriz de múltiples orificios, donde los filamentos que salen se cortan en pequeños pellets y se enfrían con la corriente de agua fría, que los lleva a un separador de agua-polímero. A continuación, los gránulos húmedos se secan y se transportan a silos; son los gránulos de plástico ''vírgenes'' que los fabricantes de polímeros venden a las empresas transformadoras, transportados en vagones de ferrocarril en contenedores gaylord de 1000 libras o en bolsas de 50 libras.

### **Operaciones de Composición de Polímeros**

En la figura 4 se muestra esquemáticamente la línea de composición de polímeros. Los gránulos vírgenes de los fabricantes de resinas se mezclan con pigmentos (para formar concentrados de color), cargas o agentes de refuerzo a concentraciones de moderadas a altas. El objetivo de estas operaciones es mejorar las propiedades del polímero base virgen o dotarlo de propiedades especializadas, añadiendo valor en todos los casos. Los ritmos de producción oscilan entre 1.000 y 10.000 lb/h

La tarea crítica del equipo de procesado es realizar una mezcla laminar distributiva y dispersiva de los aditivos al nivel requerido para obtener los requisitos de propiedades del producto acabado. Además, otros aditivos, como las fibras de vidrio troceadas, suelen introducirse después de que el equipo de composición haya fundido los gránulos, con el fin de minimizar la degradación de los atributos de los aditivos, como la longitud de las fibras. Por último, para facilitar el proceso de mezcla laminar, los aditivos pueden tratarse en superficie.

Los equipos de procesamiento utilizados por los fabricantes de compuestos de polímeros son principalmente TSE corrotantes y contrarrotantes, con extrusoras monohusillo (SSE) ocasionales en líneas de compuestos menos exigentes. Como se indica en la Figura 4, los mismos pasos elementales del procesado de polímeros descritos anteriormente en el procesado postreactor son realizados por los equipos de composición.



**Figura 4**. Operaciones de Composición de Polímeros.

El flujo compuesto suele introducirse en una matriz de filamentos con múltiples orificios y los filamentos se enfrían primero con agua y luego se cortan para formar gránulos. La operación de compounding expone el polímero del reactor a su segunda experiencia de procesado termomecánico. El producto compuesto se envía a los fabricantes de productos plásticos acabados, comúnmente conocidos como “transformadores”.

### **Operaciones de Procesamiento de Polímeros Reactivos**

El procesamiento de polímeros reactivos modifica o funcionaliza la estructura macromolecular de los polímeros del reactor mediante reacciones químicas que tienen lugar en el equipo de procesamiento de polímeros una vez que el polímero se ha fundido. El equipo de procesamiento adquiere entonces un atributo adicional, el de «reactor», lo cual es natural ya que dicho equipo es el único capaz de fundir y mezclar de forma rápida y eficaz los reactivos en los polímeros fundidos muy viscosos. La operación se muestra esquemáticamente en la figura 5.



**Figura 5**. Operaciones de Procesamiento de Polímeros Reactivos.

La corriente de alimentación puede ser polímero del reactor en forma de polvo, que luego se modifica químicamente (por ejemplo, reducción del peso molecular del polipropileno con peróxido, lo que se conoce como viscraqueo). Los fabricantes de resinas suelen llevar a cabo este tipo de procesamiento reactivo a altas velocidades, e incluye, tras la modificación química y la eliminación de volátiles, la incorporación del paquete de aditivos patentado. Alternativamente, el flujo de alimentación de polímeros se compone muy a menudo de gránulos vírgenes, que se someten a una modificación reactiva como la funcionalización (por ejemplo, la creación de grupos polares en macromoléculas de poliolefina mediante anhídrido maleico).

Como se ve en la Figura 5, también en este caso el equipo de procesamiento del reactor utilizado afecta a los mismos pasos elementales del procesamiento de polímeros que se han dado anteriormente, pero ahora se ha añadido un proceso de desvolatilización para eliminar pequeñas moléculas de subproductos de la reacción. Debido a la necesidad de una fusión rápida y uniforme y de una mezcla distributiva eficaz (para evitar que aumente la temperatura del polímero fundido), se utilizan TSE de coprotación y contrarrotación, así como CM, todos los cuales pueden cumplir los requisitos de procesamiento reactivo para estos pasos elementales. El procesado reactivo, por tanto, puede ser la primera o la segunda experiencia termomecánica de los polímeros de reactor.

A continuación, la corriente modificada reactivamente se transforma en pellets, ya sea mediante granuladoras sumergidas o de filamentos. Los gránulos se secan de nuevo y se envían a los fabricantes de productos plásticos, que necesitan esas estructuras macromoleculares especialmente modificadas para cumplir los requisitos de propiedades del producto.

### **Operaciones de Mezcla de Polímeros (Composición)**

Estas operaciones de procesamiento de polímeros (compounding) se emplean con el fin de crear mezclas y aleaciones de polímeros procesados por fusión. Tras el descubrimiento de los principales polímeros básicos y de ingeniería durante las décadas segunda a sexta del siglo XX, y a medida que el coste de introducir un nuevo polímero en el mercado comenzó a aumentar drásticamente, tanto la industria de los polímeros como el mundo académico se centraron en el desarrollo de mezclas de polímeros con propiedades novedosas y valiosas, con el fin de ampliar el espectro de polímeros disponibles y satisfacer los requisitos de propiedades de los productos plásticos finales de forma rentable.



