



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO**

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DE AÑO SABÁTICO

PROCESAMIENTO Y EXTRUSION DE POLIMEROS

Que presenta

**DR. TOMAS LOZANO RAMIREZ**

**1409**

Realizado en

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**

**CD. MADERO TAMAULIPAS**

Durante el Periodo

**01/SEP/2023 AL 31/AGO/2024**

Dictamen No.: AS-2-379/2023



Ciudad de México, 28 de agosto de 2023

**AUTORIZACIÓN No AS-2-379/2023**

**LUCIANO AGUILERA VÁZQUEZ**  
**DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO**  
**DE CIUDAD MADERO**  
**PRESENTE**

Con fundamento en el Reglamento Interior de Trabajo del Personal Docente de los Institutos Tecnológicos, en las Políticas Académicas Generales del Período Sabático y las bases de la Convocatoria correspondiente, el Tecnológico Nacional de México a través de la Comisión Central, ha revisado la solicitud del **Año Sabático** del **C. TOMÁS LOZANO RAMÍREZ** en el Programa para la Elaboración de Apuntes, Libros, Objetivos Educativos y Reactivos de Evaluación: bajo la modalidad: **B.2 Elaboración de Libro: Procesamiento y extrusión de polímeros**, se tiene a bien emitir el siguiente dictamen de:

#### **AUTORIZACIÓN**

Del programa presentado a partir del **01 de septiembre de 2023** hasta el **31 de agosto de 2024**, quedando su seguimiento bajo la responsabilidad de la Dirección a su cargo, debiendo recibir y evaluar por parte de la Academia correspondiente y de la Comisión Dictaminadora, el reporte intermedio y final de las actividades desarrolladas durante el ejercicio del periodo sabático autorizado al docente. Así mismo, se deberá remitir a la Secretaría Académica, de Investigación e Innovación a través de la Dirección de Docencia e Innovación Educativa del Tecnológico Nacional de México, la evaluación de dichos reportes que comprenderán la totalidad de lo establecido en la calendarización, que se encuentra en el expediente de la solicitud del docente; además de un ejemplar en físico y en electrónico (en formato PDF) del producto final comprometido.

  
**RAMÓN JIMÉNEZ LÓPEZ**  
**DIRECTOR GENERAL**

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL  
DE MÉXICO

**DIRECCIÓN GENERAL**

M00-PR-04-R08

Versión 4



Av. Universidad 1200, Col. Xoco, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México.  
Tel: (55) 3601-7500, Ext. 65050, e-mail: [direccion@tecnm.mx](mailto:direccion@tecnm.mx) [tecnm.mx](http://tecnm.mx)



2023  
**Francisco**  
**VILLA**

## **DEDICATORIA**

Dedico este libro primeramente a Dios por darme sabiduría para entender día a día los procesos de extrusión. Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por su autorización de año sabático para la realización del presente libro. A mi esposa e hijo por su paciencia durante la elaboración de este producto académico. A mi familia, colegas y amigos por sus palabras de apoyo para la realización de este documento. Lo dedico también a quienes sepan valorar su contenido, ya sea personas involucradas en Procesamiento y Extrusión de polímeros y a los que están en su formación profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, a Dios nuestro Creador del Universo por permitirme entender día a día los procesos de extrusión.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por haberme autorizado el período sabático para la realización de este libro.

Al Conahcyt por su apoyo de beca de Doctorado en el extranjero. En Ecole Polytechnique de Montreal, Canadá, conocí muchos Profesores expertos con el Procesamiento de Polímeros y estuvo a mi disposición la infraestructura de extrusores a escala de laboratorio e industrial para realizar mi Tesis de Doctorado sobre el modelamiento de la dispersión de refuerzos minerales a lo largo de un extrusor.

Al Doctor Juan Guillermo Martínez Colunga y al Doctor Francisco Javier Rodríguez González del Centro de Investigación en Química Aplicada (Saltillo, Coahuila) por su apoyo en la elaboración de tubos de polipropileno y en la discusión del tipo de ecuaciones reológicas del flujo de polímero fundido en ciertas partes del extrusor.

# ÍNDICE INTEGRAL

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| AGRADECIMIENTOS.....                                       | ii  |
| TABLA DE ABREVIACIONES .....                               | vi  |
| PREFACIO.....                                              | vii |
| CAPÍTULO I.....                                            | 1   |
| INTRODUCCIÓN.....                                          | 1   |
| 1.1 Historia de los polímeros.....                         | 1   |
| 1.2 ¿Qué es un polímero? .....                             | 3   |
| 1.2.1 Monómero .....                                       | 5   |
| 1.2.2 Unidad Repetitiva.....                               | 5   |
| 1.3 Síntesis de Polímeros.....                             | 6   |
| 1.3.1 Polimerización por Adición .....                     | 6   |
| 1.3.2 Polimerización por Condensación.....                 | 7   |
| 1.4 Materias primas de la industria de los plásticos ..... | 10  |
| 1.5 Peso molecular de un polímero .....                    | 13  |
| 1.6 Ramificaciones .....                                   | 16  |
| 1.7 Densidad .....                                         | 17  |
| 1.8 Clasificación de los polímeros.....                    | 18  |
| 1.9 Clasificación de los plásticos para su reciclado ..... | 20  |
| 1.10 Polímeros semi-cristalinos y polímeros amorfos .....  | 22  |
| 1.11 Transición vitrea .....                               | 24  |
| 1.12 Viscosidad de los polímeros .....                     | 26  |
| 1.12.1 Modelo de ley de potencia de viscosidad .....       | 27  |
| CAPÍTULO II.....                                           | 31  |
| TIPOS DE EXTRUSORES Y OTROS EQUIPOS DE MEZCLADO .....      | 31  |
| 2.1 Introducción.....                                      | 31  |
| 2.2 Tipos de Mezclado.....                                 | 31  |
| 2.3 Mezcladores por Lotes (tipo batch).....                | 32  |
| 2.4 Mezcladores Continuos.....                             | 35  |

|       |                                                                                          |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.1 | Mezclador Farrel .....                                                                   | 35 |
| 2.4.2 | Extrusor Monohusillo.....                                                                | 36 |
| 2.4.3 | Extrusor Reciprocante .....                                                              | 37 |
| 2.4.4 | Extrusor Doble Husillo.....                                                              | 37 |
| 2.5   | Componentes de Extrusores de Doble Husillo .....                                         | 38 |
| 2.5.1 | Tipos de elementos de Extrusores Doble Husillo Corrotativos .....                        | 39 |
| 2.6   | Principales Funciones de los Extrusores Doble-Husillo.....                               | 41 |
|       | Figura 2.11 Tipos de elementos de Mezclado: a) elementos para mezclado dispersivo, ..... | 43 |
|       | b) elementos para mezclado distributivo.....                                             | 43 |
|       | REFERENCIAS.....                                                                         | 46 |
|       | CAPÍTULO III.....                                                                        | 47 |
|       | EXTRUSIÓN MONOHUSILLO.....                                                               | 47 |
| 3.1   | Introducción.....                                                                        | 47 |
| 3.2   | Extrusor monohusillo .....                                                               | 47 |
| 3.3   | Principales elementos de los extrusores monohusillo .....                                | 49 |
| 3.3.1 | Husillo de Extrusión.....                                                                | 49 |
| 3.4   | Zonas funcionales del husillo .....                                                      | 52 |
| 3.4.1 | Zona de alimentación .....                                                               | 53 |
| 3.4.2 | Zona de plastificación .....                                                             | 53 |
| 3.4.3 | Zona de Bombeo .....                                                                     | 55 |
| 3.5   | Ecuaciones de flujo en la zona de bombeo.....                                            | 57 |
| 3.5.1 | Ecuación de flujo para un fluido obedeciendo la ley de potencia.....                     | 60 |
| 3.6   | Elementos de mezclado.....                                                               | 60 |
| 3.7   | Ejemplos prácticos (casos de estudio) .....                                              | 65 |
|       | REFERENCIAS.....                                                                         | 70 |
|       | CAPÍTULO IV .....                                                                        | 71 |
|       | EXTRUSIÓN DE PERFILES .....                                                              | 71 |
| 4.1   | Introducción .....                                                                       | 71 |
| 4.2   | Línea de producción de perfiles .....                                                    | 71 |
| 4.3   | Extrusores .....                                                                         | 72 |
| 4.4   | Conjunto Cabezal-Dado.....                                                               | 72 |
| 4.4.1 | Tuberías y tubos.....                                                                    | 72 |

|                                             |                                                                           |     |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.2                                       | Tipo de dados para perfiles .....                                         | 73  |
| 4.5                                         | Enfriamiento .....                                                        | 77  |
| 4.5.1                                       | Calibración de los tubos .....                                            | 78  |
| 4.6                                         | Jalado/Estirado .....                                                     | 79  |
| 4.7                                         | Recepción De Los Perfiles Terminados .....                                | 80  |
| 4.8                                         | Materiales .....                                                          | 80  |
| 4.8.1                                       | PVC Flexible .....                                                        | 80  |
| 4.8.2                                       | PVC Rígido .....                                                          | 81  |
| 4.8.3                                       | Poliolefinas .....                                                        | 81  |
| 4.9                                         | Diseño de dados .....                                                     | 82  |
| 4.9.1                                       | Ecuaciones de Flujo .....                                                 | 83  |
| CAPÍTULO V .....                            |                                                                           | 89  |
| RECUBRIMIENTO DE CABLES Y CONDUCTORES ..... |                                                                           | 89  |
| 5.1                                         | Introducción .....                                                        | 89  |
| 5.2                                         | Línea de producción .....                                                 | 89  |
| 5.3                                         | Componentes para el aislamiento de cables y conductores .....             | 91  |
| 5.3.1                                       | Extrusor .....                                                            | 91  |
| 5.3.2                                       | Dados de aislamiento (recubrimiento) .....                                | 91  |
| 5.3.3                                       | Dados multicapa .....                                                     | 92  |
| 5.4                                         | MATERIALES .....                                                          | 93  |
| 5.4.1                                       | Polietileno de Baja Densidad .....                                        | 93  |
| 5.4.2                                       | Polietileno de Alta Densidad .....                                        | 94  |
| 5.4.3                                       | Policloruro de Vinilo .....                                               | 94  |
| 5.4.4                                       | Resinas Fluoradas: .....                                                  | 95  |
| 5.5                                         | Problemas tecnológicos encontrados en el aislamiento de conductores ..... | 95  |
| 5.6                                         | Zonas principales de un dado de aislamiento de conductores .....          | 96  |
| 5.7                                         | Ecuaciones de movimiento en la zona axisimétrica .....                    | 98  |
| 5.8                                         | Ecuaciones para un fluido no newtoniano en la zona axisimétrica .....     | 101 |
| 5.9                                         | Ejemplos prácticos (casos de estudio) .....                               | 106 |
| REFERENCIAS .....                           |                                                                           | 111 |
| CAPÍTULO VI .....                           |                                                                           | 112 |
| EXTRUSIÓN SOPLADO DE PELÍCULAS .....        |                                                                           | 112 |

|       |                                                                             |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1   | Introducción .....                                                          | 112 |
| 6.2   | MÉTODOS DE FABRICACIÓN .....                                                | 112 |
| 6.3.  | COMPONENTES DE UNA LINEA DE EXTRUSION SOPLADO .....                         | 115 |
| 6.3.1 | Extrusor .....                                                              | 116 |
| 6.3.2 | Cabezal de soplado .....                                                    | 116 |
| 6.3.3 | Enfriamiento .....                                                          | 117 |
| 6.3.4 | Estiramiento .....                                                          | 118 |
| 6.3.5 | Enrollado/enbobinado .....                                                  | 118 |
| 6.3.6 | Tratamiento de superficie .....                                             | 118 |
| 6.4   | Tipo de dados.....                                                          | 119 |
| 6.5   | Datos de operación .....                                                    | 124 |
| 6.6   | Fabricación industrial .....                                                | 126 |
| 6.7   | Flujo en un dado anular.....                                                | 126 |
| 6.8   | Ejemplos prácticos (casos de estudio) .....                                 | 129 |
|       | REFERENCIAS.....                                                            | 131 |
|       | CAPÍTULO VII .....                                                          | 132 |
| 7.1   | Introducción.....                                                           | 132 |
| 7.2   | Componentes en la fabricación.....                                          | 132 |
| 7.2.1 | Extrusores.....                                                             | 132 |
| 7.2.2 | Recepción del extruido.....                                                 | 132 |
| 7.2.3 | Cabezal- dado plano .....                                                   | 133 |
| 7.3   | Flujo en un dado plano.....                                                 | 135 |
| 7.4   | Extrusión de cintas .....                                                   | 140 |
| 7.4.1 | Detalles técnicos importantes para la fabricación de cintas plásticas ..... | 142 |
| 7.5   | Ejemplos prácticos (casos de estudio) .....                                 | 143 |
|       | REFERENCIAS.....                                                            | 145 |
|       | EPILOGO .....                                                               | 146 |
|       | ANEXO 1 .....                                                               | 148 |
|       | ANEXO 2. ....                                                               | 155 |

## TABLA DE ABREVIACIONES

|              |       |                                              |
|--------------|-------|----------------------------------------------|
| <b>ABS</b>   | ..... | Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno             |
| <b>HDPE</b>  | ..... | Polietileno De Alta Densidad                 |
| <b>LDPE</b>  | ..... | Polietileno De Baja Densidad                 |
| <b>LLDPE</b> | ..... | Polietileno Lineal De Baja Densidad          |
| <b>MF</b>    | ..... | Melamina-Formaldehído                        |
| <b>NR</b>    | ..... | Caucho Natural (Elastómero De Isopreno)      |
| <b>PA 66</b> | ..... | Nylon 6,6                                    |
| <b>PAN</b>   | ..... | Poliacrilonitrilo                            |
| <b>PB</b>    | ..... | Polibutadieno                                |
| <b>PDMS</b>  | ..... | Polidimetilsiloxano                          |
| <b>PE</b>    | ..... | Polietileno                                  |
| <b>PEAD</b>  | ..... | Polietileno De Alta Densidad                 |
| <b>PEBD</b>  | ..... | Polietileno De Baja Densidad                 |
| <b>PET</b>   | ..... | Polietileno tereftalato                      |
| <b>PF</b>    | ..... | Fenol-Formaldehído                           |
| <b>PMMA</b>  | ..... | Poli (Metacrilato De Metilo)                 |
| <b>POM</b>   | ..... | Polioximetileno, Poliformaldehído, Poliactal |
| <b>PP</b>    | ..... | Polipropileno                                |
| <b>PS</b>    | ..... | Poliestireno                                 |
| <b>PTFE</b>  | ..... | Poli Tetrafluoroetileno                      |
| <b>PVA</b>   | ..... | Acetato De Polivinilo                        |
| <b>PVAL</b>  | ..... | Alcohol Polivinílico                         |
| <b>PVB</b>   | ..... | Polivinil Butiral                            |
| <b>PVC</b>   | ..... | Policloruro de Vinilo                        |
| <b>SAN</b>   | ..... | Copolimero De Estireno/Acrilonitrilo         |
| <b>SBR</b>   | ..... | Elastómero De Estireno-Butadieno             |
| <b>UF</b>    | ..... | Urea-Formaldehído                            |

## **PREFACIO**

Debido a que el 70% de la elaboración mundial de productos plásticos existentes se realiza por el Proceso de Extrusión, muestra la importancia de enfocarse en este Tema y el interés de realizar el presente libro. Las Industrias y Empresas del plástico utilizan este Proceso para la elaboración de tubería, perfiles de múltiples geometrías, película plana, película soplada (monocapa y multicapa), aislamiento de cable y las industrias que se concentran en la síntesis de polímeros requieren extrusores para forzar sus productos a través de un dado de orificios y obtener sus gránulos para poder envasarlos y transportarlos

El libro consta de 8 capítulos, donde la secuencia de estos es muy importante. En el Capítulo 1 aborda la Introducción del Libro considerando los principios generales de los polímeros, el Capítulo 2 “Tipos de extrusores y otros equipos de mezclado”, fue desarrollado debido a que normalmente los polímeros son formulados o reforzados con varios tipos de partículas y los extrusores también se consideran mezcladores en su última zona, sobre todo los extrusores de doblehusillo para incorporar partículas. En este capítulo 2 se describen los tipos mezclado y los tipos de mezcladores para incorporar cargas/refuerzos en polímeros.

El Capítulo 3 “Extrusión Monohusillo” tiene como objetivo general analizar, comprender y calcular el proceso de flujo en un extrusor monohusillo utilizando herramientas analíticas, para mejorar el diseño del tornillo o simplemente para mejorar las condiciones de procesamiento. En este Capítulo se incluyen Ejemplos Prácticos (Cálculos).

