

M. M. GONZÁLEZ-REAL y A. BAILLE

Área de Ingeniería Agroforestal

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
Universidad Politécnica de Cartagena

Correo electrónico:

mayla.gonreal@upct.es

alain.baille@upct.es

PARTE V

MATERIALES DE CUBIERTA. LOS PLÁSTICOS



Contenido de la Parte V

Material de lectura:

- *Unidad 1. Los materiales de plástico*
- *Unidad 2. Los tratamientos de los materiales plásticos*

Referencias

Cartagena, 2005



Invernadero de cristal



Invernadero con cubierta de filme plástico



Banco de pruebas de materiales plásticos



PARTE V. UNIDAD 1. MATERIALES DE PLÁSTICO

La aparición de los materiales plásticos de pequeño espesor (filmes plásticos) ha supuesto una verdadera revolución en la horticultura protegida, con un desarrollo espectacular de la llamada

“plasticultura”. El bajo coste de estos materiales de cubierta, su ligereza y las posibilidades que tiene la industria de modificar sus propiedades ópticas, térmicas y mecánicas, hacen de estos materiales una base tecnológica de primera importancia en la mejora de la producción bajo invernadero. Esta Unidad presenta los principales filmes plásticos que se emplean en la horticultura moderna.

1- INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la plasticultura ha supuesto para el agricultor un cambio profundo de estrategia de producción y ha exigido una adaptación a nuevas prácticas de cultivo (riego, cultivos sin suelo), de producción (cultivos protegidos), de infraestructuras (sistemas de riego, túneles para la crianza de animales, etc.) y de almacenamiento (reservas hídricas).

Las aplicaciones agrícolas de los plásticos son múltiples y abarcan áreas tan diversas como los sistemas de drenaje, el riego, las cubiertas de invernaderos, las pantallas térmicas o de sombreado, las construcciones para la crianza de animales, etc. Su papel en la mejora de la infraestructura del sistema de producción moderno (invernaderos, redes de riego, sistemas de almacenamiento, etc.) ha sido importante, con repercusiones positivas tanto a nivel económico (reducción de los costes de producción y de mano de obra como agronómico (mejora del rendimiento y de la calidad de los productos agrícolas). Como aspecto negativo cabe resaltar el impacto que ejercen los plásticos usados sobre el medio ambiente.

La historia de la plasticultura comienza, a mediados del siglo diecinueve, totalmente desvinculada de las aplicaciones agrícolas. La primera producción y comercialización de las materias plásticas se desarrolló con la vulcanización¹ del caucho en 1839, antes de que se conociese la noción de macromolécula o polímero².

¹ la vulcanización del caucho se realiza a través de un proceso térmico (100-140°C) durante el cual las cadenas de poli-isopreno se asocian por medio de átomos de azufre.

² un polímero es una macromolécula formada por cadenas de moléculas orgánicas sencillas (o monómeros) capaces de combinarse, a través de una reacción en cadena, entre ellas o con otras moléculas (comonómeros).

Posteriormente aparece, en 1870, el primer **plástico artificial**³ (conocido como celuloide) que tiene su origen en un **polímero natural**: la celulosa⁴. Habrá que esperar hasta principios del siglo veinte (1909) la aparición de la primera materia **plástica sintética**, el fenoplasto (conocido como baquelita⁵) perteneciente al grupo de las resinas fenólicas.

Sin embargo, la industria de los plásticos empieza realmente a desarrollarse a lo largo de los años 30. Este aspecto queda reflejado por el fuerte incremento de la producción mundial que pasó de unas 86.000 toneladas en 1925 a, aproximadamente, 46 millones de toneladas en 1978. Dentro del marco agrícola, la aplicación de los plásticos no se observará hasta después de la primera guerra mundial. Es a partir de este periodo cuando aparece un amplio abanico de materias plásticas, en general de origen sintético, que provienen de síntesis diversas: poliestireno, polietileno, PVC, plexiglás (polimetacrilato de metilo) y nylon (poliamidas).

2- PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

2.1- OBTENCIÓN DE MONÓMEROS Y DE MOLÉCULAS A PARTIR DEL PETRÓLEO

La materia prima corrientemente utilizada para la fabricación de los plásticos es el petróleo bruto, mezcla de numerosos hidrocarburos que presentan una composición variada en función de su origen. Los hidrocarburos están formados por eslabones de cadenas de carbono (C-C) con radicales C-H que comparten sus electrones a través de uniones covalentes. Los polímeros que van a dar lugar a los plásticos pueden estar formados por encadenamiento de eslabones de un solo monómero, o provenir de reacciones que hacen intervenir un monómero de base y comonómeros (monómeros diferentes) en asociación con moléculas más menos complejas.

Entre las fracciones destiladas del petróleo se encuentran la nafta y el gasóleo que representan las materias primas de base de la industria petroquímica. El proceso de *cracking* consiste en romper (por acción térmica) las moléculas de hidrocarburo, dando cada molécula origen a dos eslabones de menor peso molecular. Por ejemplo, un hidrocarburo dodecano (C_{12}) dará, tras un proceso de *cracking*, teóricamente origen a dos hidrocarburos C_6 que, a su vez, si el nivel térmico es suficiente pueden dar dos hidrocarburos C_3 , llegando al final de la serie a obtener C y H_2 .

El objetivo de este proceso es la obtención de moléculas más pequeñas, y más reactivas, susceptibles de polimerizarse. El proceso de *cracking* proporciona los eslabones de base o monómeros (etileno, acetileno, etc.) que servirán como materia prima para la obtención de macromoléculas más complejas. Los principales monómeros utilizados en la formación de macromoléculas pertenecen:

³ existen **plásticos naturales** tales como la celulosa y el caucho utilizados como eslabones de base en la obtención de materias plásticas artificiales (por ejemplo, la plastificación del nitrato de celulosa para fabricar el celuloide).

⁴ la celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ es un polisacárido, principal constituyente de las fibras de las plantas, encontrándose en la madera. Su forma natural más pura se encuentra en el algodón.

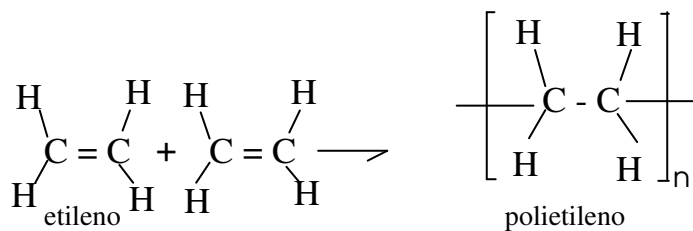
⁵ Baekeland, 1909. La baquelita resulta de una reacción entre el fenol y el formol.

- al grupo de compuestos insaturados tales como las olefinas (etileno, propileno, butadieno, benzeno...), los derivados vinílicos (acetato de vinilo) y acrílicos (metacrilato de vinilo),
- al grupo de compuestos cíclicos,
- al grupo de monómeros de policondensación que presentan funciones alcohol, fenol, ácido, aminas, ésteres, etc.

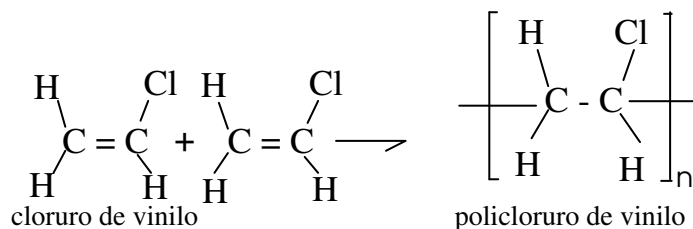
2.2- LA POLIMERIZACIÓN

Bajo la acción de factores físicos (calor y presión) y químicos (catalizadores) las moléculas del monómero insaturado rompen el doble enlace de carbono para unirse en cadena, dando lugar a macromoléculas formadas por un solo monómero (**homopolímero**). El radical libre puede también ser creado por acción fotoquímica, por irradiación o por la acción de moléculas generadoras de radicales libres.