**Figura 6**. Cronología del descubrimiento de los polímeros y su modificación.

Así, como muestra la figura 6, desde 1960 aproximadamente, el aumento del número de mezclas de polímeros comercialmente valiosas ha impulsado poderosamente el crecimiento de la industria del plástico y ha conducido directamente a la rápida introducción de los plásticos en áreas de aplicación de productos nuevos y críticos. En cuanto a las operaciones de mezcla de polímeros que se muestran en la figura 7, el flujo de alimentación consta de dos o más polímeros (granulados vírgenes o modificados reactivamente) y un compatibilizador en pequeñas concentraciones, que es necesario para crear morfologías de mezcla de polímeros finas y estables, ya que los polímeros suelen ser incompatibles entre sí.

El equipo de procesamiento debe fundir rápidamente cada polímero (de forma simultánea o secuencial) y, a continuación, realizar de forma rápida y eficaz la mezcla distributiva y dispersiva de los componentes fundidos y el compatibilizador. Las EET corrotantes y contrarrotantes pueden satisfacer estos pasos elementales que son importantes para las operaciones de mezcla.



**Figura 7**. Operaciones de Formación de Mezclas de Polímeros.

Si el compatibilizador es reactivo, la fusión y la mezcla rápidas y eficaces establecerán las condiciones adecuadas para que se produzca una reacción uniforme en fase fundida. De este modo, al emplear las EET, los procesadores de polímeros pueden crear sistemas de polímeros «microestructurados» personalizados, que hemos denominado «gránulos de diseño», para satisfacer mejor las necesidades especiales de propiedades de los productos de sus clientes; ya no dependen únicamente de los fabricantes de resinas de polímeros.

Los índices de producción y, por tanto, el tamaño de los equipos, son grandes para los fabricantes de resinas y moderados para los de compuestos. Volvemos a ver que el flujo de mezcla de polímeros está expuesto a los mismos pasos elementales de procesamiento y que, de nuevo, la elección del equipo de procesamiento utilizado se basa en qué equipo puede realizar mejor los pasos elementales críticos. Por último, las operaciones de mezcla de polímeros exponen a los polímeros a su segunda o quizás tercera experiencia termomecánica.

### **Operaciones de Fabricación de Productos de Plástico**

En estas operaciones, los transformadores de polímeros fabrican productos plásticos acabados a partir de gránulos de plástico, que son los productos de operaciones de transformación de polímeros postreactor, compuestos, reactivos o mezclas. Estos gránulos se procesan solos o, en el caso de la fabricación de productos coloreados, junto con un flujo menor de concentrados de color del mismo polímero. Como puede verse en la Figura 8, los pasos elementales del equipo de procesado utilizado son de nuevo los mismos que los indicados anteriormente.

En las operaciones de fabricación de productos, sin embargo, es de suma importancia que la capacidad de presurización del equipo sea muy fuerte, ya que necesitamos una bomba de masa fundida para dar forma a un producto de plástico forzando la masa fundida a través de una matriz o en un molde. Así pues, los equipos utilizados por los fabricantes de productos son las SSE y las máquinas de moldeo por inyección, que tienen una capacidad modesta de manipulación de partículas sólidas, fusión y mezcla, pero son excelentes bombas de fusión.



**Figure 8**. Operaciones de Fabricación de Productos Plásticos.

La corriente fundida de polímeros que fluye a través de matrices o hacia moldes fríos se enfría rápidamente para dar forma al producto sólido. Como consecuencia del enfriamiento rápido, se retienen algunas orientaciones macromoleculares impartidas durante el flujo y cerca de las superficies del producto, donde se produce el primer enfriamiento. Las orientaciones retenidas en los productos plásticos confieren propiedades anisótropas específicas al producto y, en el caso de los polímeros cristalizables, morfologías especiales que afectan a las propiedades.

La capacidad de afectar a lo anterior se denomina estructuración, que puede diseñarse para conferir propiedades extraordinariamente diferentes y beneficiosas a los productos plásticos. La estructuración también se lleva a cabo en operaciones posteriores a la conformación, principalmente mediante el estiramiento uni o biaxial del producto sólido conformado a temperaturas adecuadas para maximizar las orientaciones retenidas sin afectar a la integridad mecánica del producto.

### **Operaciones de Procesamiento de Polímeros en Línea**

Las operaciones de fabricación del producto polimérico pueden ser la segunda o la tercera experiencia termomecánica del polímero base. Dado que los polímeros están sujetos a degradación térmica y que cada uno de los ciclos de fusión/enfriamiento tiene un coste asociado, actualmente se están realizando importantes esfuerzos para desarrollar lo que en la industria del procesamiento de polímeros se denominan operaciones de procesamiento en línea.

Estas operaciones y equipos realizan secuencialmente y controlan funcionalmente cualquiera de las operaciones comentadas anteriormente, con la fabricación del producto plástico al final, permitiendo así un menor grado de degradación macromolecular y de las propiedades de los aditivos, y reduciendo el coste de fabricación del procesado. La práctica es relativamente nueva y ha requerido el acoplamiento funcional y el control de piezas de equipos de procesamiento que tienen puntos fuertes elementales claramente diferentes: fusión y mezcla rápidas, uniformes y eficientes frente a presurización robusta y ''dosificación'' precisa del flujo de producto. Las operaciones de procesamiento de polímeros en línea se muestran esquemáticamente en la Figura 9.

Desde el punto de vista de la industria del plástico, la combinación de las distintas operaciones de composición, tratamiento reactivo y mezcla con la operación de fabricación del producto acabado, en una única línea y bajo un mismo techo, ofrece la posibilidad de que el fabricante del producto se convierta también en compositor. Además, como los fabricantes están íntimamente relacionados con las propiedades que necesita el producto acabado, podrían «afinar» la microestructuración de su sistema polimérico para satisfacer mejor las necesidades de propiedades de los productos que fabrican. Estas capacidades permitirán a los transformadores responder a las peticiones de sistemas de polímeros personalizados, es decir, satisfacer las necesidades de ''personalización masiva'' de los usuarios de productos plásticos.