El Capítulo 4 “Extrusión de perfiles”, donde el sistema de husillo-barril-dado es el corazón del proceso, se estudian perfiles huecos y sólidos y el enfoque teórico para el cálculo de los flujos y en los correspondientes dados de producción.

En el Capítulo 5, se estudiará el Aislamiento de Cable, En el Capítulo 6 la Extrusión de Película Soplada, en el Capítulo 7 la Extrusión de Cintas/Película Plana y Finalmente en el Capítulo 8 se presenta el Diseño de un extrusor monohusillo para uso en laboratorio.

Este libro va dirigido a estudiantes de Ingeniería (Química, Ambiental, Industrial, Mecánica) y a Técnicos e Ingenieros involucrados con el Proceso de Extrusión

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Historia de los polímeros

Existe una gran diversidad de polímeros naturales como la celulosa, la seda, el caucho, entre otros, han sido empleados por el hombre para fabricar productos y satisfacer necesidades básicas desde hace siglos, hasta que a finales del siglo XIX el hombre empieza a fabricar polímeros sintéticos. El primer polímero sintético fue el celuloide creado por Hyatt en 1868 para la producción de bolas de billar después de una escasez de marfil. El celuloide era producido por la esterificación de la celulosa con ácido nítrico, seguido de un tratamiento con alcanfor. El celuloide fue utilizado enseguida para la fabricación de las primeras películas fotográficas, pegamentos, lacas, etc. El Doctor Baekeland desarrolla en 1909 el primer polímero completamente sintético “fenol formaldehído”. Este polímero, conocido con el nombre de baquelita, fue utilizado para la fabricación de teléfonos a gran escala.

Hyatt y Baekeland recurrieron a técnicas de prueba y error para la fabricación de sus polímeros, sin embargo, desconocían el concepto de “macromolécula”. La primera persona en dar la definición de un polímero fue Hermann Straudinger en 1924, que reconoció el vínculo entre macromoléculas y polímeros lineales, a partir de este momento la química de polimerización llegó a ser conocida. En la Tabla 1 se muestran algunos aspectos relevantes de la historia de los polímeros industriales.

En este capítulo se estudiará la clasificación de los polímeros (termoplásticos, termofijos y hules). En una breve descripción los polímeros termoplásticos tienen la propiedad de poder procesarse varias veces (fundirse y plastificarse), debido a que sus cadenas no están unidas químicamente entre ellas, a diferencia de los termofijos en los que sus cadenas si se unen químicamente, no permitiéndoles la propiedad de (fundirse/plastificar) por lo que al pasar por un proceso de calentamiento estos se degradan térmicamente. En el caso de los hules, estos tienen la propiedad de estirarse y retomar su forma inicial debido a que en sus unidades repetitivas hay dobles enlaces.

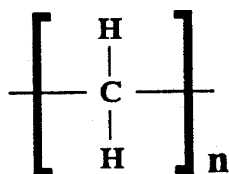
**Tabla 1.1** Desarrollo histórico de los polímeros.

| Polímero                  | Designación                        | Inventor                             | Año de lanzamiento. | Primera empresa productora | País de origen |
|---------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------|
| Nitrato de celulosa       | Celuloide                          | Hermanos Hyatt                       | 1870                | Albany Dental Plate        | USA            |
| Acetato de celulosa       |                                    |                                      | 1905                | Bayer                      | Alemania       |
| Bakelita                  | Bakelita                           | Baekeland                            | 1909                | General Bakelite           | USA            |
| Celulosa regenerada       | Celofán                            | Brandenberger                        | 1915                | La Cellophane              | Francia        |
| Polimetacrilato de metilo | Plexiglás                          | Wulff                                | 1927                | Rohm and Hass              | Alemania       |
| PS (poliestireno)         |                                    | Staudinger                           | 1930                | I.G. Farben                | Alemania       |
| Polivinilo                |                                    | Ostromyslenski<br>Klatte y Zacharias | 1931                | I.G. Farben                | Alemania       |
| Polietileno               | Baja Densidad y Alta Presión Nylon | Fawcett y Gibson                     | 1937                | I.C.I                      | Inglaterra     |
| Poliamida-6-              |                                    | Carothers                            | 1941                | Du Pont                    | Alemania       |
| Silicón                   |                                    |                                      | 1941                | Dow Corning                | USA            |
| Poliéster-insaturado      | (resinas)                          | Foster                               | 1942                | Pittsburg Glass            | USA            |
| Politetrafluoroetileno    | Teflón                             |                                      | 1943                | Du Pont                    | USA            |
| ABS                       |                                    | Daly, Calvert                        | 1946                | Marbon                     | USA            |
| Poliamida-11-             |                                    | Zelner y Genas                       | 1946                | Organico                   | Francia        |
| Epóxidos                  | Araldite                           | Castan                               | 1947                | Ciba                       | Suiza          |
| Poliuretano               | Moltopren                          | Otto Bayer                           | 1950                | Bayer                      | Alemania       |
| Poliestireno expandible   | Styropor                           |                                      | 1951                | BASF                       | Alemania       |
| Polyacetal                | Delrin                             | Mac Donald                           | 1953                | Du Pont                    | USA            |
| PP (polipropileno)        |                                    | Natta                                | 1957                | Montecatini                | Italia         |
| Policarbonato             | Makrolon                           | Schnell                              | 1957                | Bayer                      | Alemania       |
| Polifenileno              | Noryl                              | Hay                                  | 1964                | General Electric           | USA            |
| Polimetil-penteno         | TPX                                |                                      | 1965                | I.C.I                      | Inglaterra     |
| Ionómero                  | Surlyn                             |                                      | 1965                | Du Pont                    | USA            |
| Poli-imida                | Kinel-Vespel                       |                                      | 1970                | Rhone-Poulenc              | Francia        |
| Polifenilen-sulfona       | Rhyton                             |                                      | 1970                | Philips Petroleum          | USA            |

**Fuente:** Jeffrey, 1997.

## 1.2¿Qué es un polímero?

Un polímero es una molécula gigante formada por el ensamblado de unidades repetitivas idénticas del monómero utilizado para su síntesis. Las propiedades físicas de los polímeros están relacionadas a la longitud de las cadenas y por consecuencia a su peso y estructura molecular. Ejemplo de la cadena de carbono:

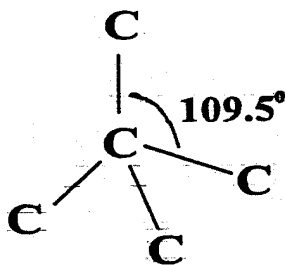


**Tabla 1.2** El número de átomos de carbono influye sobre el estado de la materia.

| No. de átomos de carbono | Nombre                             | Estado          |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 1                        | Metano                             | Gas             |
| 2                        | Etano                              | Gas             |
| 3                        | Propano                            | Gas             |
| 7                        | Heptano                            | Líquido         |
| 12-14                    | Aceite                             | Líquido viscoso |
| 26-50                    | Parafina                           | Pasta           |
| 1000                     | Polietileno de bajo peso molecular | Sólido flexible |
| 3000-3500                | Polietileno de alto peso molecular | Sólido rígido   |

**Fuente:** Meira y Gugliotta, 2019.

El elemento atómico que se encuentra más frecuentemente en la estructura de los polímeros orgánicos es el carbono. El carbono tiene una valencia de (4) y forma una estructura piramidal (tetraedro).



Enlace simple: longitud del enlace =  $1.54 \times 10^{-10} \text{m}$

Energía de enlace = 349 KJ/mol

Enlace doble: longitud del enlace =  $1.32 \times 10^{-10} \text{m}$

Energía de enlaces = 607 KJ/mol

Enlace triple: longitud del enlace =  $1.20 \times 10^{-10} \text{m}$

Energía de los enlaces = 828 KJ/mol (Moeller, 2024).

El enlace simple permite la rotación, lo cual no es posible con los enlaces dobles o triples. Esta flexibilidad modifica las propiedades mecánicas y térmicas del polímero producido.

Las moléculas poliméricas están constituidas de carbono, hidrógeno, sin embargo hay algunos otros elementos como el O, N, Cl, S, F, Br, Si, que son utilizados.

En una molécula polimérica se presentan dos tipos de enlaces químicos:

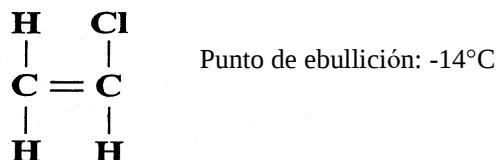
- 1) Enlaces primarios, estos unen a los átomos formando una cadena polimérica
- 2) Enlaces secundarios, que provocan una atracción entre las moléculas

Los enlaces primarios son esencialmente enlaces covalentes (enlaces donde se comparten electrones). Los enlaces secundarios generalmente son los siguientes:

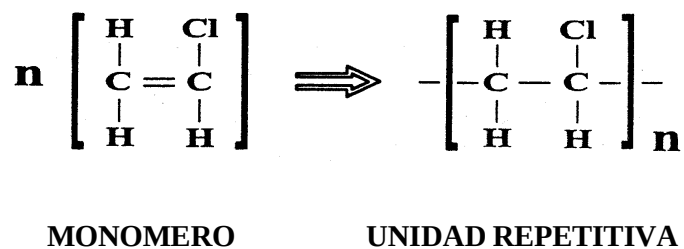
- A) Se forman Fuerzas de Van der Waals entre todas las moléculas. Estos son los mas débiles (2.1-8.4 kJ/mol)
- B) Las interacciones dipolo que se producen cuando las moléculas polares están presentes (6.3-12.6 KJ/mol)
- C) Los puentes de hidrogeno (puentes de hidrogeno), implican elementos muy electronegativos como el oxígeno, nitrógeno o flúor (12.6-29.3 KJ/mol).

### 1.2.1 Monómero

Un monómero es una molécula pequeña que se utiliza para fabricación de un polímero. Para el caso del PVC, por ejemplo, la molécula utilizada es el cloruro de vinilo.



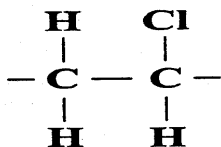
El PVC es fabricado a partir del cloruro de vinilo por un proceso de polimerización que puede ser representado esquemáticamente por:



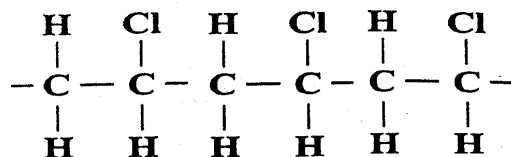
Notar que la unidad repetitiva y monómero no son idénticos debido a los cambios efectuados durante la polimerización.

### 1.2.2 Unidad Repetitiva

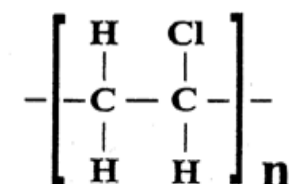
Una unidad repetitiva es un grupo de átomos teniendo un arreglo espacial particular y unidas por enlaces covalentes. Por ejemplo, el Policloruro de vinilo (PVC) posee la siguiente unidad repetitiva:



Una molécula de PVC posee una serie de unidades repetitivas enlazadas por enlaces covalentes:



Se utiliza generalmente la notación abreviada siguiente (para representar el no. de unidades repetitivas)



n: número de unidades repetitivas de la molécula polimérica (grado de polimerización)

El grado de polimerización se define como el número de unidades repetitivas que contiene la cadena polimérica.

Una molécula con  $n > 100$  es considerada como un polímero. Los polímeros comerciales contienen mucho más de 100 unidades repetitivas o un grado de polimerización mayor a 100.

### 1.3 Síntesis de Polímeros

Existe dos tipos de reacciones que permiten fabricar industrialmente los polímeros

#### 1.3.1 Polimerización por Adición

La polimerización por adición tiene dos características:

A) No hay rompimiento de moléculas durante la polimerización, entonces la unidad estructural está formada de los mismos elementos que el monómero.

B) La reacción de polimerización requiere de la abertura de un doble enlace.

La polimerización se efectúa por la abertura del doble enlace, bajo la acción combinada de presión y de calor, en presencia de un catalizador y yuxtaposición de los monómeros por los enlaces así liberados.

Por ejemplo, el etileno:  $C = C$

Dará,  $-C-C-$

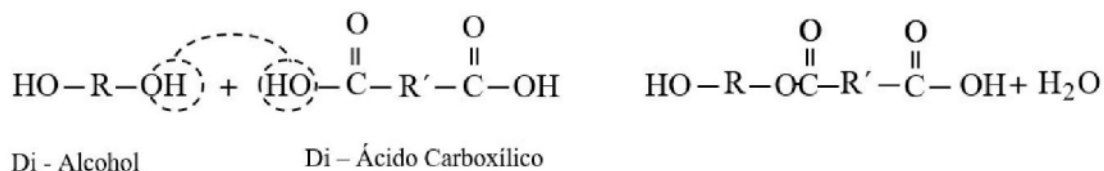
Después:  $-[C-C-C-C-C-C]-n$

El grado de polimerización del polímero dependerá del número de unidades repetitivas enlazadas entre ellas.

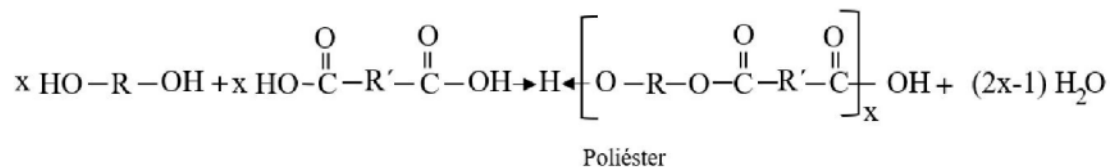
### 1.3.2 Polimerización por Condensación

La policondensación es una reacción en la que una pequeña molécula (usualmente del agua) es formada al mismo tiempo que el polímero. Normalmente los polímeros de condensación requieren 2 monómeros (2 moléculas pequeñas).

Como ejemplo, la policondensación de un diol y de un diácido que forma un poliéster:



La molécula así formada posee todavía dos grupos funcionales y puede reaccionar nuevamente con un di- alcohol o un diácido. Después de cada reacción, la molécula tiene dos grupos funcionales permitiendo a la molécula continuar creciendo.



Los plásticos basados en formaldehído y los epoxis son un ejemplo de formación de polímeros por condensación que en su mayoría forman polímeros termoestables.

*En el Anexo 1 se da más a detalle los procesos de polimerización.*

**Tabla 1.3** Polímeros Obtenidos por Polimerización por Adición.

| Polímero                             | Fórmula                                                                                                                  | Abreviación | Monómero Utilizado    | Fórmula                                                                                                               |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Polietileno                          | $-\text{[CH}_2\text{-CH}_2\text{]}_n$                                                                                    | PE          | Etileno               | $\text{CH}_2=\text{CH}_2$                                                                                             |
| Polipropileno                        | $-\text{[CH}_2\text{-CH]}_n$<br> <br>$\text{CH}_3$                                                                       | PP          | Propileno             | $\text{CH}_2=\text{CH}$<br> <br>$\text{CH}_3$                                                                         |
| Policloruro de vinilo                | $-\text{[CH}_2\text{-CH]}_n$<br> <br>$\text{Cl}$                                                                         | PVC         | Cloruro de Vinilo     | $\text{CH}_2=\text{CH}$<br> <br>$\text{Cl}$                                                                           |
| Poliestireno                         | $-\text{[CH}_2\text{-CH]}_n$<br> <br> | PS          | Estireno              | $\text{CH}_2=\text{CH}$<br> <br> |
| Poliacrilonitrilo                    | $-\text{[CH}_2\text{-CH]}_n$<br> <br>$\text{C}\equiv\text{N}$                                                            | PAN         | Acrilonitrilo         | $\text{CH}_2=\text{CH}$<br> <br>$\text{C}\equiv\text{N}$                                                              |
| Politetrafluoroetileno (Teflón)      | $-\text{[CF}_2\text{-CF]}_n$                                                                                             | PTFE        | Tetrafluoroetileno    | $\text{CF}_2=\text{CF}_2$                                                                                             |
| Polimetacrilato de metilo (acrílico) | $\text{[CH}_2\text{-C]}_n$<br> <br>$\text{CH}_3$<br> <br>$\text{C}-\text{OCH}_3$<br>  <br>$\text{O}$                     | PMMA        | Metacrilato de metilo | $\text{CH}_2=\text{C}$<br> <br>$\text{CH}_3$<br> <br>$\text{C}-\text{OCH}_3$<br>  <br>$\text{O}$                      |

**Fuente:** Rosen, 199

**Tabla 1.4** Unidades Repetitivas de Polímeros Obtenidos por Condensación.

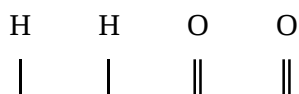
| Polímero                                  | Unidad Repetitiva | Aplicaciones                                                                                                             |
|-------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Poliamida<br/>(nylon) (PA)</b>         |                   | Cojinetes, engranes, fibras, cuerdas y sogas, componentes automotrices, componentes eléctricos.                          |
| <b>Poliéster<br/>(PET)</b>                |                   | Fibras, película fotográfica, cinta para grabación, bolsas para hervir, recipientes para bebidas.                        |
| <b>Policarbonato<br/>(PC)</b>             |                   | Carcasas eléctricas y aparatos domésticos, componentes automotrices, cascos para fútbol americano, botellas retornables. |
| <b>Poliimida (PI)</b>                     |                   | Adhesivos, tableros de circuitos, fibras para el transbordador espacial.                                                 |
| <b>Poliéter<br/>eterketona<br/>(PEEK)</b> |                   | Aislamiento eléctrico y recubrimientos de alta temperatura.                                                              |
| <b>Poliéter<br/>Sulfona</b>               |                   | Componentes eléctricos, cafeteras, secadoras de pelo, componentes para horno de microondas.                              |

**Fuente:** Askeland y Phulé, 2004.

**Polímeros donde se necesitan 2 reactivos principales (Polimerización por etapas o condensación):**

Nylon 6,6 es el más importante de la familia de los nylons.