Este proceso da lugar a una macromolécula, con una estructura lineal, sin formación de producto residual. Un ejemplo de homopolímero se da en la polimerización del etileno:



También el PVC resulta de la polimerización de un solo monómero, el cloruro de vinilo:



Cuando en una misma cadena macromolecular se asocian monómeros diferentes (comonómeros) se obtienen **copolímeros**. Éste es el caso del EVA (etileno vinil acetato) que se obtiene por polimerización del etileno y del acetato de vinilo:

Sin embargo, las características del polímero no solamente dependen de su composición (tipo de monómero o comonómero utilizado) sino también de las condiciones térmicas y de presión en las que se ha realizado la polimerización. Estos dos factores influyen en la estructura de las macromoléculas, en su longitud y por consiguiente en sus características físicas (transparencia, resistencia mecánica...). Puede observarse un ejemplo en las diferencias estructurales que presentan tres tipos de PE (ver Figura 1).

2.3- POLICONDENSACIÓN

A diferencia de la polimerización, la policondensación tiene lugar entre monómeros con grupos funcionales diferentes. El proceso de formación de la macromolécula da lugar a

la liberación de un producto residual sencillo (agua, amoníaco, ácido clorhídrico). Los poliésteres, el policarbonato y las poliamidas son un ejemplo de materias plásticas obtenidas por policondensación. Los poliésteres son resinas termoendurecidas con estructuras complejas y se obtienen por condensación de grupos diol (radical OH) con mezclas de ácidos insaturados, saturados y grupos diversos.

3- CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

Existe una gran variedad de filmes y de placas rígidos utilizadas, a nivel mundial, en las cubiertas de invernadero. Los filmes plásticos tipo PE y los copolímeros del EVA son los más utilizados. En cuanto a las placas rígidas transparentes, el policarbonato, el polimetacrilato de metilo y el policloruro de vinilo han conocido en algunos países un desarrollo importante.

En España, la casi totalidad de las cubiertas de invernadero son de PE (normal, térmico o térmico de larga duración). El espesor utilizado es de 100 μm (PE normal), 180 μm (PE larga duración) y de 200 μm (PE térmico larga duración). La anchura de los filmes suele estar comprendida entre 8 y 12 m y se destinan a invernaderos de grandes dimensiones.

Los plásticos tienen como característica común la organización de la estructura de sus moléculas que puede ser lineal, laminar o tridimensional. Su clasificación tiene en cuenta su comportamiento mecánico y térmico:

- El **comportamiento mecánico** de una materia plástica viene esencialmente determinado por la naturaleza de la macromolécula que lo constituye. No obstante, el proceso de fabricación y los aditivos empleados en el proceso de fabricación pueden modificar de manera apreciable sus propiedades. Estas difieren según que la temperatura de fabricación sea inferior o superior a una temperatura umbral de transición vidriosa. Cuando la temperatura de fabricación es inferior a la temperatura umbral, el alargamiento a la ruptura es de un 10% y llega a alcanzar un 400% cuando es superior a la temperatura umbral.

- El **comportamiento térmico** de las macromoléculas permite clasificarlas en dos categorías:

(i) **Termoplásticos.** Engloba los filmes utilizados en aplicaciones agrícolas. Pueden fundirse y solidificarse sin que intervenga un proceso de degradación. Es decir, cuando se someten a la acción del calor se ablandan, alcanzando primero un aspecto pastoso y finalmente fluido. Vuelven a solidificarse de nuevo cuando se enfrían, siendo reversible el proceso de fluidificación. Cuando un termoplástico se somete a la acción del calor, su estructura (esencialmente lineal o ramificada) permite que las cadenas macromoleculares adquieran una cierta movilidad pudiendo desplazarse unas respecto a otras. No obstante, la naturaleza de las moléculas permanece inalterada y éstas solamente cambian de posición.