**Figura 9**. Operaciones de Fabricación de Productos Plásticos.

Además, hay pruebas claras de que un pequeño número de fabricantes de resinas «se convertirán más en facilitadores, creando nuevos negocios de valor añadido (de productos de polímeros microestructurados) cada vez más cerca del consumidor final». Esto se traduce en la planificación por parte de estas empresas de una expansión comercial hacia operaciones de composición, ampliando el espectro de sus productos y contribuyendo aún más a las necesidades de personalización masiva. Estos desarrollos y tendencias caracterizan la actual fase de ''transición'' de la industria de polímeros y del procesamiento de polímeros, tal y como se muestra en la Tabla 1. Se espera que este periodo marque la puerta de entrada a un futuro en el que el procesamiento de polímeros evolucionará hacia la ingeniería macromolecular.

### **Procesamiento de Polímeros Especiales para Tecnologías Aeroespaciales**

El procesamiento de polímeros especiales desempeña un papel crucial en la industria aeroespacial, donde la fabricación de componentes y productos debe cumplir los más altos niveles de seguridad, calidad y fiabilidad. A continuación se presentan algunas ideas clave sobre el uso de polímeros especiales en las tecnologías aeroespaciales:

* **Productos de Polímeros de Alto Rendimiento para el Sector Aeroespacial:** El sector aeroespacial confía en los productos de polímeros de alto rendimiento para diversas aplicaciones, como juntas, productos antidesgaste y componentes funcionales. Estos productos están diseñados para satisfacer la naturaleza crítica de las aplicaciones aeroespaciales y de defensa, garantizando soluciones excepcionales para aeronaves eficientes (CDI Products, n.d).
* **Polímeros de Alto rendimiento y Normas de la Industria Aeroespacial:** Empresas como Allegheny Performance Plastics llevan más de 35 años fabricando piezas de polímeros de alto rendimiento y alta temperatura para la industria aeroespacial. Se adhieren a normas del sector como AS9100 Rev D y el Reglamento sobre Tráfico Internacional de Armas (ITAR) para cumplir los requisitos de calidad establecidos por la industria aeroespacial (Stubna, 2019).
* **Polímeros Especiales para Aligeramiento y Eficiencia de Combustible:** Los polímeros, oligómeros y monómeros especializados se utilizan en compuestos avanzados para contribuir al aligeramiento, reducir los costes de consumo de combustible y hacer que las aeronaves sean más eficientes energéticamente. Estos materiales son cruciales para transformar la industria de la aviación comercial y cuentan con la aprobación de gigantes aeroespaciales como Boeing (Syensqo, n.d.).
* **Procesamiento de Polímeros a Medida para el Sector Aeroespacial:** Empresas como R&P Pte Ltd están especializadas en el procesamiento de polímeros a medida y la composición, y ofrecen soluciones para mejorar el rendimiento de los materiales en diversos sectores, incluido el aeroespacial. Su experiencia abarca una amplia gama de aplicaciones de polímeros, incluidas las tecnologías aeroespaciales (ENGRO, n.d).

## Aplicaciones de los Polímeros

Según Xometry (2023) las aplicaciones de los polímeros son:

* **Ropa:** Los polímeros son ampliamente utilizados en la fabricación de fibras sintéticas para textiles, para diversos usos. Ejemplos de polímeros utilizados en ropa son: nylon, aramida, poliéster (PET) y PVA.
* **Dinero**: Varios países han abandonado el papel moneda y ahora fabrican dinero a partir de películas de polímeros, generalmente polipropileno. Se trata de una tendencia creciente, ya que permite que el dinero dure más, se mantenga más limpio y no esté implicado en contaminaciones e intoxicaciones.
* **Equipos de Protección Individual**: Las batas, los cubrezapatos y los monos desechables suelen ser de polipropileno no tejido. Los guantes desechables se fabrican con látex o caucho nitrílico. Las mascarillas con filtro se fabrican con una amplia gama de fibras poliméricas y telas poliméricas no tejidas. Los protectores faciales se fabrican generalmente con polímeros variados, siendo la parte transparente de PET.
* **Aplicaciones Médicas**: Las aplicaciones médicas de los polímeros son muy variadas. Algunos ejemplos son: polímeros naturales para sistemas de administración de fármacos, polímeros sintéticos bioinertes para stents y dispositivos de un solo uso para la extracción/diagnóstico de sangre.
* **Artículos para el Hogar**: En los hogares típicos del mundo desarrollado se utilizan polímeros de varios tipos. Algunos ejemplos son: recipientes de polietileno para alimentos, mangos de cuchillos de ABS, películas para cubrir alimentos y juntas resistentes al calor para puertas de hornos.
* **Piezas de Automóvil**: El sector del automóvil utiliza polímeros en la mayoría de los ámbitos. Algunos ejemplos son: depósitos de freno, vejigas de suspensión, tiradores de puertas y parachoques.
* **Pinturas**: Muchas pinturas se basan en polímeros. Los acrílicos son muy utilizados, al igual que las resinas alquídicas y las resinas naturales y sintéticas de los barnices.

**Colas**: Las colas son uno de los primeros usos generalizados de los polímeros naturales. Se fabrican a partir de cascos (queratina), desechos de pescado (proteínas) y savia de árbol (brea). Los sustitutos sintéticos van del acetato de polivinilo a las resinas de poliéster, y de los cianoacrilatos al poliuretano.