Reacción de hexametildiamina y ácido adípico



Fusión: 250 – 266 °C

Otros nylons importantes son obtenidos similarmente:

Ejemplos:

Nylon 6,9: Reacción entre la hexametildiamina y ác. acelaico (9 Carbonos)

Nylon 6,10: Reacción entre la hexametildiamina y ác. sebácico (10 Carbonos)

Nylon 6,12: Reacción entre la hexametildiamina y ác. dodecanedioico (12 Carbonos)

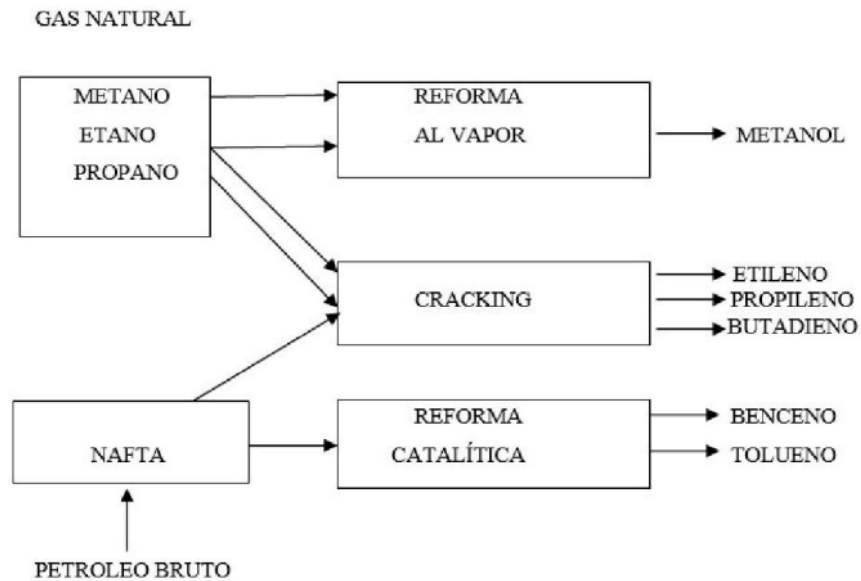
Aplicaciones:

Piezas mecánicas resistentes a altas temperaturas, hidrocarburos y disolventes. En los automóviles incluyen velocímetros, limpiaparabrisas.

#### **1.4 Materias primas de la industria de los plásticos**

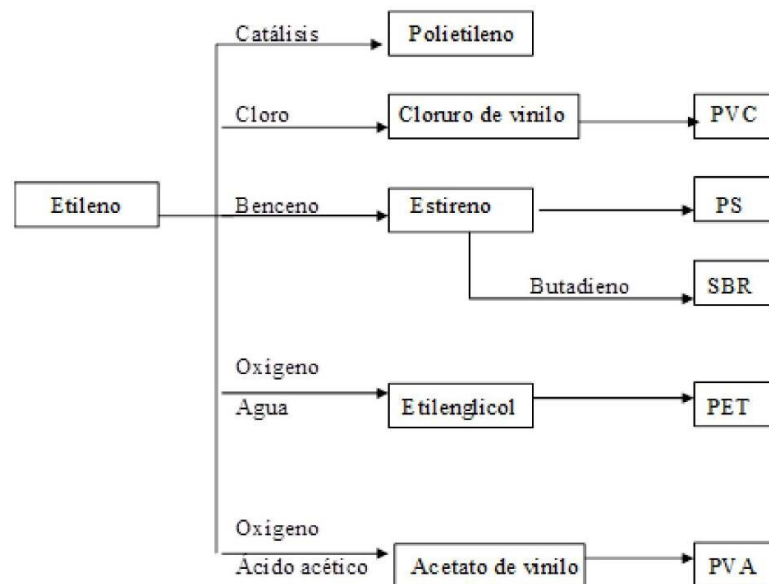
Actualmente los materiales plásticos son esencialmente productos a partir del petróleo y del gas natural. El productor de plásticos obtiene nafta de las refinerías de petróleo.

Los diferentes monómeros son obtenidos a partir de los procesos siguientes:



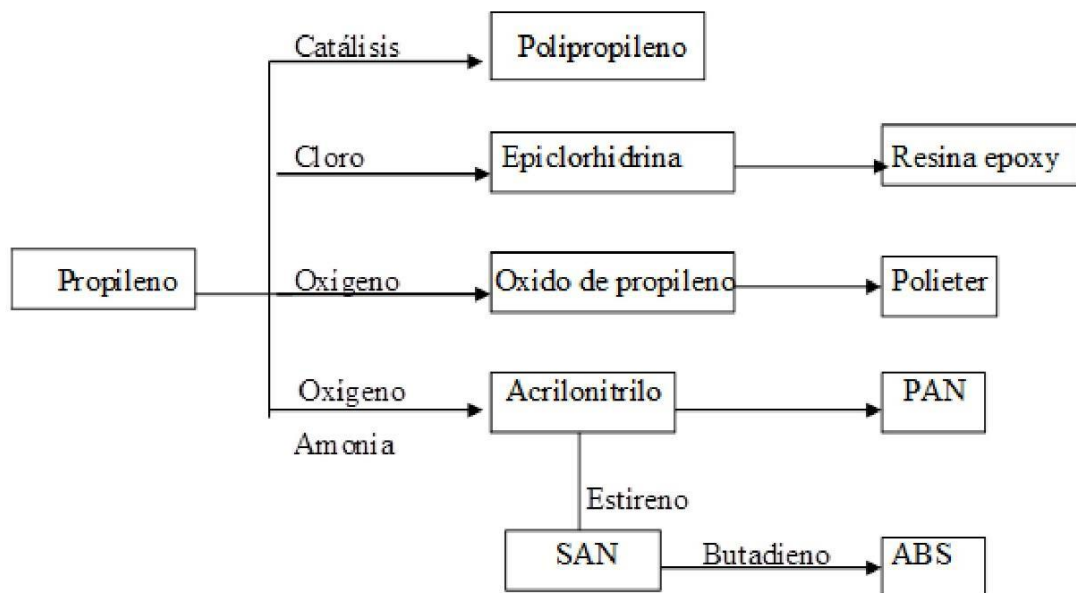
**Figura 1.1** Monómeros obtenidos a partir del Gas Natural y del Petróleo Crudo [Smith, 2023].

Los diferentes monómeros y polímeros producidos a partir del etileno son:



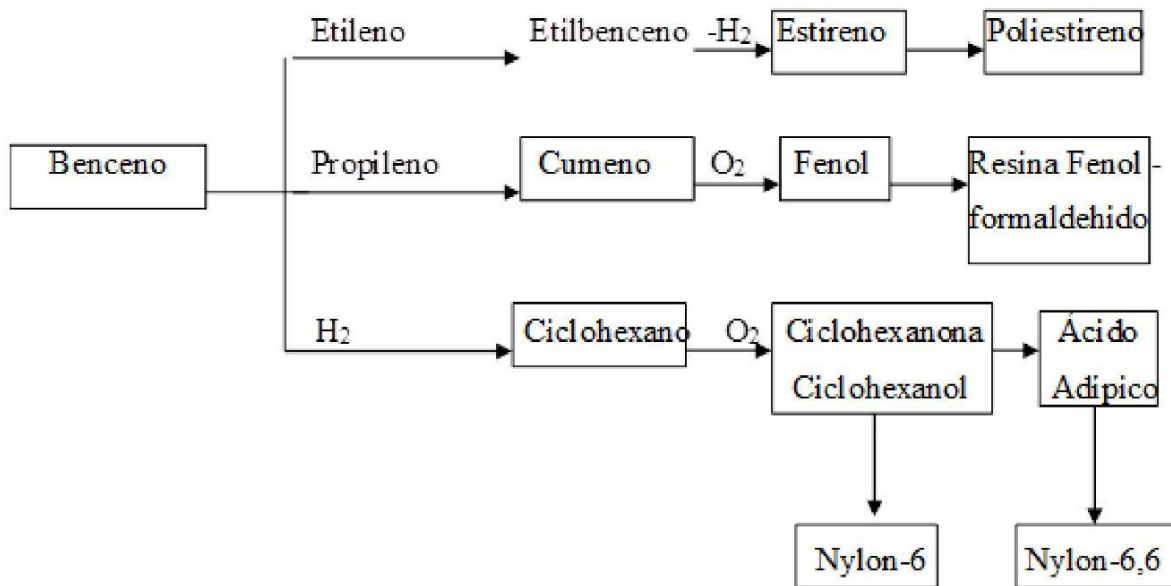
**Figura 1.2** Monómeros y polímeros producidos a partir del etileno [Meira y Gugliotta, 2019]

Los diferentes monómeros y polímeros producidos a partir del propileno son:



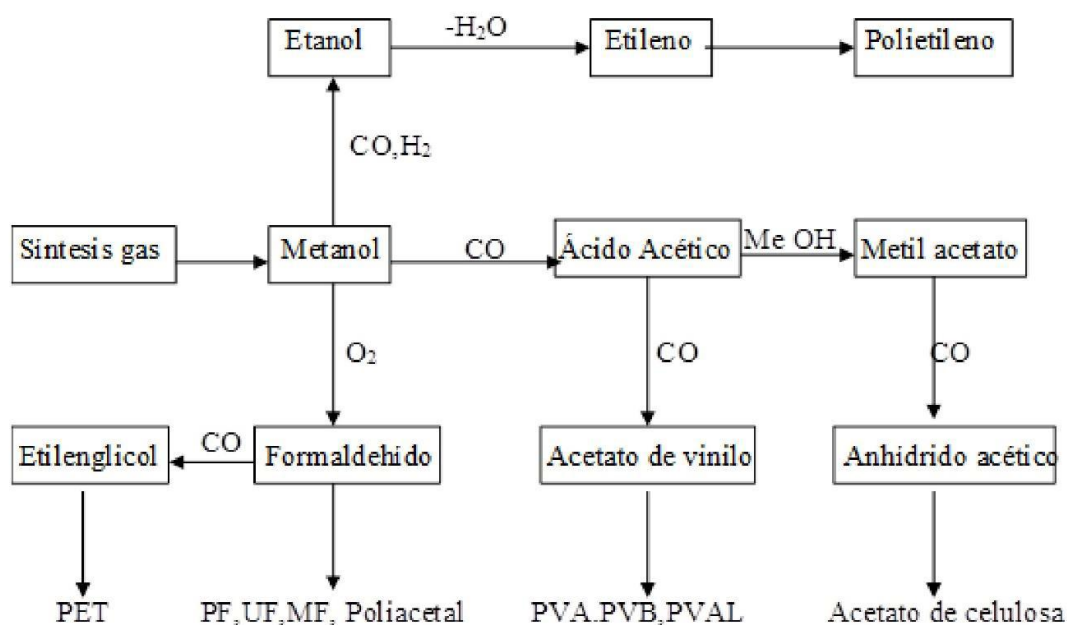
**Figura 1.3** Monómeros y polímeros producidos a partir del propileno [Smith, 2023].

Los diferentes monómeros y polímeros producidos a partir del benceno son:



**Figura 1.4** Monómeros y polímeros producidos a partir del benceno (Meira y Gugliotta, 2019).

Los diferentes monómeros y polímeros producidos a partir del metanol son:



**Figura 1.5** Monómeros y polímeros producidos a partir del metanol (Meira y Gugliotta, 2019).

## 1.5 Peso molecular de un polímero

Las propiedades mecánicas, la transición de fase, la fusión de zonas cristalinas, las propiedades reológicas por ejemplo, son fuertemente influenciadas por la longitud de las cadenas.

El peso molecular de los polímeros sintéticos es mucho menos uniforme que el de los productos químicos convencionales. Durante el proceso de polimerización, el crecimiento de las cadenas y el mecanismo de terminación ocasiona la producción de moléculas idénticas, pero de tamaños diferentes. En consecuencia, un polímero posee una distribución de peso molecular y **no un peso molecular único**. [Rosen, 1993]. Es muy importante de poder controlar la distribución de pesos moleculares, así como los pesos moleculares promedios.

El concepto de peso molecular promedio es diferente al de las pequeñas moléculas bien conocidas. En el caso de un compuesto puro que tenga un peso molecular pequeño, el peso molecular se expresa como:

$$M = W / N$$

W = peso total de muestra

N = número de moles en la muestra

### **Distribución de Pesos Moleculares (Mn, Mw)**

Los polímeros poseen una distribución de peso molecular (polidispersa) y la relación entre el peso molecular promedio en peso/peso molecular promedio en número es mayor a 1.

De manera general, el peso molecular en número y en peso se expresan como sigue [Rosen, 1993]:

$M_n$  = peso molecular promedio en número

$M_n = \frac{\text{Peso total de todas las moléculas}}{\text{\# total de moléculas}}$

$$M_n = \frac{\sum n_i M_i}{\sum n_i} = \left( \frac{n_i}{\sum n_i} \right) M_i = \sum x_i M_i$$

$x_i$  = fracción mol (con un peso molecular  $M_i$ )

$M_w$  : peso molecular promedio en peso

$M_w = \frac{\text{peso de todas las moléculas multiplicada por su peso molecular}}{\text{Peso total de todas las moléculas}}$

Peso total de todas las moléculas

$$M_w = \frac{\sum n_i M_i M_i}{\sum n_i M_i} = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i} = \sum \left( \frac{n_i M_i}{\sum n_i M_i} \right) M_i = \sum w_i M_i$$

$w_i$  : fracción masa o peso de moléculas con un peso molecular  $M_i$

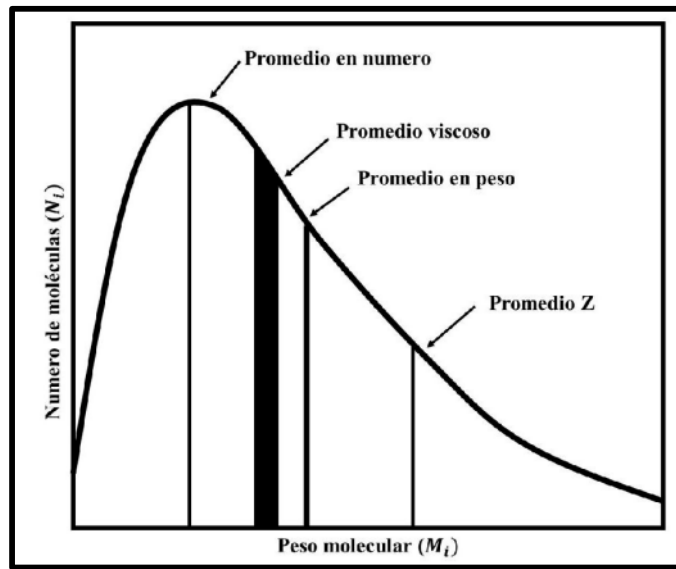
La relación  $M_w/M_n$  es llamada “polidispersidad” y caracteriza una distribución más o menos grande de pesos moleculares. Cuando esta razón es igual a 1, la muestra es monodispersa (todas las moléculas tienen el mismo tamaño). La polidispersidad varía de 2 a 30 para los polímeros industriales.

Se ha visto precedentemente que los pesos moleculares promedios se calculan a partir de los promedios aritméticos, se pueden obtener los mismos resultados al utilizar los momentos de la curva de distribución. Por definición, la razón del primer momento y del momento cero de una distribución representa un promedio aritmético. En la Figura 1.6, se presentan la curva de distribución de pesos moleculares promedios.