(ii) **Termoendurecidos.** Cuando se someten a la acción del calor pueden ablandarse momentáneamente, pero luego se solidifican de manera irreversible. La estructura de estos plásticos es tridimensional. La síntesis de un plástico termoendurecido finaliza con el proceso de calentamiento que dará lugar al

producto acabado. Sin embargo, son menos sensibles a la acción de solventes y de agentes químicos que los termoplásticos.

El Cuadro 1 da un ejemplo de clasificación de los plásticos por familias homogéneas. Puede observarse que la mayoría de los plásticos utilizados en la agricultura pertenecen al grupo de los termoplásticos.

Cuadro 1. Clasificación de las principales materias plásticas.

Clase	familias	materia de base	abreviatura
Termoplásticos	Poliiolefinas	PE baja densidad	PEbd
		PE lineal baja densidad	Pelbd
		PE alta densidad	Pead
		Polipropileno	PP
		Poliestireno	
	Polivinilos	Policloruro de vinilo	PVC ₁
		Poliacetato de vinilo	PVAC
		Etileno vinil acetato	EVA
	Poliacrílicos	Polimetacrilato de metilo	PMM
	Policarbonatos		PC
Termoendurecidos	Fenoplastos		PF
	Poliésteres insaturados		UP
	Siliconas		SI
	Poliuretanos		PUR

4- CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS MATERIALES PLÁSTICOS

La densidad de los materiales plásticos ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$) es inferior a la del vidrio (2400 kg m^{-3}). Por ejemplo, 1 m^2 de vidrio de 2, 7 mm tiene un peso de 6,5 kg, mientras que el peso 1 m^2 de PE de 0., mm es de 92 gramos. El Cuadro 2 presenta un ejemplo del peso de materiales plástico por metro cuadrado de cubierta.

Cuadro 2. Peso de materiales de plástico por metro cuadrado de cubierta.

Material	Peso en kg por m^2 de cubierta
Vidrio (4 mm)	10
Poliéster armado con fibras de vidrio	1,5
PVC biorientado (0.9 mm)	1,4
Policarbonato doble pared (6 mm)	1,3
PMM simple pared	1,2
Filme de PE (180 μm)	0,165

Fuente: Macca P., Les Plastiques en agricultura, 1992.

En general los plásticos resisten a la corrosión y presentan una buena inercia química. Sin embargo, todos los materiales plásticos, cualquiera que sea la resina utilizada y los estabilizantes empleados, son sensibles a los tratamientos fitosanitarios que contienen azufre activo y un halógeno. A continuación, se dan las características de los principales plásticos utilizados como materiales de cubierta de invernadero.

- POLIETILENO, PE (FLEXIBLE)

El nombre genérico de PE se da a los derivados del etileno, siendo el polímero que se fabrica actualmente en mayor cantidad. Este plástico es muy sensible a la acción de los rayos ultravioleta y sin un tratamiento específico no puede utilizarse en aplicaciones que exijan una exposición prolongada (más de 4 meses). Según las condiciones de polimerización (temperatura, presión, catalizador) se puede obtener el **PE de baja densidad convencional (PEbd, utilizado en cubiertas de invernadero)**, el **polietileno lineal de baja densidad (PElbd, utilizado en acolchado y en pequeños túneles)** o el **PE de alta densidad (PEad, utilizado en contenedores y en riegos y drenajes)**. Puede observarse un ejemplo de las diferencias estructurales que presentan los tres tipos de PE en la Figura 1. En cubiertas de invernadero se utiliza el polietileno baja densidad.