**Lubricantes**: Varios polímeros sintéticos tienen una energía superficial muy baja combinada con tenacidad. Esto los hace resbaladizos y resistentes (autolubricantes). El PE, el nylon y el POM se utilizan mucho como materiales para cojinetes.

* **Construcciones**: Los polímeros se utilizan ampliamente en la construcción como adhesivos, modificadores del hormigón, materiales para tejados (betún), marcos de ventanas y juntas.
* **Envases y Embalajes**: Diversos polímeros sintéticos se utilizan ampliamente en envases como materiales rígidos y de película. Algunos ejemplos son: PET, PP, PS y papel (celulosa).
* **Electrónica**: Un gran número de polímeros se utilizan con diversos fines en electrónica. Entre ellos: dieléctricos, carcasas de componentes, revestimientos, placas de circuitos, aislantes de cables y piezas estructurales.

### **Aplicaciones de los Polímeros en la Ingeniería Aeroespacial**

Según Euroshore (2022), en el sector aeroespacial se utilizan muchas innovaciones plásticas, algunas de las cuales surgieron en torno a la Segunda Guerra Mundial. Un ejemplo se remonta a 1933, cuando el plexiglás, un plástico acrílico transparente, se introdujo en Alemania y se utilizó para los parabrisas de los aviones y las cubiertas de burbuja, lo que permitió reducir el peso y mejorar la visibilidad panorámica de los pilotos de los cazas. La mayoría de las cubiertas acrílicas modernas se fabrican al vacío y se siguen utilizando en la mayoría de los aviones de combate.

El oftalmólogo inglés Sir Harold Ridley descubrió que los pilotos de aviones de la Segunda Guerra Mundial cuyos ojos resultaron dañados por fragmentos voladores de acrílico se recuperaron mucho mejor que los que resultaron heridos por vidrio estándar. Esto demostró una mayor compatibilidad entre el tejido humano y el acrílico que con el vidrio. Las aplicaciones civiles, como las lentes, siguieron tras el fin de la guerra.

A finales de la década de 1980, el material termoplástico en láminas se utilizó por primera vez para formar suelos de aviones mediante termoplegado. Los paneles de suelo de polieterimida (PEI) reforzada con fibra de vidrio y de PEI reforzado con carbono se termodoblaron 90° hacia abajo en los bordes para producir cierres de bordes duraderos y de bajo costo.



**Figura 10**. Las cubiertas de burbujas acrílicas se utilizaron en aviones como el Supermarine Spitfire y el Westland Whirlwind.

El PEI reforzado con fibra de carbono se utilizó en los paneles del suelo de los jets de negocios Gulfstream G400 y G500, así como en el avión de transporte Airbus Beluga, mientras que el PEI reforzado con fibra de vidrio se empleó en el suelo de carga del avión Fokker 100.

Hoy en día, los plásticos reforzados con fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra de cuarzo se utilizan mucho en las puertas de los aviones, las vigas del techo, las secciones del fuselaje (como el tren de aterrizaje y la parte trasera del fuselaje), las alas, los estabilizadores horizontales y las superficies de las aletas y la cola.

El nylon 6/6, 6/12 y el acetal se utilizan habitualmente como soportes, cierres, arandelas, bandas de roce y superficies de desgaste. Algunas de estas piezas y componentes se moldean por inyección, mientras que muchas se mecanizan a partir de formas estándar. Los espaciadores utilizados en los conjuntos de inversores de empuje de los aviones son una de las aplicaciones en las que se utiliza la poliamida-imida (PAI) debido a su resistencia al calor y estabilidad dimensional.

Otros materiales plásticos de ingeniería, como el sulfuro de polifenileno (PPS) y la polieteretercetona (PEEK), ofrecen resistencia química a los fluidos hidráulicos y combustibles de aviación, así como propiedades físicas excepcionales en comparación con los metales. Los materiales de gama alta, como el PAI, el polibenzimidazol (PBI) y la poliimida (PI), ofrecen una protección similar contra los fluidos, con una buena resistencia e incluso una mayor resistencia a la temperatura.

Otro ejemplo de aplicación de los plásticos técnicos en aeronaves son los casquillos pivotantes. Los materiales avanzados como los enumerados anteriormente tienen varias cargas añadidas al polímero base para aumentar la capacidad de carga y reducir el desgaste. Los casquillos de las bisagras de las puertas de cabina y de salida, los alerones de los aviones, los asideros y los brazos de vídeo pueden beneficiarse de la resistencia a los impactos, la autolubricación y, en el caso de los sistemas interiores, la resistencia a las llamas de los plásticos técnicos mecanizables.

El 22% del Airbus A380, el avión comercial más grande del mundo, está construido con plásticos reforzados con carbono (New Scientist). Esto ayuda a reducir el consumo de combustible a tasas comparables a las de un coche familiar económico (BPF). El Airbus A380 es también el primer avión comercial con un cajón central en el ala fabricado con plásticos reforzados con fibra de carbono.

El fuselaje del Boeing 787 Dreamliner está formado por tres secciones de plástico compuesto. Esto permite reducir el consumo de combustible hasta en un 20% (BPF). La Spaceship One, la primera nave espacial privada que se puso en órbita terrestre, utilizó en gran medida plásticos reforzados con fibra de carbono para escapar de la gravedad manteniendo un peso reducido.