Si se aplica la razón de momentos de orden superior, se obtiene [Rosen, 1993]:

$$M_w = \frac{\sum n_i M_i^2}{\sum n_i M_i}; \quad M_v = \left( \frac{\sum n_i M_i^{a+1}}{\sum n_i M_i} \right)^{\frac{1}{a}}$$

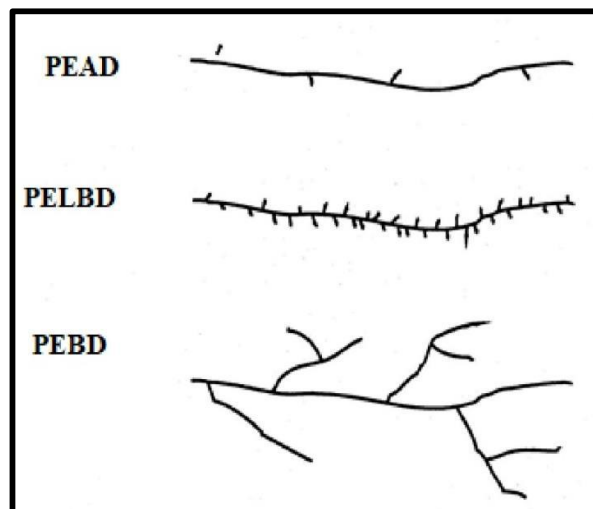
Donde  $M_v$  es el, peso molecular promedio viscoso



**Figura 1.6.** Curva de distribución de pesos moleculares promedio [Rosen, 1993]

## 1.6 Ramificaciones

En ciertos casos, los métodos industriales de síntesis no conducen a polímeros rigurosamente lineales. Se observa la formación de ramificaciones cortas o largas. Ejemplo clásico: polietileno de baja densidad (Figura 1.7).



**Figura 1.7** Ramificaciones en polietilenos de baja densidad (Rosen, 1993).

En general hay dos tipos de polietileno, el de baja densidad (LDPE) y alta densidad (HDPE). El de baja densidad tiene una estructura de cadena ramificada y a escala comercial fue producido en Inglaterra en 1939. El de alta densidad tiene una estructura con ramificaciones muy pequeñas en la cadena principal, se comercializó por primera vez en 1956 empleando catalizadores especiales. Se innovó un nuevo proceso para la producción de polietileno alrededor de 1976, que se describe como un polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) (Smith, 2023).

En la tabla 1.5 se presentan las propiedades de los tres polietilenos (densidad, resistencia a la tensión, porcentaje de cristalinidad y porcentaje de elongación).

**Tabla 1.5** Algunas propiedades de polietileno de baja y alta densidad.

| <b>Propiedad</b>                    | <b>Polietileno de baja densidad (LDPE)</b> | <b>Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)</b> | <b>Polietileno de alta densidad (HDPE)</b> |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> )       | 0.92 - 0.93                                | 0.922 - 0.926                                      | 0.95 - 0.96                                |
| Resistencia a la tensión (1000 psi) | 0.9 - 2.5                                  | 1.8 - 2.9                                          | 2.9 - 5.4                                  |
| %Elongación                         | 550 – 600                                  | 600 - 800                                          | 20 - 120                                   |
| %Cristalinidad                      | 65                                         | ...                                                | 95                                         |

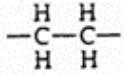
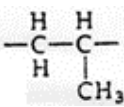
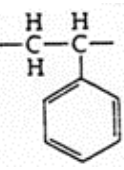
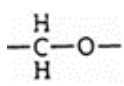
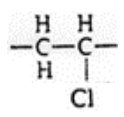
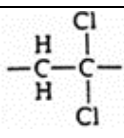
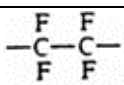
**Fuente:** Smith, 2023.

## 1.7 Densidad

La densidad está directamente relacionada a la estructura química de los polímeros. En la Tabla 1.6, se reportan las densidades de varios polímeros.

Los polímeros constituidos principalmente por carbono e hidrógeno tienen una densidad cerca de "1", tales como el polietileno, polipropileno y poliestireno. Los átomos de oxígeno, flúor, cloro y bromo son átomos densos y hacen que aumenten la densidad de los polímeros.

**Tabla 1.6.** Densidad de polímeros.

| Polímero                  | Estructura                                                                          | Gravedad Especifica. |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Polietileno               |    | 0.92-0.96            |
| Polipropileno             |    | 0.9                  |
| Poliestireno              |    | 1.05                 |
| Acetal                    |    | 1.4                  |
| Cloruro de polivinilo     |   | 1.4                  |
| Cloruro de polivinilideno |  | 1.7                  |
| Politetrafluoroetileno    |  | 2.2                  |

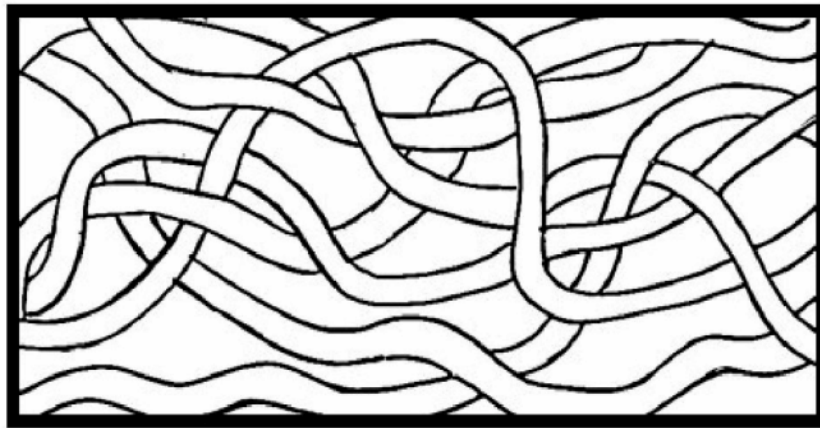
Fuente: Smith, 2023.

## 1.8 Clasificación de los polímeros

Los polímeros se pueden clasificar en grandes rasgos en termoplásticos, termofijos o termoestables y hules.

### Termoplásticos

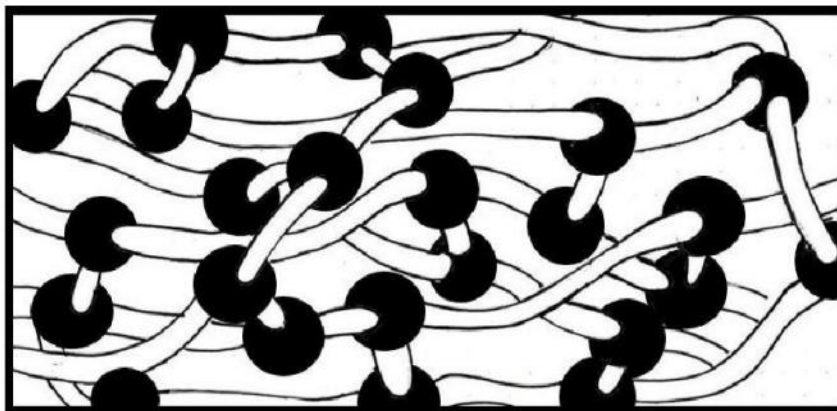
Tienen la capacidad de responder al calor mediante su reblandecimiento y una vez enfriados vuelven a endurecer manteniendo sus propiedades plásticas. Son de cadenas largas unidas por enlaces débiles, pudiendo romperse cuando se someten a calentamiento, moviéndose para obtener un aspecto diferente (liquido viscoso) y estas cadenas se restablecen al enfriarse.



**Figura 1.8** Representación de un polímero termoplástico.

### **Termofijos o termoestables**

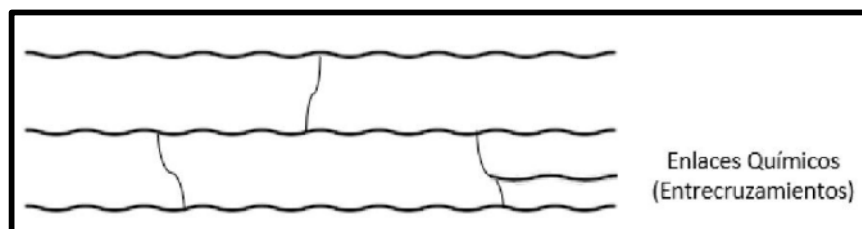
Los polímeros termofijos tienen la peculiaridad que una vez moldeados (adquiriendo una forma definida) no se vuelven a ablandar. Son moléculas de cadenas largas con enlaces químicos fuertes que no se pueden romper cuando se somete a calentamiento el plástico.



**Figura 1.9** Representación de un polímero termofijo.

## Hules

Los hules o cauchos naturales o sintéticos poseen cadenas poliméricas que son ligadas entre ellas por enlaces químicos (Figura 1.10). El calor provoca un aumento de la elasticidad, pero no una fusión del material



**Figura 1.10** Representación de la estructura del hule.

En termoplásticos, la organización de las moléculas: amorfo o cristalino, da igualmente las características diferentes a los polímeros. Los polímeros amorfos están compuestos de cadenas enmarañadas aleatoriamente, mientras que los polímeros semicristalinos se componen de regiones ordenadas (cristalitos) y de regiones amorfas

## 1.9 Clasificación de los plásticos para su reciclado

Debido a una gran variedad de polímeros existentes, se han asignado números a ciertos polímeros. Esto se ha hecho para saber cuál es la procedencia del polímero y es muy útil para los procesadores y recicladores del plástico. Esto también es de gran ayuda para la separación de desechos plásticos. En la Tabla 7, se dan los detalles de esta clasificación y ejemplos de productos con la numeración acordada.

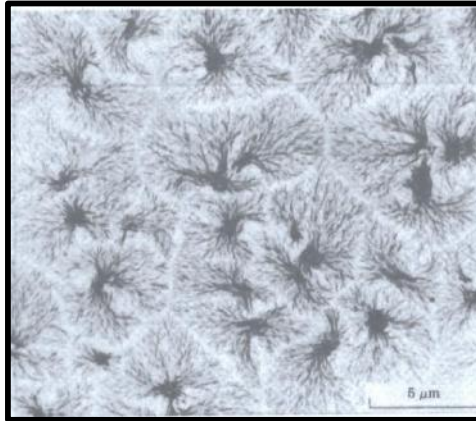
**Tabla 1.7.** Clasificación de polímeros para el Reciclado y Separación de Desechos.

| Polímero                                             | Ejemplo                                                                             | Usos                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.- PET                                              |    | Se refiere al plástico sintetizado con ácido tereftálico y etilenglicol. Con él se fabrica la mayor parte de las botellas transparentes.                                                                                                      |
| 2.- HDPE                                             |    | Significa Polietileno de alta densidad, con el que se hace la mayoría de las botellas de aceite y detergente, algunos de los envases de yogurt y las bolsas de plástico translúcido que hacen ruido al manejarlas.                            |
| 3.- PVC                                              |    | Es el policloruro de vinilo, popularmente conocido como PVC, un plástico lustroso con el que están hechos los tubos de agua y drenaje y las tarjetas de crédito, entre otros objetos. Este plástico, al quemarse, produce gases cancerígenos. |
| 4.- LDPE                                             |   | Las bolsas silenciosas, con la superficie como encerada, se hacen con polietileno de baja densidad. Se hacen también las envolturas muy delgadas para embalaje, las bolsas para sándwich y el plástico que cubre la ropa de la tintorería.    |
| 5.- PP                                               |  | Es el polipropileno, el menos denso de los polímeros, utilizado en las bolsas de snacks, en las tapas de bebidas, en los lazos de tendedero y algunos envases de yogurt o electrolitos.                                                       |
| 6.- PS                                               |  | El expandible se usa en vasos, platos y empaques. El PS (cristal) se utiliza en desechables transparentes.                                                                                                                                    |
| 7.- El número 7 abarca los demás plásticos restantes |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                               |

**Fuente:** Lesur, 2010

### 1.10 Polímeros semi-cristalinos y polímeros amorfos

Bajo ciertas condiciones de enfriamiento y temperaturas el polietileno de baja densidad presenta estructuras de tipo esferulito, tal como se muestra en la Figura 1.11. Las regiones ordenadas de las esferulitas son las zonas oscuras mientras que las zonas claras son las regiones amorfas.

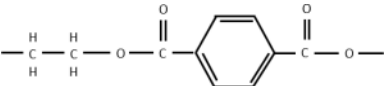
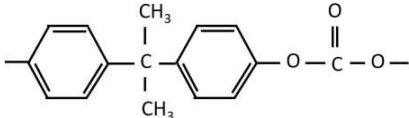
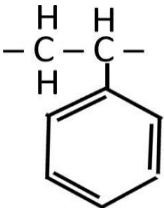


**Figura1.11.** Esferulitas observadas bajo microscopía de luz polarizada (Smith, 2023).

Los polímeros comerciales no son 100% cristalinos debido a la presencia de materia amorfa en el interior de la estructura formado por los cristalitos (esferulitas). El grado o porcentaje de cristalinidad alcanzado por el polímero se obtiene dividiendo la entalpía de fusión (área bajo la curva de la endoterma de fusión) sobre la entalpía de fusión al equilibrio (considerando que el polímero se encuentra completamente cristalino). El grado de cristalinidad varía considerablemente de un polímero a otro yendo de polímeros 100% amorfos a polímeros muy cristalinos.

La cristalinidad está relacionada con el ordenamiento de las cadenas. Normalmente los polímeros amorfos son transparentes.

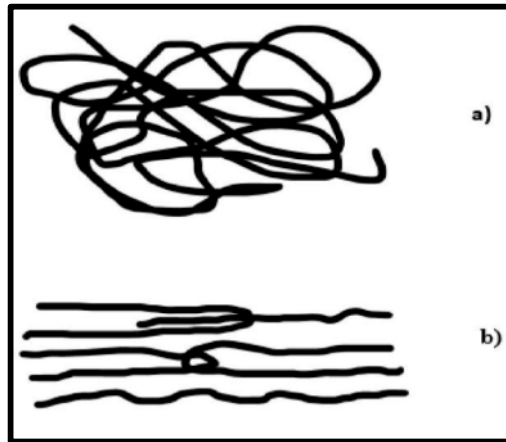
**Tabla 1.8.** Cristalinidad y transparencia de polímeros.

| POLÍMERO               | ESTRUCTURA                                                                                                                                            | CRISTALINIDAD | TRANSPARENCIA                        |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| PTFE                   | $\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$                    | Alta          | Blanco Opaco                         |
| Polietileno            | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$                    | Media a Alta  | Opaco, excepto en delgadas películas |
| Polipropileno          | $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$                 | Media         | Blanquecino                          |
| Polietilen-Tereftalato |                                                                      | Alta          | Opaco                                |
| Polycarbonato          |                                                                     | Baja          | Claro                                |
| Polimetilmetacrilato   | $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C}-\text{O}-\text{CH}_3 \\    \\ \text{O} \end{array}$ | Muy Baja      | Claro                                |
| Poliestireno           |                                                                    | Muy Baja      | Claro                                |

**Fuente:** Askeland y Phulé, 2004.

La estructura de los polímeros amorfos es teóricamente comparable a la de los líquidos, (como se muestra en Figura 1.12), caracterizada por la ausencia de orden molecular.

Morfológicamente los polímeros amorfos pueden ser representados por moléculas bajo la forma de bolas o pelotas enmarañadas.



**Figura 1.12** Representación de un polímero amorfo. a) Enmarañado y no orientado, b) orientado.

Un cambio importante en las propiedades físicas de un polímero amorfo se produce durante la transición vítrea que corresponde a la aparición de movimientos de largos segmentos de cadenas.

### 1.11 Transición vítrea

La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) marca el pasaje del estado vítreo o vítreo al estado flexible o cauchótico [Smith, 2023]. La  $T_g$  puede considerarse también como transición de frágil a dúctil. Por debajo de la  $T_g$ , el material es un vidrio frágil porque el movimiento molecular de la cadena está muy restringido.

En el caso de un polímero semi-cristalino, un cambio de volumen muy importante es registrado en la temperatura de fusión de los cristales, seguido de un cambio menos importante en la temperatura de transición vítrea de la fase amorfa. Las moléculas de bajo peso molecular cristalizan completamente sobre un intervalo de temperatura muy corto. Por otra parte, los polímeros semicristalinos no cristalizan completamente (taza de cristalinidad) y la cristalización se produce sobre un intervalo de temperatura. El rango de temperaturas de

fusión de un polímero semi-cristalino puede ser bastante grande. El polietileno de baja densidad comienza a reblandecerse a 75°C y los últimos cristales desaparecen a 115°C. Otros polímeros como el nylon 6-6 funden en un rango de temperatura más estrecho.