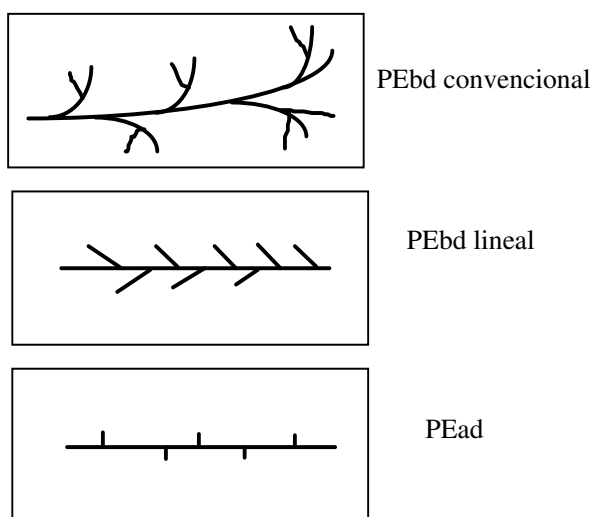


Figura 1. Diferencias estructurales de tres tipos de PE (polietileno de baja densidad convencional, PEbd, polietileno lineal de baja densidad, PElbd, y polietileno de alta densidad, PEad). Les Plastiques en agricultura, 1992.

- COPOLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO, EVA (FLEXIBLE)

La resina de base es el PE enriquecido con acetato de vinilo. Los filmes EVA se utilizan en cubiertas dobles, como pantallas térmicas y en la protección de túneles bajos. El EVA presenta una mejor resistencia mecánica que el PVC. Sin embargo, las características mecánicas de los copolímeros EVA dependen de su concentración en acetato de vinilo.

Concentraciones crecientes de acetato de vinilo aumentan la resistencia mecánica al choque y a la tracción. También aumentan la vida útil del polímero y su opacidad (es decir, disminuyen su coeficiente de transmisión en la longitud de onda larga). Sin embargo, al aumentar la concentración de acetato de vinilo, también aumenta la flexibilidad y la adherencia de polvo y disminuye la resistencia a la deformación. La búsqueda de un compromiso entre las características del filme (mecánicas, adherencia

de polvo, etc.) y las propiedades que requieren determinadas aplicaciones agrícolas hace que se utilicen, en general, niveles de acetato de vinilo del orden de un 14-18%.

- POLICLORURO DE VINILO, PVC (FLEXIBLE O RÍGIDO)

El PVC resulta de la polimerización del cloruro de vinilo. Este plástico es sensible al frío, su resistencia al choque disminuye de manera sensible a baja temperatura (-20 °C). El PVC virgen es rígido. Sin embargo, pueden obtenerse filmes flexibles añadiendo plastificantes. En el comercio se encuentran dos tipos de filme PVC (armado o no) y sus características mecánicas dependen, en gran parte, del tipo de plastificante utilizado.

El PVC es sensible al depósito de polvo y posee además el inconveniente de cambiar de color con el tiempo. Su elasticidad excesiva bajo elevada temperatura limita su uso en grandes túneles e invernaderos. Las placas de PVC rígido (onduladas o no) se utilizan en cubiertas de invernaderos. Los filmes flexibles de PVC (armados o no) se utilizan sobre todo para doblar las cubiertas de invernadero, como pantallas térmicas y para protecciones temporales (túneles bajos).

- POLIMETACRILATO DE METILO, PMM (RÍGIDO)

El coeficiente de transmisión para la radiación solar del PMM es similar a la del vidrio, también es bastante opaco a la radiación infrarroja de onda larga y a la radiación UV. Este material es bastante estable, presenta una buena resistencia mecánica y una duración superior a la de otros plásticos, pero tiene el inconveniente de ser inflamable. Los factores que determinan el envejecimiento de este plástico son esencialmente la radiación solar y la humedad. Bajo atmósfera muy húmeda el PMM absorbe agua, lo que disminuye su resistencia al agrietado. En invernadero se utilizan sobre todo placas simple pared o doble pared con cámara de aire y un espesor de 8-19 mm.

- POLICARBONATO, PC (RÍGIDO)

Los policarbonatos son generalmente poliésteres a base de ácido carbónico y de difenoles aromáticos. Tienen el inconveniente de envejecer rápidamente si no están tratados y estabilizados contra los rayos UV. La radiación solar, así como la humedad del aire, son los principales factores que influyen en su envejecimiento. Este plástico toma con el tiempo un color amarillo y, bajo condiciones de humedad elevada, las placas presentan microfisuras que modifican su transparencia. El coeficiente de transmisión para la radiación solar es similar a la del vidrio. Presenta una buena resistencia al impacto y es menos pesado que el PMM.