## Diferencias entre los polímeros terrestres y espaciales

Las diferencias entre los polímeros terrestres y espaciales radican principalmente en sus entornos, aplicaciones y propiedades materiales. He aquí las principales distinciones:

**Condiciones Ambientales**

* **Polímeros Terrestres**: Se utilizan en aplicaciones cotidianas en la Tierra, donde están sometidos a condiciones atmosféricas estándar, variaciones de temperatura y humedad. Están diseñados para funcionar bien en estos entornos relativamente estables.
* **Polímeros Espaciales**: Por el contrario, los polímeros espaciales deben soportar condiciones extremas, como altos niveles de radiación, vacío y grandes fluctuaciones de temperatura. Por ejemplo, los polímeros utilizados en aplicaciones espaciales, como las poliimidas, presentan una estabilidad térmica y una resistencia a la radiación excepcionales, que son fundamentales para mantener la funcionalidad en el duro entorno espacial (Toto et al., 2024).

**Propiedades de los Materiales**

* **Propiedades Mecánicas y Térmicas**: Los polímeros espaciales a menudo requieren propiedades mecánicas mejoradas para soportar las tensiones del lanzamiento y el funcionamiento en el espacio. También deben mantener su integridad a temperaturas muy bajas y resistir la degradación provocada por la exposición a la radiación. Los polímeros terrestres, aunque pueden diseñarse para aplicaciones específicas, no suelen tener que cumplir requisitos tan estrictos (Ryan et al., 2024) (Toto et al., 2024).
* **Conductividad and Funcionabilidad**: Muchas aplicaciones espaciales requieren polímeros que sean conductores de la electricidad o que tengan propiedades multifuncionales, como la capacidad de autocuración o de detección medioambiental. Esto es menos común en los polímeros terrestres, que suelen diseñarse para funciones específicas sin necesidad de características tan avanzadas (Ryan et al., 2024) (Toto et al., 2024).

**Aplicaciones**

* **Aplicaciones Terrestres**: Incluyen una amplia gama de productos, desde materiales de envasado hasta componentes de construcción y automoción, en los que el rendimiento se evalúa en función de la rentabilidad y la idoneidad para el uso cotidiano.
* **Aplicaciones Espaciales**: En el espacio, los polímeros se utilizan para funciones especializadas, como el blindaje contra la radiación, el aislamiento térmico y los componentes estructurales de naves espaciales y satélites. El desarrollo de estos materiales suele implicar pruebas rigurosas para garantizar que puedan resistir los desafíos únicos del espacio (Ryan et al., 2024) (Toto et al., 2024) (MacLean et al., 2021).

## Proveedores de Polímeros utilizados en las Tecnologías Aeroespaciales

Varios proveedores suministran polímeros utilizados en tecnologías aeroespaciales, y cada uno de ellos ofrece materiales y soluciones únicos adaptados al sector. He aquí algunas empresas destacadas:

* **Allegheny Performance Plastics**: Esta empresa está especializada en piezas de polímeros de alto rendimiento y alta temperatura para los sectores aeroespacial comercial y de defensa. Producen más de 300 piezas complejas integradas en aviones modernos y cuentan con certificaciones como AS9100 e ITAR. Sus materiales incluyen Torlon®, Aurum®, Ultem®, PBI, PEEK, PI y PPS, que se utilizan en aplicaciones como sistemas electrónicos y sistemas de gestión aérea (Stubna, 2019).
* **Celanese**: Celanese produce una gama de soluciones químicas y polímeros específicos para aplicaciones aeroespaciales. Sus materiales se utilizan tanto en aeronaves como en aviación general, centrándose en mejorar el rendimiento y la eficiencia en diversos componentes aeroespaciales (Celanese, n.d.).
* **CDI Products**: Conocida por sus productos de polímeros de alto rendimiento, CDI se centra en sistemas de sellado diseñados para aplicaciones aeroespaciales de misión crítica. Su oferta incluye elastómeros, termoplásticos y compuestos termoplásticos, diseñados para soportar condiciones extremas manteniendo la eficiencia y la seguridad (CDI Products, n.d.).
* **Zeus**: Esta empresa ofrece soluciones de polímeros de ingeniería, en particular fluoropolímeros y plásticos de ingeniería, que están ganando popularidad en el sector aeroespacial. Los productos de Zeus se utilizan en aplicaciones como la formación de compuestos, la transferencia de fluidos críticos y el cableado, haciendo hincapié en la resistencia química y la durabilidad en condiciones adversas (Zeus, 2024).
* **Syensqo**: Syensqo ofrece una amplia gama de polímeros, oligómeros y monómeros especiales para compuestos avanzados en el sector aeroespacial. Sus materiales están diseñados para reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia energética, cumpliendo las estrictas normas reglamentarias sobre seguridad y confort de los pasajeros (Syensqo, n.d.).
* **Solvay**: Solvay fabrica materiales para aplicaciones aeroespaciales en Norteamérica, Europa y Asia, y está ampliando sus instalaciones en muchos lugares. Nuestra base global de empleados apoya el crecimiento continuo de la adopción de materiales compuestos con profesionales técnicos ubicados cerca de las operaciones de nuestros clientes para responder de manera rápida y eficiente (Solvay, 2018).

Solvay se centra en la innovación, la tecnología avanzada y la experiencia en aplicaciones para desarrollar y fabricar productos que transforman la forma en que operan sus clientes. A medida que los fabricantes de todo el mundo continúan creciendo, modernizándose y desarrollando nuevas tecnologías, aumenta su necesidad de materiales de alto rendimiento que mejoren la durabilidad y la producción al tiempo que reducen el peso en la aplicación final.

Los productos pioneros de Solvay desempeñan funciones específicas e importantes para sus clientes, permitiéndoles ofrecer soluciones innovadoras a las industrias a las que sirven. Con operaciones globales racionalizadas, Solvay fabrica materiales para aplicaciones aeroespaciales en Norteamérica, Europa y Asia, y está ampliando sus instalaciones en muchos lugares. Su equipo mundial de empleados apoya el crecimiento continuo en la adopción de materiales compuestos, con profesionales técnicos situados cerca de las operaciones de los clientes para responder con rapidez y eficacia. El servicio técnico de Solvay ofrece:

* Profesionales con experiencia para ayudar en la evaluación y selección de materiales.
* Asistencia para optimizar la versatilidad del producto dentro de los requisitos de especificación.
* Acceso directo a asociaciones tecnológicas.