**Tabla 1.9** Temperatura de Transición Vítrea de algunos polímeros.

| NOMBRE<br>COMUN | NOMBRE<br>QUIMICO                       | SIM-<br>BOLO | T <sub>g</sub><br>(°C) | T <sub>f</sub> (°C) | USOS             |
|-----------------|-----------------------------------------|--------------|------------------------|---------------------|------------------|
| Polietileno     | Polietileno                             | PE           | -120                   | 140                 | Plástico         |
| Polipropileno   | Polipropileno<br>isotáctico             | PP           | -18                    | 170                 | Plástico, fibras |
| Acetal          | Polioximetileno                         | POM          | -50                    | 181                 | Plástico         |
| Nylon 66        | Polihexameten-<br>diamina               | PA 66        | 50                     | 267                 | Plástico, fibras |
| Vinilo          | Policloruro de vinilo                   | PVC          | 90                     | No cristaliza       | Plástico         |
| Acrílico        | Polimetacrilato de<br>metilo (atáctico) | PMMA         | 105                    | No cristaliza       | Plástico         |
| Poliestireno    | Poliestireno (atáctico)                 | PS           | 100                    | No cristaliza       | Plástico         |
| Silicón         | Polidimetilsiloxano                     | PDMS         | -123                   | -80                 | Caucho           |
| Caucho natural  | Poli-cis—isopreno                       | NR           | -73                    | 28                  | Caucho           |
| Polibutadieno   | Poli-cis-butadieno                      | PB           | -85                    | 2                   | Caucho           |

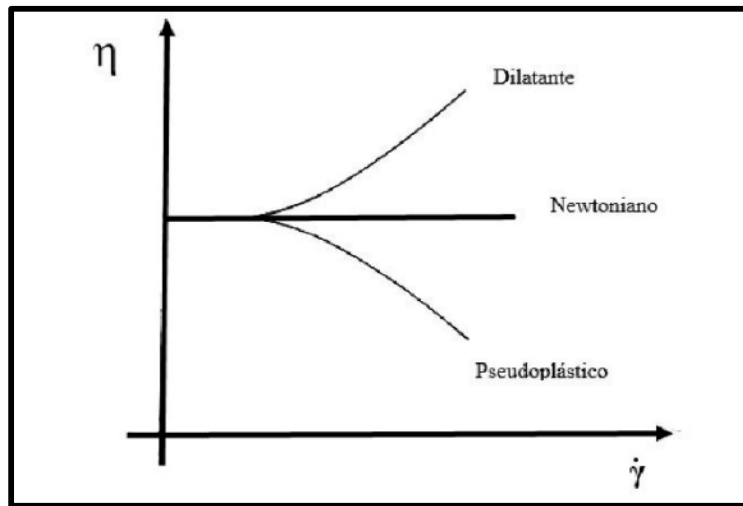
**Fuente:** Askeland y Phulé, 2004.

La tabla indica las temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ) y de fusión ( $T_f$ ) para varios polímeros. Los tres primeros (PE, PP y POM) son a temperatura ambiente semi-cristalinos con la fase amorfa al estado cauchótico (elástico). Ellos son utilizados como plásticos moderadamente rígidos. Estos plásticos pueden sufrir grandes deformaciones permanentes. El nylon 6,6 consiste de una dispersión de cristales en una matriz al estado amorfo vítreo

( $T_g=50^\circ\text{C}$ ) y es un polímero relativamente frágil sin presencia de humedad. Su utilidad se mejora con la absorción de la humedad del ambiente (polímero que tiene habilidad de absorber agua) la cual actúa como un plastificante y reduce la temperatura de transición vítrea de la parte amorfa de este polímero. El Nylon66, PE, PP y POM son opacos. Los tres polímeros siguientes (PVC, PMMA, PS) cuales son amorfos, vítreos, transparentes y relativamente frágiles a temperatura ambiente tiene igualmente aplicaciones como plásticos. Finalmente, los últimos tres polímeros (PDMS, NR y PB) cuyas temperaturas de fusión ( $T_f$ ) y transición vítrea ( $T_g$ ) son menores a la temperatura ambiente estarán al estado amorfo cauchótico (estado elástico) y podrán encontrar aplicaciones como cauchos o hules (Askeland y Phulé, 2004).

## **1.12 Viscosidad de los polímeros**

Tal y como se muestra en la Figura 1.13,, las suspensiones de sólidos, las soluciones poliméricas y los polímeros fundidos tienen un comportamiento no-newtoniano y un solo valor de la viscosidad no es suficiente para para caracterizar reológicamente estos materiales. Calculando la viscosidad de estos materiales no-Newtonianos sometidos a un flujo en cizallamiento simple, se observa que la viscosidad es una función de la tasa de corte (cizallamiento). Este fenómeno es debido a la complejidad de la estructura de los polímeros. Si la viscosidad de un fluido disminuye con un aumento de la tasa de cizallamiento, el fluido tiene un comportamiento pseudoplástico. Por el contrario, si la viscosidad aumenta incrementando la tasa de cizallamiento, el fluido tiene un comportamiento dilatante. Un fluido donde un solo valor de la viscosidad da una caracterización reológica completa es llamado "fluido newtoniano generalizado".



**Figura 1.13.** Comportamiento de fluidos no newtonianos en función de la velocidad de corte.

La viscosidad en algunos casos llega a estar en función de la constante aplicación de un esfuerzo o deformación durante un periodo de tiempo. La viscosidad disminuye con el tiempo durante la aplicación constante de un esfuerzo o deformación en el caso de fluidos tixotrópicos, mientras que en el caso de fluidos reopécticos la viscosidad aumenta con el tiempo durante la aplicación constante de un esfuerzo o una deformación.

### **Comportamiento viscoelástico.**

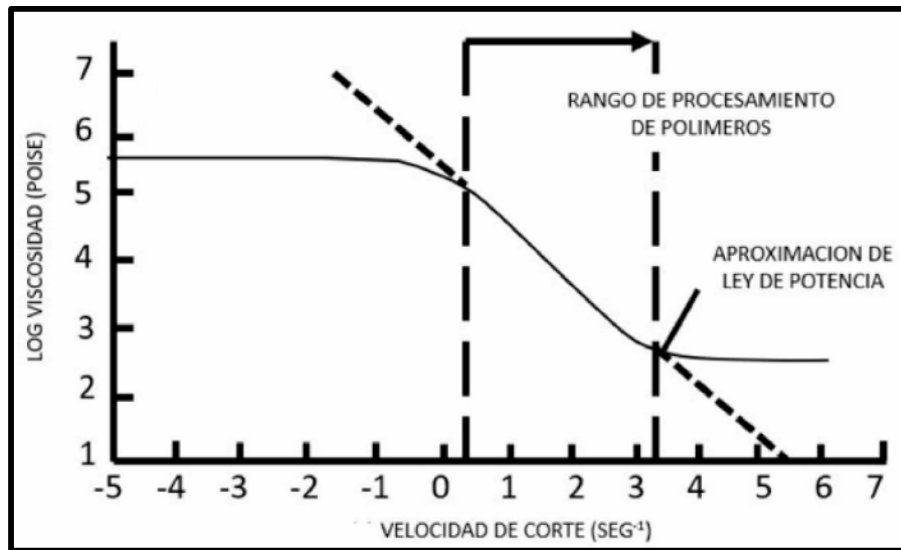
Los polímeros presentan un comportamiento intermedio entre un sólido elástico y un líquido viscoso. El comportamiento elástico se relaciona con el de un resorte, mientras que el viscoso al de un amortiguador. Existen varios modelos básicos como el de Maxwell o Voigt-Kelvin para representar estos comportamientos (Lafleur y Vergnes, 2014).

#### **1.12.1 Modelo de ley de potencia de viscosidad**

Existe un gran número de modelos matemáticos que describen el comportamiento de polímeros fundidos, es decir describir la relación entre viscosidad aparente y velocidad de corte. De estos modelos el más utilizado es de Ostwald y de Waele o "Ley de Potencia" (Ramos, 1993). Este modelo está basado sobre la observación de un rango lineal de la

viscosidad en función de la tasa de corte sobre una gráfica log-log, como se muestra en la Figura 1.14.

$$\eta = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \dots\dots\dots(1.1)$$



**Figura 1.14** Comportamiento de la Viscosidad en función de la velocidad de corte.

Donde:

m: consistencia del fluido [ ] Pa.s.sn

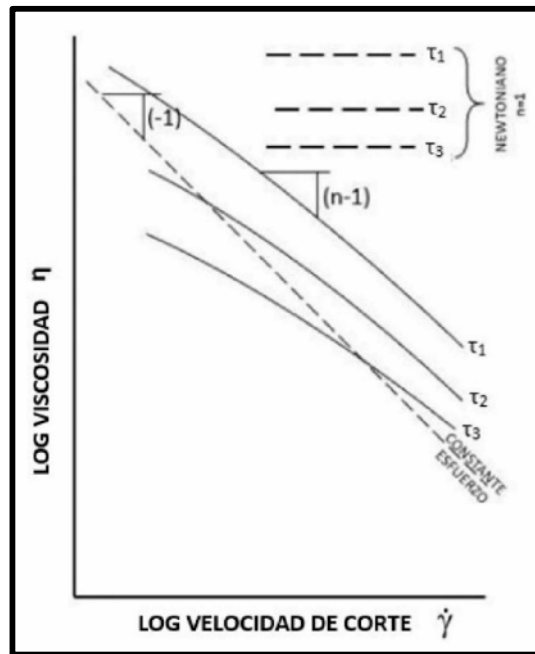
n: índice de pseudo-plasticidad [ ] adimensional

Para n=1, el modelo de Ley de Potencia se transforma en la Ley de Newton de Viscosidad, donde  $\mu = \eta$  (Ramos, 1993)

Para n<1, el fluido tendrá un comportamiento Pseudoplástico

Para n>1, el fluido tendrá un comportamiento dilatante.

La relación entre  $\eta$  y  $\dot{\gamma}$  es generalmente representada en escala logarítmica, la ley de potencia resulta entonces en una línea recta de pendiente (n-1), tal como se muestra en la Figura 1.15.



**Figura 1.15** Logaritmo de la viscosidad aparente en función del logaritmo de la velocidad de corte.

Este es el modelo que utilizaremos para los cálculos de flujo en extrusión monohusillo. Existen reómetros capilares y oscilatorios con varias geometrías para determinar la viscosidad de polímeros. Sin embargo, este no es el alcance de este libro. Solo nos concentraremos en utilizar datos de viscosidad en función de la frecuencia o velocidad de corte ya proporcionados.

## REFERENCIAS

1. Askeland D.R y Phulé P.P., (2016), Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Séptima Edición. ISBN: 978- 607-526-063-1.
2. Meikle J.L, (1997), American Plastic. A Cultural History, Rutgers University Press, New Jersey.
3. Lafleur P. and Vergnes B. (2014), Polymer Extrusion, Editorial Wiley.
4. Lesur Esquivel L. (2010), Manual del Manejo de la Basura, Editorial Trillas.
5. Meira G. y Gugliotta L. (2019), Polímeros, Introducción a su Caracterización y a la Ingeniería de la Polimerización, Ediciones UNL, Argentina.
6. Ramos de Valle, L. F (1993). Extrusión de Plásticos: Principios Básicos, Editorial Limusa
7. Rosen S. L, (1993), Fundamental Principles of Polymeric Materials, Second Edition, Wiley, New York.
8. Smith W. F (2023), Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales McGraw Hill, Séptima Edición, ISBN:9786071520241.
9. Moeller, T. (2023). Química inorgánica. Reverté.

## **CAPÍTULO II**

### **TIPOS DE EXTRUSORES Y OTROS EQUIPOS DE MEZCLADO**

#### **2.1 Introducción**

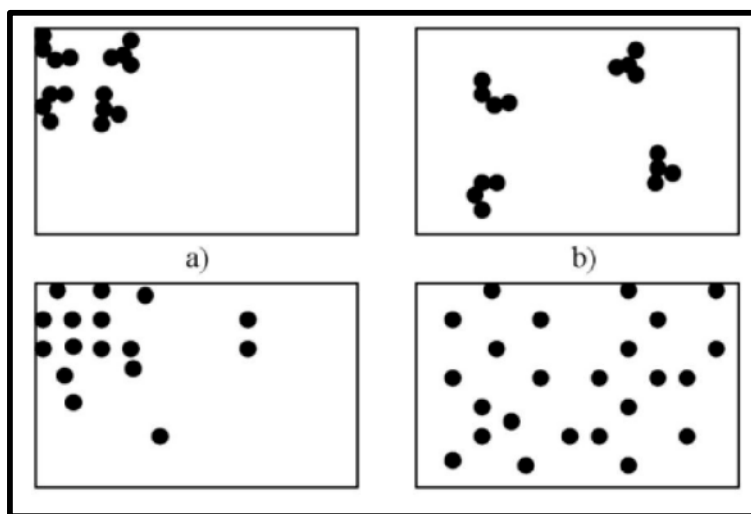
Debido a que normalmente los polímeros son formulados o reforzados con varios tipos de partículas, los extrusores también se consideran mezcladores en su última zona, sobre todo los extrusores de doblehusillo para incorporar estas partículas. En este capítulo se describen los tipos mezclado y los tipos de mezcladores para incorporar cargas/refuerzos en polímeros. Se incluyen mezcladores por lotes (batch) y continuos. Todos estos equipos son una alternativa para incorporar cargas o refuerzos en polímeros.

#### **2.2 Tipos de Mezclado**

Al mencionar equipos de mezclado es importante distinguir los dos tipos de mezclado que existen: el Distributivo y Dispersivo (Figura 2.1).

Mezclado distributivo: el cual homogeniza la distribución espacial de las partículas en el polímero. Mezclado dispersivo: el cual reduce el tamaño de las partículas.

Ambos tipos de mezclado son obtenidos creando altos esfuerzos y deformaciones en el polímero fundido. El mezclado dispersivo favorece la ruptura de los componentes, mientras que el mezclado distributivo asegura la distribución uniforme de las partículas en el polímero.



**Figura 2.1.** Ejemplos de Mezclado: a) mal dispersado y distribuido, b) mal dispersado, bien distribuido, c) bien dispersado, mal distribuido y d) bien dispersado y distribuido (Manas-Zloczower, 2009).

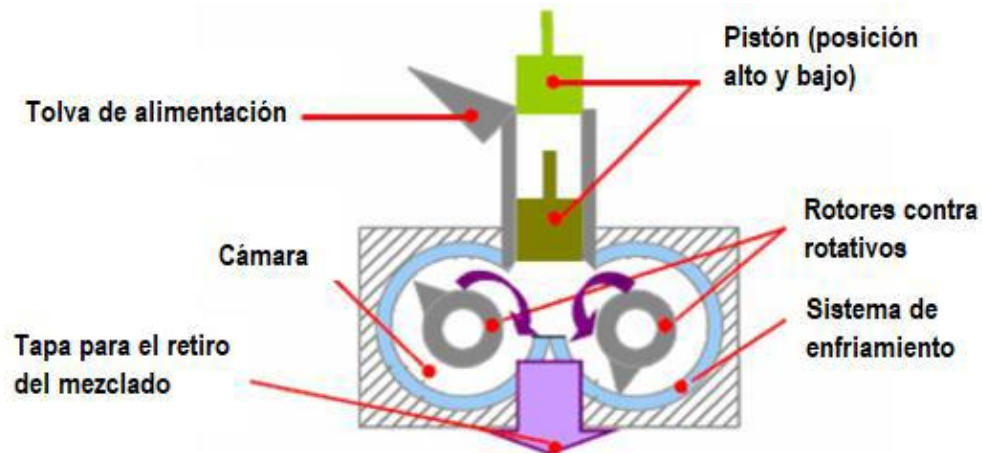
En el procesamiento de polímeros, los mezcladores industriales juegan un papel fundamental en las propiedades físicas de los productos finales. Estos equipos son fundamentales para mezclar, dispersar y homogeneizar las materias primas. Partiendo de los gránulos del polímero y sus aditivos, diferentes tipos de mezclado son importantes para lograr las propiedades deseadas del producto final.

### 2.3 Mezcladores por Lotes (tipo batch)

Ampliamente utilizados en producciones de pequeña a mediana escala, los mezcladores por lotes facilitan un control preciso sobre el proceso de mezcla al combinar todas las materias primas en un solo lote. Este tipo de mezclador es particularmente efectivo para garantizar la distribución uniforme de colorantes, aditivos y rellenos en toda la matriz de plástico. Entre los mezcladores por lotes se encuentran los siguientes:

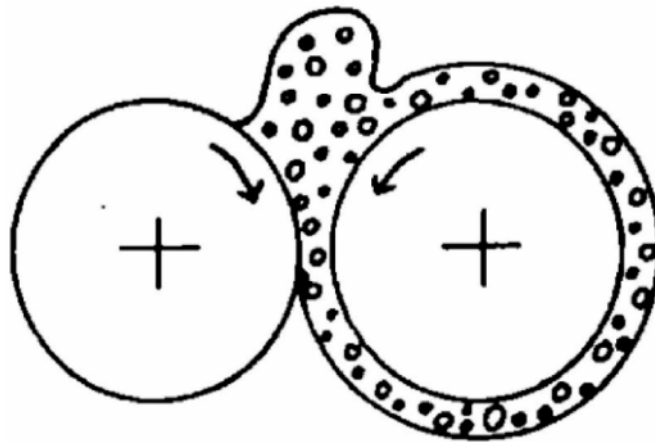
**Mezclador interno tipo Banbury.** Este equipo básicamente consiste en dos rotores que giran en sentido contrario en una cámara cerrada con el objetivo de alcanzar altos esfuerzos de cizallamiento. Dentro de la cámara de mezclado es posible generar un flujo hacia adelante y hacia atrás debido a la concepción de los rotores. El mezclado que se produce es dispersivo y

distributivo debido a los altos esfuerzos de corte generados. La cámara y los rotores pueden enfriarse y calentarse para un adecuado control de la temperatura.