- LOS PLÁSTICOS MULTICAPA

Se obtienen a través de un proceso de coextrusión (ver en lo que sigue procesos de transformación) en el que se asocian varias extrudoras que poseen una cabeza común. Cada extrudora suministra a la cabeza común un polímero diferente. Este proceso permite asociar en un solo material (plástico multicapa) un conjunto de propiedades que no pueden reunirse cuando se fabrica una solo filme. En la práctica se utilizan los plásticos tricapa que deben de cumplir las exigencias siguientes:

- La capa externa debe de comportar un tratamiento con agentes de absorción UV y debe de ser resistente al rasgado y evitar la fijación de partículas de polvo.
- La capa intermedia debe de ser termoaislante y privilegiar la difusión de la luz.
- La capa interna debe de comportar un tratamiento antigoteo y proporcionar un efecto termoaislante.

5- EL ENVEJECIMIENTO DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS

El envejecimiento de los materiales plásticos se debe a la alteración con el tiempo de sus propiedades mecánicas y ópticas. Las propiedades ópticas se alteran esencialmente a través de un proceso de fotodegradación (ver Unidad 2). Los rayos UV constituyen un factor importante de esta degradación. En teoría, un material plástico exento de impurezas no presenta bandas de absorción en el visible, excepto algunos plásticos termoendurecidos con bandas de absorción en el UV cercano. Sin embargo, en la práctica, es imposible obtener un material plástico puro y la presencia de impurezas o defectos de cadena (eslabones funcionales oxigenados, o eslabones con una insaturación) actúan absorbiendo la luz UV y desencadenando una reacción de oxidación del polímero.

Existen plásticos que permanecen casi inalterados bajo la acción de la radiación solar (por ejemplo, el PMM y el teflón). Sin embargo, el PE ordinario y los poliésteres son muy sensibles a la acción de los rayos ultravioleta y sin un tratamiento específico quedan fuera de uso en el caso de una exposición prolongada. El aporte de estabilizantes antioxidantes y de agentes de absorción de los rayos UV durante el proceso de fabricación del filme permite prolongar su vida útil: Este aspecto se tratará en la Unidad 2).

6- PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

Generalmente los polímeros que se obtienen en el proceso de fabricación se presentan en forma de polvo, granulados (ej.: PE, PVC, poliéster) o en forma de pasta o de líquido como el en caso de poliésteres insaturados. Estos productos se someten a diversos procesos de transformación antes de obtener el producto final. En el proceso de transformación se añaden generalmente aditivos (plastificantes, estabilizantes, colorantes, etc.) que van a convertir el plástico ya sea en un producto acabado (placas, filmes, tubos, etc.) o en un producto manufacturado. En el proceso de transformación de los plásticos se utilizan procedimientos muy diferentes según que se trate de termoplásticos o de plásticos termoendurecidos, pero éstos tienen como factor común la utilización simultánea del calor y de la presión. La transformación de un termoplástico es una operación reversible. Pueden utilizarse al respecto varios procesos:

6.1- PROCESO DE EXTRUSIÓN

Esta técnica representa la base general de la transformación de plásticos que adquieren formas diversas (filmes, tubos, placas, etc.). La materia plástica (en granulado o en polvo) entra en la extrudora a través de una tolva (Figura 2). Dentro de la extrudora, un tornillo sin fin comprime la materia plástica que se funde por calentamiento mecánico y

con la ayuda de calefacción. La materia plástica se desplaza hacia la cabeza de la extrudora al mismo tiempo que se homogeneiza. A final del proceso de extrusión la cabeza de la extrudora proporciona al plástico fundido la forma deseada. Esta forma es característica del producto final que se desea obtener (filme, tubo, placa, etc.). Una sola máquina extrudora permite, cambiando solamente la cabeza, fabricar plásticos de forma muy diversa.