Solvay ofrece un sistema integrado de productos para aplicaciones aeroespaciales. Con la base de cualificación más amplia de cualquier proveedor de materiales aeroespaciales, Solvay ofrece una cartera de materiales compuestos y adhesivos para estructuras primarias y secundarias, productos para interiores de aeronaves y materiales de procesamiento optimizados para métodos de fabricación complejos.

Solvay es más que un fabricante de materiales avanzados. Trabaja con sus clientes para identificar el mejor material para aplicaciones específicas, lo que facilita el desarrollo de nuevos productos y eficiencias para ellos. Solvay tiene una larga historia de productos utilizados en diversas aplicaciones, conseguida gracias a la colaboración con sus clientes para resolver sus retos. Su avanzada tecnología incluye:

* Sistemas de resina epoxi endurecida para aplicaciones de estructuras primarias.
* Sistemas de resina de poliimida para aplicaciones de temperaturas extremas.
* Sistemas de resina termoplástica para aplicaciones de estructuras interiores y secundarias.
* Adhesivos estructurales para aplicaciones primarias, secundarias y especiales.

Esta capacidad de ofrecer soluciones personalizadas de alta calidad permite a Solvay mantener una posición de liderazgo en el mercado de materiales avanzados para la industria aeroespacial.

Solvay dispone de los siguientes materiales:

**Preimpregnados y Sistemas de Resinas para Estructuras Primarias y Secundarias**

* **Preimpregnados Termoestables**
* **CYCOM® 977-2**: Epoxi endurecido para estructuras primarias y secundarias, disponible en fibra de carbono de módulo estándar e intermedio, en diversas formas de tejido y cinta.
* **CYCOM® 5276-1**: Epoxi de alto curado para aplicaciones de estructuras primarias.
* **CYCOM® 5320-1**: Epoxi endurecido para el procesamiento VBO de estructuras primarias.
* **CYCOM® 5250-4**: Sistema IMC para estructuras primarias.
* **MTM® 45-1**: Epoxi endurecido para estructuras primarias y secundarias, compatible con diferentes fibras (vidrio E, vidrio S, cuarzo).
* **CYCOM® 977-3**: Epoxi endurecido para servicio en seco y en húmedo, apto para moldeo en autoclave o en prensa.
* **CYCOM® 970**: Epoxi para estructuras sándwich de nido de abeja sin poros ni huecos.
* **AVIMID® S**: Preimpregnado de poliimida sin MDA, formulado para curado en prensa o autoclave.
* **CYCOM® 5575-2 y 5577-1**: Éster de cianato modificado para propiedades mecánicas a alta temperatura y baja constante dieléctrica.
* **Resinas Líquidas Termoendurecibles y Refuerzos**
* **PRISM® EP2400**: Resina RTM endurecida de baja viscosidad para aplicaciones estructurales primarias.
* **CYCOM® 890**: Resina RTM con una vida útil de 30 días a temperatura ambiente.
* **CYCOM® PR 520**: Resina RTM endurecida.
* **CYCOM® 5250-4**: Resina RTM IMC para aplicaciones estructurales primarias.
* **Aplicaciones en Interiores de Aeronaves**
* **CYCOM® 2265**: Sistema fenólico autoadhesivo de bajo tack y drapeado.
* **CYCOM® 6070**: Sistema fenólico de curado rápido.
* **CYCOM® 2400-1**: Sistema fenólico autoadhesivo disponible en tack bajo, medio o alto.
* **L-591**: Sistema fenólico de uso general.
* **L-728**: Sistema fenólico hermético reforzado.
* **Preimpregnados Termoplásticos**
* APC-2 PEEK: Alta resistencia a la fatiga y al medio ambiente con baja inflamabilidad y toxicidad de humos.
* APC PEKK FC: Alta resistencia química con baja inflamabilidad y toxicidad del humo.
* **Adhesivos, Películas Superficiales e Imprimaciones.**
* **FM® 73, FM® 94, Metibond® 1515-4, FM® 209-1, FM® 300, FM® 377, FM® 450-1, Metibond® 2550, FM® 385, FM® 57, Metibond® 2555**: Variedad de adhesivos epoxi, IMC y poliimida para el pegado de metales y composites, adecuados para diferentes aplicaciones y temperaturas de servicio.
* **Películas e Imprimaciones Superficiales**: Incluidas opciones como SURFACEMASTER® 905 y BR® 127, BR® 6747-1 para la preparación de superficies y la protección contra el óxido.
* **Materiales de Proceso y Utilaje**
* **Materiales de Proceso**: Películas de vacío, tejidos transpirables, medios de flujo, productos combinados, cintas y otros consumibles.
* **Utilaje**: Preimpregnados de herramientas (epoxi y BMI), hardware de herramientas y bolsas de vacío reutilizables (RVB).

El material relevante de Solvay para el sector aeroespacial es CYCOM® 977-2, un preimpregnado epoxi termoendurecido especialmente diseñado para aplicaciones aeroespaciales en estructuras primarias y secundarias. Este material destaca por sus excepcionales propiedades mecánicas y de durabilidad y es la opción preferida en la industria aeroespacial para componentes críticos.