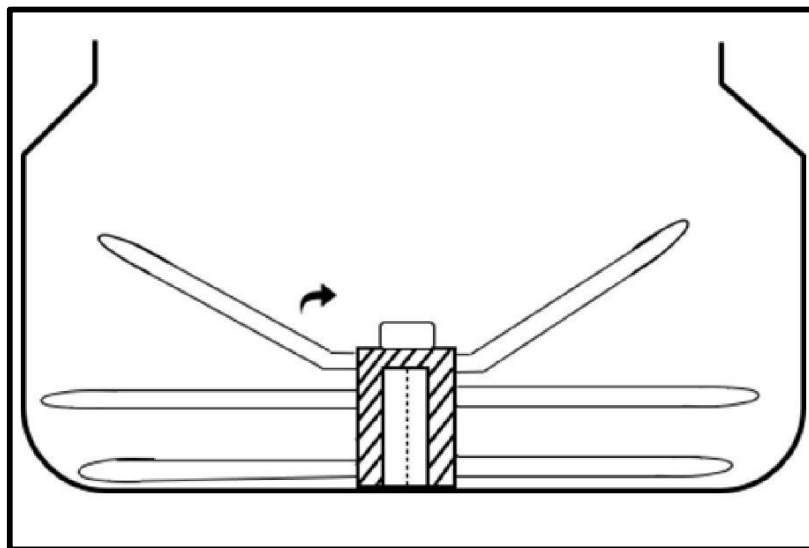
**Figura 2.2 Mezclador** Interno Banbury (Collin, 2004).

**Molino de Rodillos.** Consiste en dos rodillos cilíndricos, los cuales pueden calentarse. Los rodillos giran en direcciones opuestas y a diferentes velocidades. La dispersión se lleva a cabo entre el espacio que hay entre los dos cilindros, ejerciendo un esfuerzo de cizallamiento continuo y reinsertándose nuevamente entre los rodillos, optimizando el mezclado. Este equipo puede ser empleado como un primer mezclador descargando el material en otro equipo o bien, un segundo mezclador recibiendo el material de un equipo previo de mezclado.



**Figura 2.3** Molino de Rodillos [Lozano, 1998].

**Mezclador Intensivo tipo Henschell.** Este equipo se utiliza principalmente para mezclar polvos y líquidos en baja concentración a altas revoluciones, de esta manera generando un mezclado distributivo y dispersivo de las partículas incorporadas. La mezcla dentro del equipo se mueve en forma circular y ascendente, creándose un remolino sobre el eje central del mezclador.



**Figura 2.4.** Mezclador Intensivo tipo Henschell (Lozano, 1998).

## **2.4 Mezcladores Continuos**

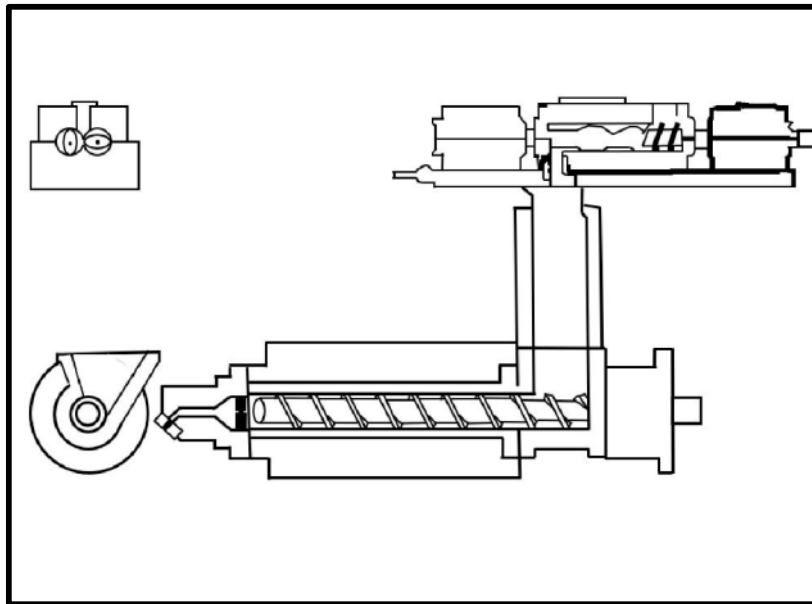
Estos son diseñados para procesos de producción a gran escala y continuos, los mezcladores continuos ofrecen un flujo constante de materiales, asegurando un flujo de producción constante. Comúnmente utilizados en la producción de productos de plástico de alto volumen con propiedades consistentes, los mezcladores continuos son ideales para operaciones de compuesto que requieren la dispersión uniforme de múltiples aditivos.

### **2.4.1 Mezclador Farrel**

Este mezclador continuo fue creado por la compañía FARREL en 1963. El mezclado continuo es una tecnología de compuestos alternativa y sobresale en el procesamiento de aplicaciones sensibles a la temperatura y polímero altamente reforzados (aditivados). El equipo FARREL proporciona:

- Procesamiento excepcional de polímeros de alto nivel de relleno
- Excelente mezcla para polímeros sensibles a la temperatura
- Eficiencia energética superior para reducir el consumo de energía

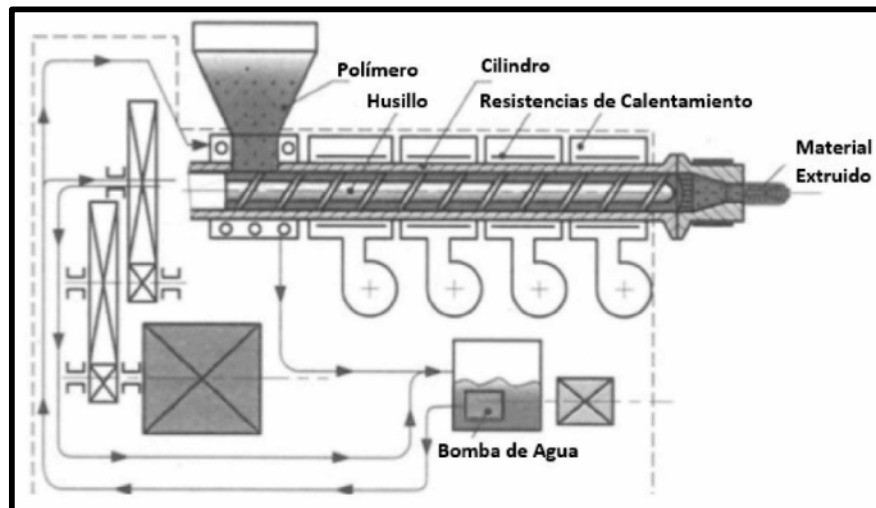
Existen combinaciones de mezcladores tipo Farrel (en los cuales se obtiene un buen mezclado dispersivo y distributivo) con extrusores receptores de la mezcla caliente. El extrusor receptor bombea el fundido hacia un dado donde se obtiene una homogenización adicional en los pellets/gránulos obtenidos.



**Figura 2.5** Mezclador continuo Farrel (Tadmor y Gogos 2006).

#### 2.4.2 Extrusor Monohusillo

Producen un flujo homogéneo y uniforme. Adecuado para producción de perfiles, aislamiento de cable eléctrico, cintas plásticas y procesos de coextrusión.



**Figura 2.6** Extrusor Monohusillo (Lafleur y Vergnes, 2014).

### 2.4.3 Extrusor Reciprocante

Este extrusor es de un solo tornillo con cámara dentada, su tornillo tiene un movimiento hacia adelante y hacia atrás mientras gira. El tornillo tiene dientes y picos en la zona de mezclado al igual que el barril, generando altos esfuerzos de corte y por tanto un mejor mezclado sin elevar la temperatura, lo que incrementa su eficiencia. Posteriormente, el material pasa a un extrusor pelletizador, ya que el mezclador reciprocante suministra el producto en forma continua pero intermitente.

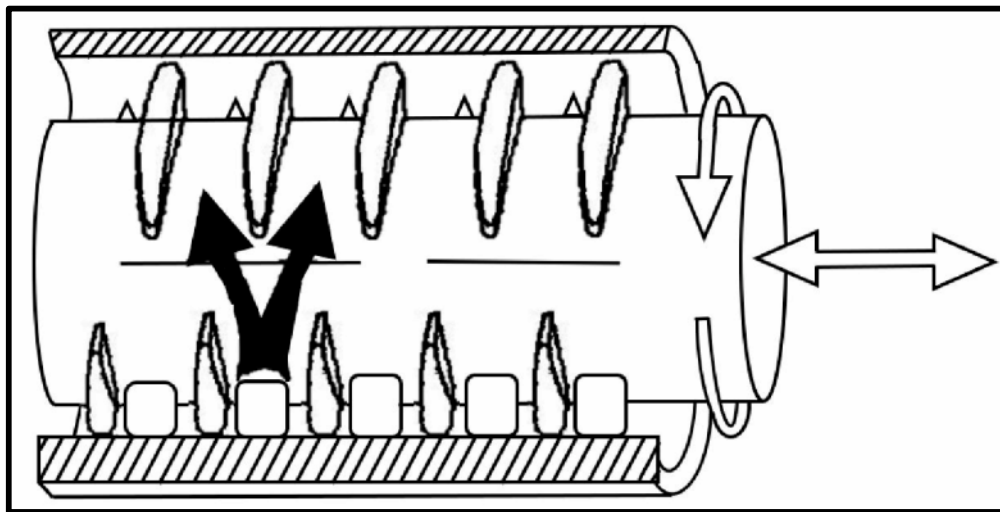


Figura 2.7 Extrusor Reciprocante (Tadmor y Gogos, 2006).

### 2.4.4 Extrusor Doble Husillo

Estos equipos producen una muy buena mezcla entre gránulos y aditivos debido al aumento de las fuerzas de cizallamiento contra las paredes del cilindro y entre los tornillos.

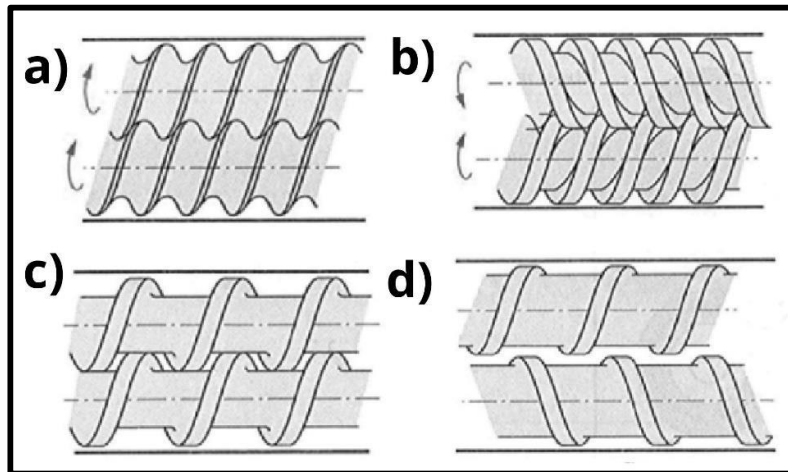
Los de doble-husillo a su vez se subclasifican en (Figura 2.8):

**Corrotatorios:** donde los dos husillos giran en la misma dirección

**Contrarrotatorios:** donde los dos husillos giran en dirección opuesta, uno a favor y otro en contra de la dirección de las manecillas del reloj.

**Interpenetrados:** en estos los filetes de cada husillo interpenetran o engranan en sus canales alternadamente en toda su longitud o en secciones (Figura 2.10)

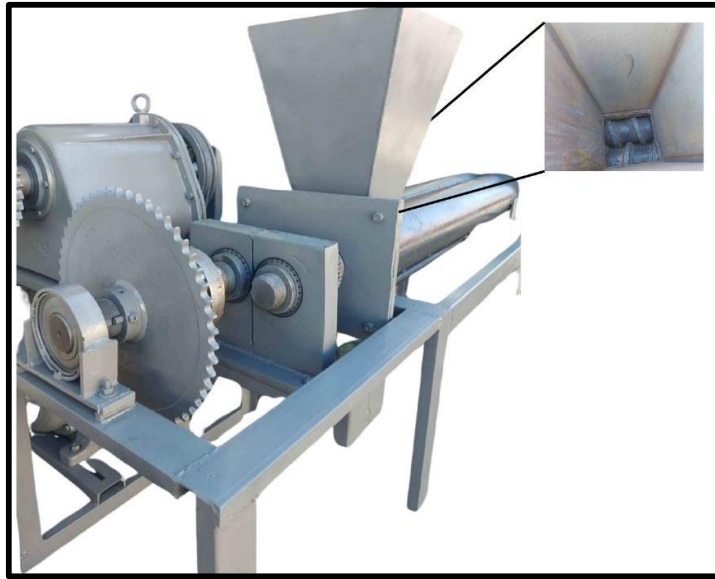
**No-Interpenetrados:** los filetes de un husillo no penetran en los canales del otro husillo. La distancia entre los centros de los husillos es muy similar a la suma de sus radios (Ramos, 1993).



**Figura 2.8** Tipos de Extrusores Doble-Husillo: a) Husillos corrotatorios, b) Husillos Contrarrotatorios, c) Husillos Interpenetrados y d) Husillos No-Interpenetrados (Vergnes y Chapet, 2001).

## 2.5 Componentes de Extrusores de Doble Husillo

Este Extrusor consiste de dos husillos rotando en dos cavidades del barril. Los ejes de estos dos husillos son paralelos al eje principal del barril. El intervalo entre los dos ejes corresponde a la distancia entre los dos husillos en el que las extremidades se entrelazan en los canales.

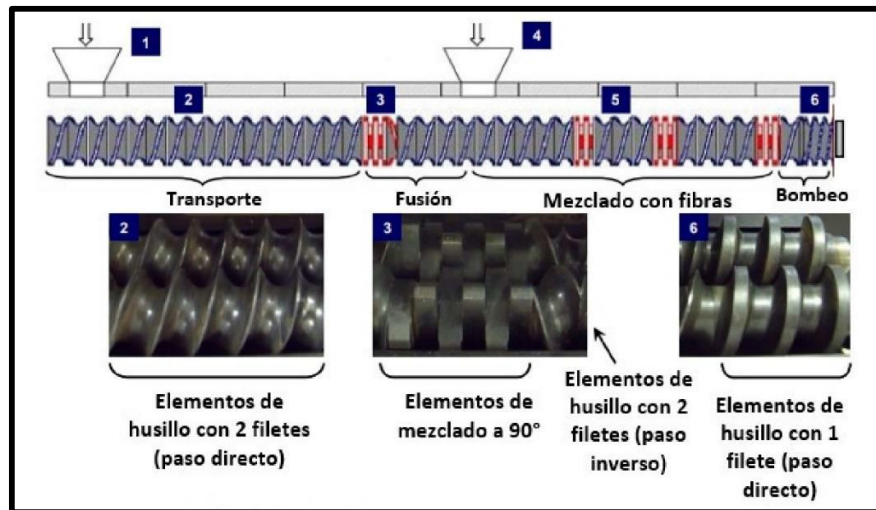


**Figura 2.9** Representación completa de un Extrusor Doble Husillo (Cortesía de VASA, S.A de C.V).

### 2.5.1 Tipos de elementos de Extrusores Doble Husillo Corrotativos

Los extrusores de doble husillo son modulares, se configuran con varios tipos de elementos. Es decir, están compuestas por pequeñas piezas de una longitud determinada, que pueden disponerse sobre un eje estriado para obtener un perfil determinado. Los elementos de transporte pueden ser directos o inversos y pueden interpenetrar con dos filetes y un filete, como se muestra en la siguiente Figura. Los elementos de mezclado son elementos no helicoidales de un espesor determinado y tienen una sección transversal idéntica a la de los elementos de transporte (del extrusor monohusillo). Están montados en los ejes, uno escalonado en un cierto ángulo con respecto al otro, lo que produce flujos complejos durante la rotación y permite una mezcla eficiente. Se dice que este escalonamiento es directo si las puntas crean un pseudocanal y son análogas al de un elemento de tornillo directo.

Los elementos de mezclado y los elementos de transporte inverso son elementos restrictivos que tienden a dificultar el flujo del polímero hacia el dado.