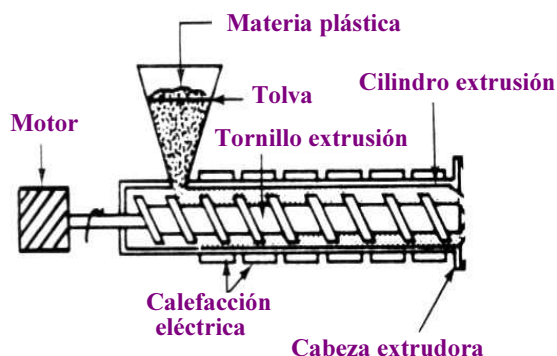


Figura 2. Extrusión

6.2- LA COEXTRUSIÓN

En el proceso de coextrusión (Figura 3) se asocian varias extrudoras (dos o más) que tienen una cabeza común. Este proceso permite que se utilice un material plástico diferente para cada capa, puesto que cada extrudora suministra a la cabeza común un polímero de naturaleza diferente. A la salida de la cabeza de extrusión se obtiene un filme formado por dos o más capas finas de plástico. Esta técnica se utiliza sobre todo para asociar, en un solo producto final, las propiedades de cada una de las capas. Además, permite fabricar filmes específicos para una aplicación determinada. Es posible a través de este proceso obtener filmes multicapa en los que cada capa posea, gracias a los aditivos empleados en el proceso de fabricación, una característica específica.

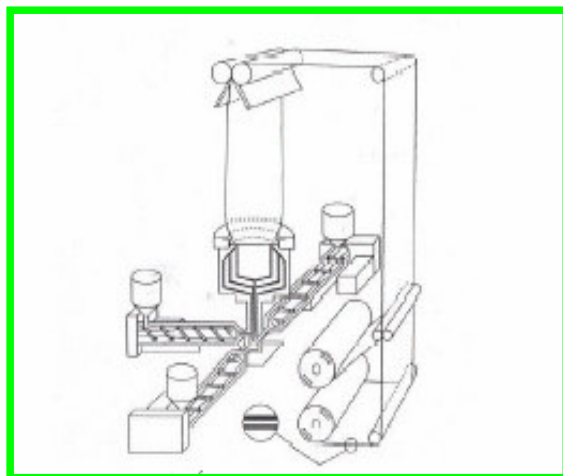


Figura 3. Coextrusión

6.3- LA EXTRUSIÓN-SOPLADO

Es ésta una técnica universalmente utilizada para fabricar un gran número de filmes, en particular los filmes utilizados para uso agrícola (PE, EVA o PVC). El proceso de extrusión-soplado (Figura 4) permite obtener un filme de forma tubular. La materia plástica, una vez fundida, se somete a un alargamiento en dos direcciones. El alargamiento longitudinal se lleva a cabo haciendo pasar el filme de plástico entre dos cilindros de un banco de arrastre. El alargamiento horizontal se realiza por soplado, inyectando aire comprimido.

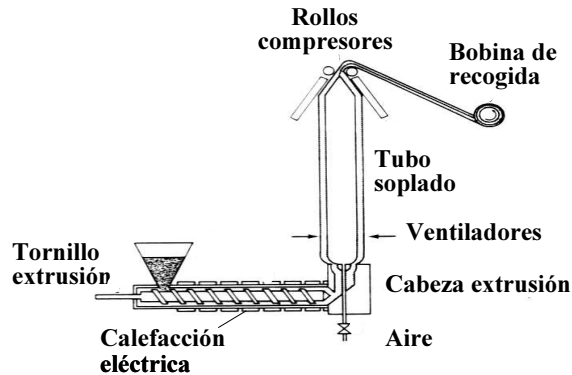


Figura 4. Extrusión-soplado

Se obtiene de este modo un funda tubular de plástico que se solidifica aplicando aire frío. Esta funda, será cortada en sentido longitudinal antes de llegar a la bobina de enrollado, dando lugar a un filme de plástico definitivo. Las instalaciones modernas permiten obtener filmes de 18 m de largo y con un espesor que puede alcanzar solamente unas micras.