El material de referencia aeroespacial de Solvay es CYCOM® 977-2, un preimpregnado epoxídico termoendurecido especialmente diseñado para aplicaciones aeroespaciales en estructuras primarias y secundarias. Este material destaca por sus excepcionales propiedades mecánicas y de durabilidad y es la opción preferida en la industria aeroespacial para componentes críticos. A continuación se describen sus propiedades, ventajas clave, aplicaciones, parámetros de procesamiento y comparaciones con otros materiales:

**Propiedades y Ventajas Claves**

* **Resistencia Mecánica**: Ofrece una elevada resistencia a la tracción y a la compresión, por lo que es ideal para estructuras que deben soportar cargas importantes.
* **Durabilidad**: Presenta una excelente resistencia al impacto y a la fatiga, lo que garantiza una larga vida útil de los componentes fabricados con este material.
* **Versatilidad de Procesamiento**: Compatible con diferentes formas de fibra de carbono (módulo estándar e intermedio) y configuraciones de tejido y cinta, lo que permite una gran flexibilidad en el diseño y la fabricación.
* **Adhesión y Acabado**: Proporciona una buena adherencia a otros materiales y un acabado superficial de alta calidad, lo que resulta crucial para las aplicaciones aeroespaciales.

**Aplicaciones Específicas**

* **Estructuras Primarias**: Se utiliza en componentes críticos como alas, fuselajes y otros elementos estructurales que requieren gran resistencia y rigidez.
* **Estructuras Secundarias**: Adecuado para piezas no estructurales que siguen necesitando resistencia y durabilidad, como carenados y capotas.

**Parámetros de Procesamiento**

* **Curado en Autoclave**: Normalmente se esteriliza en autoclave a temperaturas específicas para maximizar las propiedades mecánicas.
* **Vida Útil**: Tiene una vida útil significativa a temperatura ambiente, lo que facilita su manipulación y almacenamiento en condiciones industriales.

**Comparación con Otros Materiales**

* **CYCOM® 977-3**: Similar en algunas propiedades, pero se prefiere CYCOM® 977-2 para estructuras que requieran un equilibrio entre resistencia y peso.
* **MTM® 45-1**: Aunque MTM® 45-1 también es un epoxi endurecido, CYCOM® 977-2 destaca para su uso en estructuras primarias debido a sus propiedades mecánicas superiores.

# Conclusiones

Los polímeros especiales desempeñan un papel crucial en las tecnologías aeroespaciales, ya que ofrecen ventajas significativas en cuanto a rendimiento, reducción de peso e impacto medioambiental. En este resumen se exponen las principales conclusiones, implicaciones y futuras áreas de investigación relacionadas con el uso de polímeros especiales en aplicaciones aeroespaciales.

**Principales Hallazgos**

* **Reducción de Peso y Ahorro de Combustible**: Los polímeros especiales son más ligeros que los materiales tradicionales, como los metales, lo que contribuye a reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO2. Su uso en el diseño de aeronaves permite importantes ahorros de peso, mejorando la eficiencia global.
* **Materiales Compuestos Avanzados**: La integración de polímeros especiales con fibras ha llevado al desarrollo de materiales compuestos avanzados. Estos compuestos no sólo son ligeros, sino que también presentan una gran solidez y resistencia a temperaturas extremas y a la corrosión, lo que los hace ideales para aplicaciones aeroespaciales.
* **Aplicaciones Diversas**: Los polímeros especiales se utilizan en diversos componentes de aeronaves, como góndolas, motores, trenes de aterrizaje y sistemas de control. Sus propiedades mejoran la resistencia a la temperatura y al desgaste, que son fundamentales para el rendimiento y la seguridad de los vehículos aeroespaciales.
* **Cumplimiento de la Normativa**: Muchos polímeros especiales cumplen estrictas especificaciones de materiales aeroespaciales, como las establecidas por Boeing y otros organismos reguladores. Este cumplimiento es esencial para garantizar la seguridad y fiabilidad de las aplicaciones aeroespaciales.

**Implicaciones**

La adopción de polímeros especiales en las tecnologías aeroespaciales tiene varias implicaciones:

* **Impacto Económico**: Al reducir el peso y mejorar la eficiencia del combustible, los polímeros especiales pueden reducir los costes operativos de las aerolíneas, contribuyendo a la viabilidad económica general del transporte aéreo.
* **Beneficios Medioambientales**: El cambio hacia materiales ligeros se alinea con los esfuerzos mundiales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover prácticas de aviación sostenibles.
* **Innovación en la Fabricación**: La demanda de polímeros especiales ha impulsado avances en los procesos de fabricación, como la fabricación aditiva y el mecanizado de precisión, que mejoran la capacidad de producción de componentes aeroespaciales.

**Futuras Áreas de Investigación**

* **Desarrollo de Materiales**: Es necesario seguir investigando para desarrollar nuevos polímeros especiales con propiedades mejoradas, como una mayor estabilidad térmica, resistencia al fuego y resistencia mecánica, para satisfacer las cambiantes demandas aeroespaciales.
* **Reciclaje y Sostenibilidad**: Investigar la reciclabilidad de los polímeros especiales y desarrollar prácticas sostenibles para su producción y eliminación será crucial para minimizar el impacto medioambiental.
* **Integración con Tecnologías Inteligentes**: Explorar la integración de polímeros especiales con tecnologías inteligentes, como sensores y actuadores, podría dar lugar a soluciones innovadoras para controlar y mejorar el rendimiento de las aeronaves en tiempo real.
* **Aplicaciones más Amplias**: La investigación futura también podría centrarse en ampliar el uso de polímeros especiales más allá de las aplicaciones aeroespaciales tradicionales, incluyendo su papel potencial en tecnologías emergentes como la movilidad aérea urbana y los aviones eléctricos.