**Figura 2.10** Configuración Incorporar Fibras en el Centro del Extrusor Doble Husillo (Le Duc, 2013).

#### Descripción del funcionamiento de la configuración del extrusor de la Figura 2.10..

1. Introducción del Polímero en la Tolva
2. Transporte: El transporte de sólidos se realiza mediante elementos helicoidales con dos filetes directos, es decir en el sentido del flujo. Los tornillos de doble filete causan sólo una ligera restricción del material y facilita su progresión
3. Fusión: La fusión es causada por un elemento restrictivo que se opone al flujo hacia adelante. En este caso se muestra un bloque de seis elementos de mezclados bilobulados escalonados a 90°, seguido de un elemento de transporte con 2 filetes. La fusión en extrusión de doble husillo es muy rápida y depende de los elementos del husillo. Es más rápido para el caso de un elemento de tornillo con paso inverso que para el caso de un bloque de elementos de mezclado que son elementos menos restrictivos.
4. Zona de incorporación de aditivos. Esta zona es importante para la formulación de polímeros o incorporación de aditivos. Esta zona no es disponible en extrusores monohusillo, en estos últimos el polímero y los aditivos se incorporan la tolva única de alimentación.
5. Mezclado: En esta zona el polímero ya está fundido y fluye con los aditivos. El flujo ideal debe ser distributivo para homogeneizar el material y dispersivo. La mezcla distributiva está influenciada principalmente por la deformación y la complejidad del

campo de velocidades, mientras que la mezcla dispersiva está más relacionada con esfuerzos y cortes elevados. Esta zona de mezcla está formada por elementos de tornillo de paso directo y tres zonas más restrictivas formadas por elementos de mezclado bilobulados a 90°.

6. Bombeo: Esta zona está formada por elementos de transporte de un filete con paso directo que imponen una mayor restricción y provocan un aumento de presión, permitiendo así el paso del material a través del dado.

## **2.6 Principales Funciones de los Extrusores Doble-Husillo**

**Cinco funciones importantes son llevadas a cabo por los extrusores Doble-Husillo:**

- 1) Alimentación del Polímero
- 2) Fusión del polímero
- 3) Mezclado
- 4) Bombeo
- 5) Devolatilización

### **1. Alimentación del Polímero:**

- Objetivo: ajustar la relación gasto/revoluciones por minuto (Q/N) para una alimentación específica
- Si Q/N es muy elevado: aumenta el torque, riesgo que el polímero no llegue fundido en el dado
- Si Q/N es muy bajo: la energía específica cedida al polímero es muy elevada y existe el riesgo de degradación, además hay una reducción importante de la viscosidad.

### **2. Fusión del polímero:**

- La fusión es muy rápida en estos extrusores

- Los mecanismos de fusión son muy diferentes a los de los extrusores monohusillo. Zona de fusión caracterizada por una mezcla de gránulos/pellets sólidos y fundidos cuando el polímero es muy viscoso.
- La fusión tiene lugar en el primer evento restrictivo en la zona de fusión encontrado por el polímero (flujo hacia atrás generado o reflujo).
- Restricción puede ser: un elemento con paso inverso, un elemento de Mezclado, etc.
- Fusión puede ser entonces observada en cualquier zona del husillo (contrariamente lo que sucede en un extrusor monohusillo).

### 3. Mezclado

- Existen dos Categorías de Mezclado en estos extrusores: el distributivo y el dispersivo
- Mezclado dispersivo: ruptura de partículas (esfuerzos de corte muy importantes en el fluido)
- Mezclado Distributivo: división y recombinación del flujo
- Elementos de Mezclado anchos: generan flujo en elongación (adecuados para mezclado dispersivo)
- Elementos de Mezclado Delgados (estrechos): son utilizados para Mezclado distributivo
- En estos equipos pueden combinarse tres tipos de elementos de Mezclado: elementos hacia adelante, hacia atrás y neutros.
- Elementos multilobulados: estos generan un mezclado más uniforme en los extrusores Contrarrotativos
- Optimización del Mezclado: colocar zona de elementos de Mezclado distributivo previos a elementos dispersivos.
- Zonas de Mezclado separadas por zonas de transporte. Mantienen la temperatura a un nivel razonable (también se reduce la temperatura aumentando la viscosidad, lo que mejora la acción del Mezclado dispersivo).
- El modelamiento de los elementos de Mezclado es muy importante para optimizar el mezclado de extrusores de Doble-Husillo.

**Figura 2.11** Tipos de elementos de Mezclado: a) elementos para mezclado dispersivo, b) elementos para mezclado distributivo.

#### 4. Bombeo

- Objetivo: generar una presión suficiente para forzar el gasto deseado a través de un dado específico.
- Usualmente se utilizan elementos de transporte en la zona de Bombeo
- El polímero fundido llena los canales a lo largo del husillo hasta que el polímero alcanza la presión atmosférica (a la salida del extrusor).
- Modelamiento: método analítico para fluido newtoniano (1D)
- Métodos numéricos: elemento finito (2D, 3D) volúmenes finitos (2D)
- Métodos no isotérmicos: ecuación de Todd.
- Obtención de Curvas características con la ayuda de método analítico (1D) o numérico (2D)
- Cálculo 3D es necesario para la zona interpenetrada

#### 5. Devolatilización

La razón principal por la que los extrusores cuentan con venteo es por la de volatilización de humedad o gases o aire atrapado. Si la resina no está completamente fundida, es posible que queden atrapados humedad o gases dentro de los gránulos sin fundir. Para extruir polímeros obtenidos por polimerización por condensación es indispensable una zona de devolatilización o bien para extrusión reactiva para devolatilizar gases.

**Tabla 2.1** Extrusor Monohusillo contra un Doble-husillo

| Característica       | Monohusillo         | Doble-Husillo    |
|----------------------|---------------------|------------------|
| Flujo                | Arrastre            | Positivo         |
| Perfil de Velocidad  | Puede ser Calculado | Complejo         |
| Tiempo de residencia | moderado/grande     | pequeño/estrecho |

|                                   |                    |                    |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Efecto de la presión en el caudal | reduce el flujo    | muy poco efecto    |
| Velocidad de corte                | elevada            | baja (PVC)         |
| Acción de mezclado                | bajo               | muy bueno (mezcla) |
| Generación de calor               | muy grande         | baja               |
| Construcción mecánica             | robusto y sencillo | complicado         |
| Costo                             | moderado           | alto               |

**Tabla 2.2** Diferencias Fundamentales entre Extrusores Monohusillo y de Doble-Husillo.

| <b>Extrusor Monohusillo</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>Extrusor Doble-Husillo</b>                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Canal del Tornillo Completamente lleno</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo (Caudal) determinado por la velocidad del tornillo</li> <li>• Cisallamiento total: independiente de la velocidad del tornillo</li> </ul>       | <p>Canal del Tornillo Parcialmente lleno</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo (Caudal) determinado por la tasa de alimentación</li> <li>• Cisallamiento total: altamente dependiente sobre el caudal</li> </ul>                                                                 |
| <p>Material transportado por fricción (Arrastre)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El caudal depende de la presión en el cabezal del dado</li> <li>• Aditivos líquidos y polvos fácilmente crean problemas</li> </ul>            | <p>Material desplazado por Transporte Positivo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aditivos líquidos y polvos usualmente no presentan problemas</li> </ul>                                                                                                                           |
| <p>Trayectoria laminar del polímero</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo cisallamiento</li> <li>• Transferencia de calor inefectiva</li> <li>• Mala capacidad de Mezclado</li> <li>• Se necesitan extrusores largos</li> </ul> | <p>Trayectoria del polímero bastante tortuosa</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto cisallamiento</li> <li>• Transferencia de calor muy efectiva</li> <li>• Buena capacidad de Mezclado (consisten de buenos elementos de mezclado)</li> <li>• Extrusores menos largos</li> </ul> |

**Tabla 2.3** Ventajas y Desventajas de Extrusores Monohusillo y de Doble-Husillo.

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>VENTAJAS DE UN EXTRUSOR MONOHUSILLO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricación sencilla, no muy caro</li> <li>• Diseño y predicción sobre bases teóricas bien avanzadas</li> <li>• Bastante experiencia sobre muchos tipos de polímeros</li> </ul> | <b>VENTAJAS DE UN EXTRUSOR DE DOBLE-HUSILLO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño modular con flexibilidad</li> <li>• Alimentador efectivo</li> <li>• Devolatilizador efectivo</li> <li>• Mezclador efectivo (con elementos especiales de mezclado)</li> </ul>                                                                       |
| <b>VENTAJAS DE UN EXTRUSOR MONOHUSILLO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poca Flexibilidad</li> <li>• Alimentación poco eficiente de aditivos</li> <li>• Devolatilizador inefectivo</li> <li>• Mezclador poco eficiente</li> </ul>                       | <b>DESVENTAJAS DE UN EXTRUSOR DE DOBLE-HUSILLO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Difíciles de Fabricar y muy costosos</li> <li>• Bases Teóricas no bien establecidas para el sistema de flujo</li> <li>• Distribución de tiempo de residencia muy estrecho, dando pobre mezclado</li> <li>• Necesita Alimentadores adecuados</li> </ul> |

**Tabla 2.4** Comparación entre Extrusores Co-rotativos y Contra-corrotativos.

| <b>CONTRA-CORROTATIVOS</b>                                                                                       | <b>CO-RRROTATIVOS</b>                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Presiones altas generadas en la separación entre los husillos                                                    | Autolimpieza más efectiva (separación más pequeña entre los husillos)                     |
| Sistema cerrado longitudinal y transversalmente. Como resultado, características de transporte más positivas     | Mejor posibilidad de dispersar todas las partículas en el sistema bajo esfuerzos de corte |
| Generalmente confinados para bajas velocidades de rotación los husillos y por lo tanto se obtiene un caudal bajo | Altas velocidades de los husillos con grandes caudales                                    |

|                                                                                     |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Es fácil que se produzca aire atrapado, por lo que se generan espacios sin material | Menos transporte positivo, tiempo de residencia grande y altas presiones en el dado |
| Generación de superficie efectiva y venteo                                          | Polímero sujeto a altas velocidades de corte                                        |

**EN EL ANEXO 2 SE DAN MÁS DETALLES DE LOS EQUIPOS EXPLICADOS EN ESTE CAPÍTULO. EL APENDICE 2 AYUDA A VISUALIZAR LOS EQUIPOS DE ESTA SECCIÓN DEL LIBRO.**

### **REFERENCIAS**

1. Collin V. (2004). "Etude rhéo-optique des mécanismes de dispersion du noir de carbone dans les élastomères", Tesis de Doctorado, Ecole des Mines de París.
2. Le Duc, A. (2013), Tesis de Doctorado, Ecole de Mines de Paris.
3. Lafleur P. y Vergnes B. (2014), Polymer Extrusion, Editorial Wiley.
4. Lozano Ramírez T (1998). Tesis de Maestría, UANL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
5. Manas-Zloczower I., Feki D.L. (2009), "Dispersive mixing of solid additives", in Manas-Zloczower I. (ed.), Mixing and Compounding of Polymers, Hanser, Munich.
6. Tadmor Z. y Gogos C.G. (2013), Principles of Polymer Processing, Editorial Wiley, Second Edition, ISBN: 978-1118393222.
7. Vergnes B., Chapet M. (2001), "Procédés d'extrusion bivi", Techniques de l'Ingénieur, vol. AM3653, pp. 1–23.

## **CAPÍTULO III**

### **EXTRUSIÓN MONOHUSILLO**

#### **3.1 Introducción**

La extrusión es una técnica de transformación de materiales termoplásticos que permite obtener objetos terminados o semiterminados mediante un proceso tecnológico continuo. La combinación de un extrusor con la adición de un material adecuado amplía la diversidad de productos fabricados. Esto permite extender la gama de productos desde perfiles rígidos y flexibles hasta la producción de películas, placas, láminas plásticas, objetos huecos, aislamiento de cables, perfiles expandidos, material granulado (pelletizado) entre otros.

El sistema de tornillo-barril es el corazón del proceso de extrusión y determina su desempeño. El flujo del material resulta de la acción de las hélices sobre el polímero en contacto con la pared interior del cilindro. Si el polímero se adhiere al tornillo, la extrusión no continúa. Por otro lado, el flujo mejora si el polímero se adhiere al cañón.

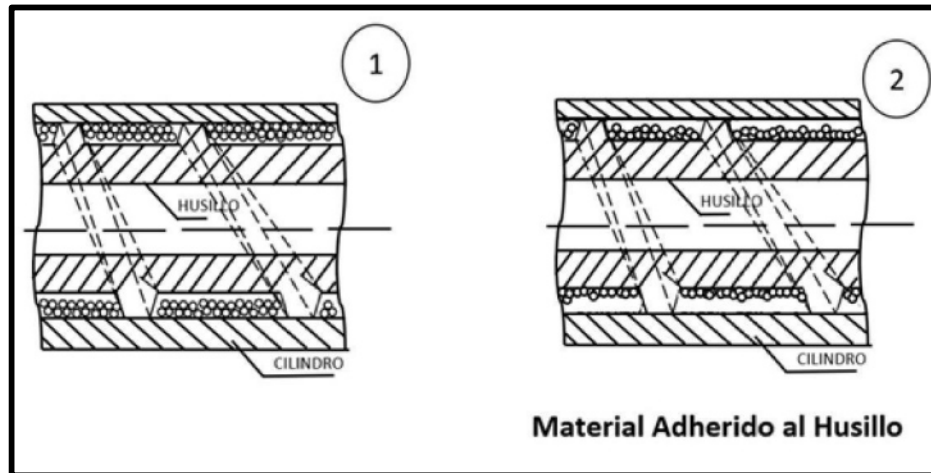
En general, un tornillo se divide en tres secciones distintas, pero interconectadas. Estas tres secciones, en orden son: zona de transporte de sólidos, zona de plastificación y zona de bombeo. Estas diferentes zonas funcionales del extrusor se analizarán individualmente.

El objetivo general de este capítulo es analizar, comprender y calcular el proceso de flujo en un extrusor monohusillo utilizando herramientas analíticas, para mejorar el diseño del tornillo o simplemente para mejorar las condiciones de procesamiento.

#### **3.2 Extrusor monohusillo**

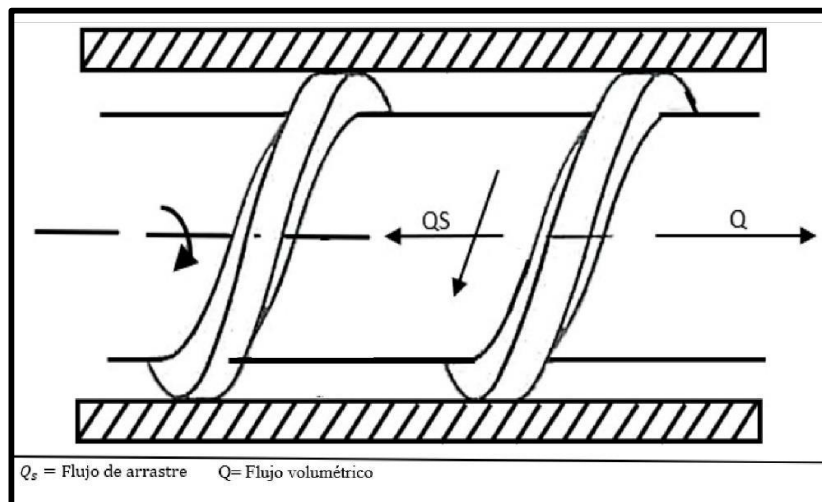
El extrusor monohusillo es por mucho, la máquina más común en la industria de transformación de termoplásticos.

La materia prima, en forma de polvo o gránulos, se introduce en el extremo de un tornillo de Arquímedes que gira dentro de un cilindro con temperatura controlada. El desplazamiento del material resulta de la acción de las hélices del tornillo sobre la materia que roza o se adhiere a la pared interna del cilindro. Si el material se adhiere al tornillo, el efecto de extrusión es nulo; por el contrario, la adherencia del material al cilindro aumenta el proceso de flujo.



**Figura 3.1** Mecanismos de adherencia del material a extruir.

Cuatro fuerzas generan la resultante que actúa sobre el material [White y col., 2001]:



**Figura 3.2** Fuerzas actuando sobre el material.

1. Flujo de transporte: El movimiento oblicuo de los filetes empuja el material a lo largo del canal.
2. La segunda fuerza es perpendicular al eje longitudinal del canal del husillo. El flujo resultante no afecta al caudal del extrusor, pero desempeña un papel importante en el mezclado del material y en la transferencia de calor.
3. La tercera fuerza actuando resulta del aumento de la presión en el cilindro y su dirección es opuesta a la dirección del flujo  $Q$  total. Su caudal =  $Q_p$ .
4. La cuarta componente de flujo,  $Q_s$  (flujo de arrastre), representa la fuga de material por el espacio entre el cilindro y la parte superior de los filetes del husillo o tornillo.

|                        |                     |                                 |
|------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Resistencia = 0        | $Q = \text{Máximo}$ | $Q_p = 0$                       |
| Resistencia = $\infty$ | $Q = 0$             | $Q_p + Q_s = \text{transporte}$ |

### 3.3 Principales elementos de los extrusores monohusillo

- Cilindro/Barril con sus Resistencias y Termopares.
- Motor y accesorios.
- Cabezal de extrusión-porta Dado(boquilla)
- Chasis.
- Centro de mando y control (Tablero).