# Referencias Bibliográficas

Admin. (2023, August 21). Polymers - Classification, types, uses, properties and polymerization. BYJUS. <https://byjus.com/jee/polymers/>

CDI Products (n.d.). Aerospace - High-Performance Polymer Products & Solutions. CDI Products. https://www.cdiproducts.com/solutions/markets/aerospace

Dyer, W. E., & Kumru, B. (2023). Polymers as aerospace structural components: how to reach sustainability? Macromolecular Chemistry and Physics, 224(24). <https://doi.org/10.1002/macp.202300186>

ENGRO. (n.d.). Specialty polymer. <https://engro-global.com/specialty-polymer-2/>

Euroshore. (2022, June 6). Polymers in aerospace applications. Euroshore Sdn Bhd. <https://www.euroshore.com.my/about/industries/aerospace-plastics/>

Hechtel, K. (2021, October). 6 polymer technology trends in aerospace. Aerospace Manufacturing and Design. <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/6-polymer-technology-trends-in-aerospace/>

Libretexts. (2020, July 21). 8.7: Properties of polymers. Chemistry LibreTexts. [https://chem.libretexts.org/Courses/Brevard\_College/CHE\_202:\_Organic\_Chemistry\_II/08:\_Polymers/8.07:\_Properties\_of\_Polymers](https://chem.libretexts.org/Courses/Brevard_College/CHE_202%3A_Organic_Chemistry_II/08%3A_Polymers/8.07%3A_Properties_of_Polymers)

Libretexts. (2021, March 5). 29.3: Types of Polymers. Chemistry LibreTexts. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic\_Chemistry/Basic\_Principles\_of\_Organic\_Chemistry\_%28Roberts\_and\_Caserio%29/29:\_Polymers/29.03:\_Types\_of\_Polymers](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Basic_Principles_of_Organic_Chemistry_%28Roberts_and_Caserio%29/29%3A_Polymers/29.03%3A_Types_of_Polymers)

MacLean, J., Mayanna, S., Benning, L. G., Horn, F., Bartholomäus, A., Wiesner, Y., Wagner, D., & Liebner, S. (2021). The Terrestrial Plastisphere: Diversity and Polymer-Colonizing potential of Plastic-Associated microbial communities in soil. Microorganisms, 9(9), 1876. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091876>

Nehls, G. (2023, November 13). Solvay becomes Beta Technologies material supplier for AAM. *Gardner Business Media, Inc.* <https://www.compositesworld.com/news/solvay-becomes-beta-technologies-material-supplier-for-aam->

(PDF) The role of Advanced Polymer Materials in Aerospace. (2013, October 14). ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/257748047_The_Role_of_Advanced_Polymer_Materials_in_Aerospace>

Perkins, S. (2022, June 30). Explainer: What are polymers? Science News Explores. <https://www.snexplores.org/article/explainer-what-are-polymers>

Prajapati, V. D., Maheriya, P. M., & Roy, S. D. (2021). Locust bean gum-derived hydrogels. In Elsevier eBooks (pp. 217–260). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821649-1.00016-7>

Rhiannon, R., & Davis, K. (2023). Polymeric Materials Used in Aerospace Applications. Hilaris, 12(1). <https://www.hilarispublisher.com/open-access/polymeric-materials-used-in-aerospace-applications-96960.html>

Ryan, E. A., Seibers, Z. D., Reynolds, J. R., & Shofner, M. L. (2024). Electrically conducting polymers and composites for applications in space exploration. Journal of Applied Polymer Science, 141(15). <https://doi.org/10.1002/app.55225>

Solvay. (n.d.). Aerospace Thermoplastic Composite qualifications. <https://www.solvay.com/en/chemical-categories/our-composite-materials-solutions/thermoplastic-composites/aerospace-tpc>

Solvay. (2018). Advance Composite Materials for Aerospace. <https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-07/Composite%20-%20Aerospace%20Brochure.pdf>

Solvay. (2023, October 3). *Solvay partners with BETA Technologies for Advanced Air Mobility Platform*. Solvay. <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-partners-beta-technologies-advanced-air-mobility-platform>

Stubna, A. (2019, October 22). High-Performance polymers for the aerospace industry | Allegheny Performance Plastics. Allegheny Performance Plastics®. <https://alleghenyperformanceplastics.com/industries/aerospace/>

Syensqo (n.d.). Aerospace applications. <https://www.syensqo.com/en/chemical-categories/specialty-polymers/aerospace>

Syensqo. (n.d.). Inventing the Future with You – Products. <https://www.syensqo.com/en/chemical-categories/specialty-polymers/products>

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2024, July 22). Polymer | Description, Examples, Types, Material, Uses, & Facts. Enciclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/polymer>

Toto, E., Lambertini, L., Laurenzi, S., & Santonicola, M. G. (2024). Recent advances and challenges in Polymer-Based materials for space radiation shielding. Polymers, 16(3), 382. <https://doi.org/10.3390/polym16030382>

Xometry, T. (2023, March 30). Polymer: Definition, properties, types, and applications. Xometry. <https://www.xometry.com/resources/materials/what-is-polymer/>

Wikipedia contributors. (2024, July 11). Polymer. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>

Wright, W. (1991). Polymers in aerospace applications. Materials & Design (1980-2015), 12(4), 222–227. [https://doi.org/10.1016/0261-3069(91)90169-5](https://doi.org/10.1016/0261-3069%2891%2990169-5)

Zeus. (2024, May 14). Engineered polymer solutions for the aerospace industry | Zeus | Zeus. Zeus | Polymer Extrusion & Tubing. <https://www.zeusinc.com/markets/aerospace/>