#### 3.3.1 Husillo de Extrusión

Representa el elemento principal de la extrusor y define las capacidades de la máquina. El tornillo, que gira dentro de un cilindro calentado, es impulsado por un motor eléctrico.

- La holgura entre la parte superior de los filetes del tornillo y el cilindro varía:

$$0.08 < \delta < 0.12 \text{ mm para } \phi < 40 \text{ mm (1 1/2) plg}$$

$$0.12 < \delta < 0.18 \text{ mm para } \phi 40 < 63 \text{ mm (2 1/2)plg}$$

- La longitud del tornillo se expresa mediante el número de diámetros a los que es igual.

$$20 < \frac{L}{D} < 35$$

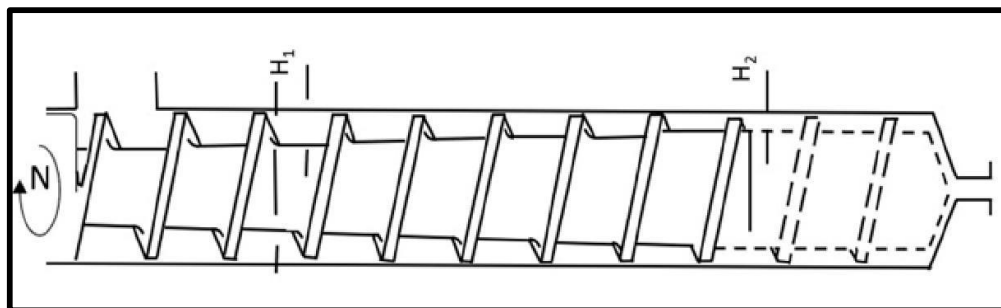
- El diseño óptimo del tornillo depende del material extruido. Puede tener un paso constante o pasos sucesivos diferentes; el tornillo puede ser cilíndrico o cónico.
- Los tornillos de acero de alta resistencia a la fatiga son templados a alta temperatura. Tienen un canal de enfriamiento, ya sea a lo largo de toda la longitud o en una sección.
- El ángulo óptimo de la hélice depende de la consistencia del material extruido (polvo  $\alpha = 30^\circ$ , gránulos  $\alpha_{opt} = 15^\circ$ . En las máquinas industriales, se utiliza un ángulo de 20 a 25 grados.

Los tornillos de extrusión se caracterizan a partir de su diámetro, de su relación L/D y de la razón de compresión.

$$\text{Razon de compresión} = \frac{\text{Sección transversal en la entrada}}{\text{Sección transversal del canal de flujo de salida}} \dots\dots\dots(3.1)$$

Como aproximación, también se puede utilizar la siguiente expresión (White y col. 2001):

$$\text{Razón de compresión} = \frac{H_1}{H_2} \dots\dots\dots(3.2)$$

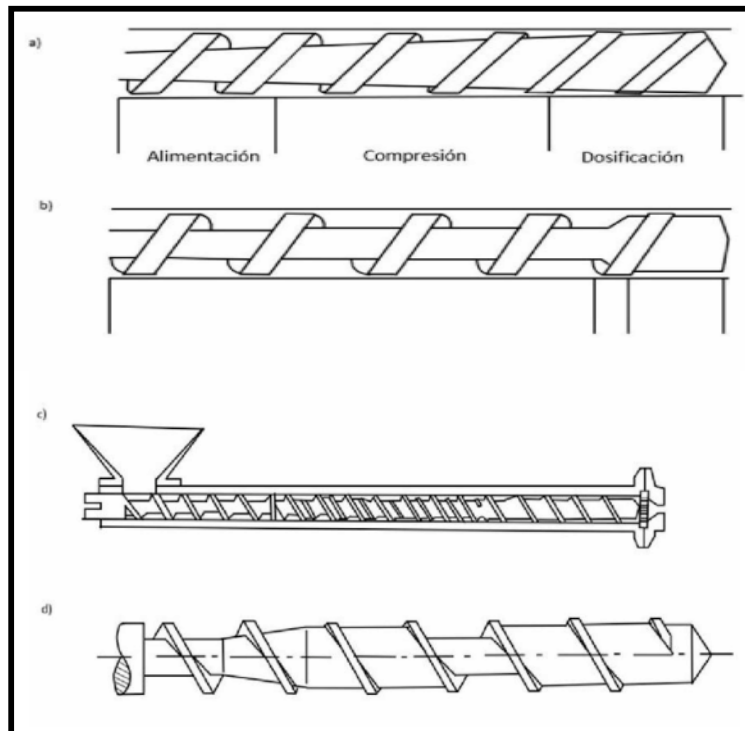


**Figura 3.3** Variaciones en la profundidad de canal del husillo.

Los fabricantes ofrecen una gran cantidad de husillos especialmente diseñados para diferentes materiales como se puede observar en la Figura 3.4. Por ejemplo, en las Figuras 3.4a y 3.4b los husillos difieren en la razón de compresión, en ambos husillos hay una disminución en la profundidad del canal. Esto hace que exista en compresión en el polímero al avanzar a lo largo del husillo, de esta manera el aire contenido es enviado hacia atrás homogenizando el polímero fundido. El husillo de la Figura 3.4a se utiliza con polímeros que tienen un intervalo amplio en la temperatura de fusión como las poliolefinas, mientras que el husillo de la Figura 3.4b se utiliza para polímeros que tienen un intervalo de fusión muy corto como el Nylon 6,6 y el PET (polímeros de Ingeniería).

Una característica muy importante en los tornillos utilizados es la denominada barrera (Fig. 3.4c), lo cual consiste en tener hélices (filetes) adicionales en ciertas zonas del extrusor. Estas hélices dividen a los canales del husillo, siendo su altura menor que las normales. El material plastificado pasa al canal posterior mientras que el material no plastificado permanece en el canal principal, haciendo la plastificación más fácil; conforme el material se mueve a lo largo del husillo, el canal del material no plastificado se hace más pequeño y el canal del plastificado más grande.

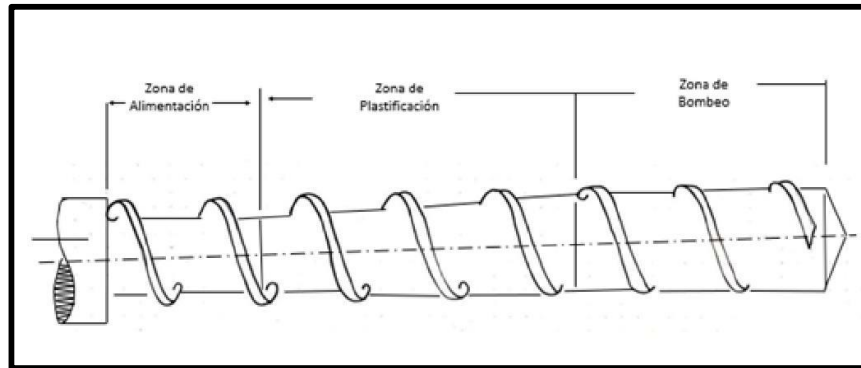
Otro tipo de husillos especiales lo son los tornillos para venteo (3.4d), estos husillos normalmente tienen un canal muy profundo en el centro del extrusor, lo cual permite eliminar la humedad o volátiles mediante vacío hecho a través de un orificio maquinado en el barril. Enseguida el plastificado se recomprime en la zona de bombeo.



**Figura 3.4** Diferentes tipos de Husillos: a) Husillo para poliolefinas, b) Husillo para polímeros de Ingeniería, c) Husillo doble barrera y d) Husillos para devolatilización.

### 3.4 Zonas funcionales del husillo

Funcionalmente, el husillo se compone de tres zonas diferentes: una zona de alimentación o entrada, una zona de compresión o plastificación y una zona de regulación también conocida como zona de bombeo.



**Figura 3.5** Zonas Funcionales del Husillo.

### 3.4.1 Zona de alimentación

Zona en la cual el polímero está completamente sólido y se desarrolla la fuerza de empuje. Para lograr esto, es necesario que el material no gire con el tornillo, sino que sea retenido en su rotación por el cilindro.

### 3.4.2 Zona de plastificación

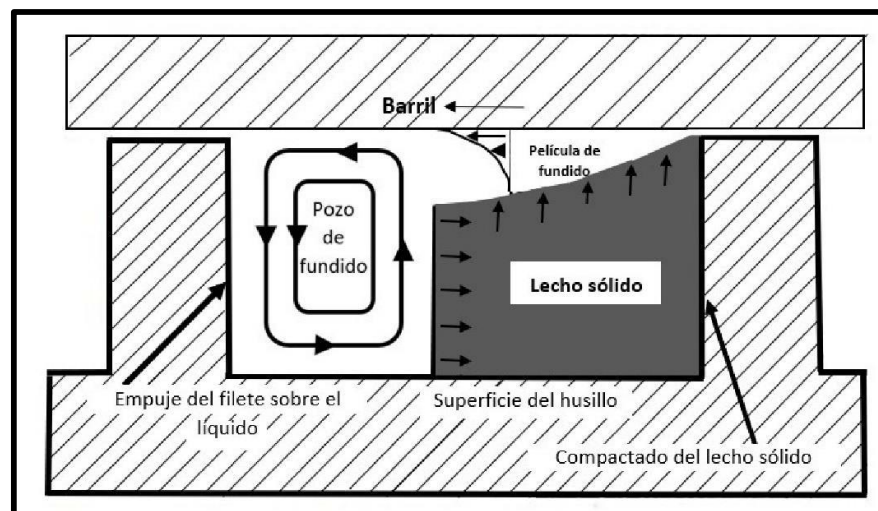
Zona en la cual coexisten el polímero sólido y el polímero fundido. La temperatura del material aumenta mediante la aportación de calor desde el exterior y por el trabajo de las fuerzas de cizallamiento dentro del material. Los gránulos se transforman gradualmente en una masa fundida, lo que se acompaña de la disminución del volumen aparente. Este fenómeno se compensa mediante el estrechamiento de la sección del canal del tornillo.

Los experimentos realizados en la extrusión muestran que la plastificación generalmente se desarrolla de manera ordenada. Estos experimentos consisten en detener la extrusión cuando está en régimen permanente, enfriar la máquina tan rápido como sea posible y tomar una muestra del polímero contenido entre el tornillo y el barril. En este punto, es fácil distinguir entre el polímero que aún estaba sólido y el que ya estaba plastificado. Se han observado experimentalmente varios mecanismos de plastificación.

La teoría de fusión original para extrusores monohusillo fue desarrollada a mediados de la década de 1960 por Tadmor (Tadmor, 1966). En el ahora clásico modelo Tadmor, el material sólido se compacta en un lecho sólido que se empuja contra el lado posterior del filete del tornillo.

Se forma una fina película fundida entre el lecho sólido y el cilindro. Se supone que la mayor parte de la fusión tiene lugar en la interface entre el lecho sólido y la película fundida. La masa fundida agregada a la película fundida es arrastrada hacia el lado de empuje del filete, donde se acumula en un pozo de masa fundida. A medida que el plástico se funde, el tamaño del lecho sólido disminuye, mientras que al mismo tiempo aumenta el tamaño del pozo de fusión. El modelo de fusión de Tadmor se muestra en la Figura 3.6.

Cabe señalar que la fusión se produce a lo largo de la mayor parte del extrusor. De hecho, la capacidad de producción de las extrusoras de plastificación está determinada frecuentemente por su capacidad de plastificación.



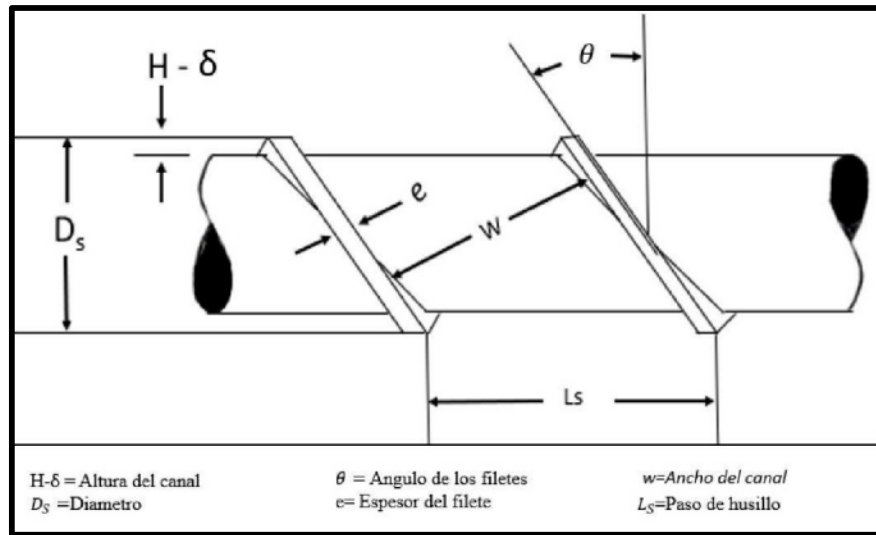
**Figura 3.6.** Modelo de Plastificación de Tadmor (Tadmor, 1966).

### 3.4.3 Zona de Bombeo

En esta zona, el polímero está completamente fundido. En esta zona se realiza el mezclado y homogeneización del material fundido. A menudo, en esta zona, se introduce una especie de elementos que aumentan el efecto de mezclado.

La zona de bombeo sirve para llevar el polímero a la presión necesaria para garantizar el flujo en el dado al caudal deseado. El concepto de zona de bombeo solo tiene sentido si está asociada a un dado que experimenta una pérdida de presión.

Esta zona es la que tiene más bases teóricas o la más fundamentada (la más sólida) para realizar cálculos del flujo del material fundido o plastificado.



**Figura 3.7** Geometría del husillo.

$D_B$  = Diámetro interior del barril

$$D_s = \text{Diámetro del husillo incluyendo los filtes: } D_s = D_B - 2\delta \dots \dots \dots (3.3)$$

$$L_s = \text{Paso del Husillo, } \tan \theta = \frac{L_s}{\pi D_s} \dots \dots \dots (3.4)$$

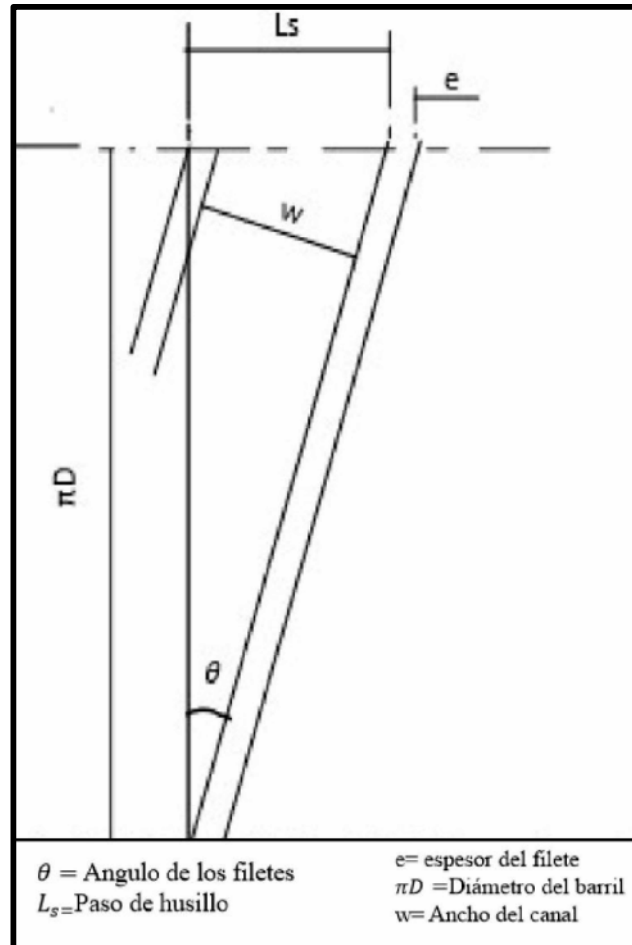
$$W = \text{ancho del canal de flujo: } W = L_s \cdot \cos \theta - e \dots \dots \dots (3.5)$$

$$W = \pi \cdot D_s \cdot \sin \theta - e \dots \dots \dots (3.6)$$

e: espesor del filete

L: Longitud del husillo

z=longitud a lo largo del canal de flujo:  $z = \frac{L}{\sin\theta}$ .....(3.7)



**Figura 3.8 .** Canal desenrollado del husillo.

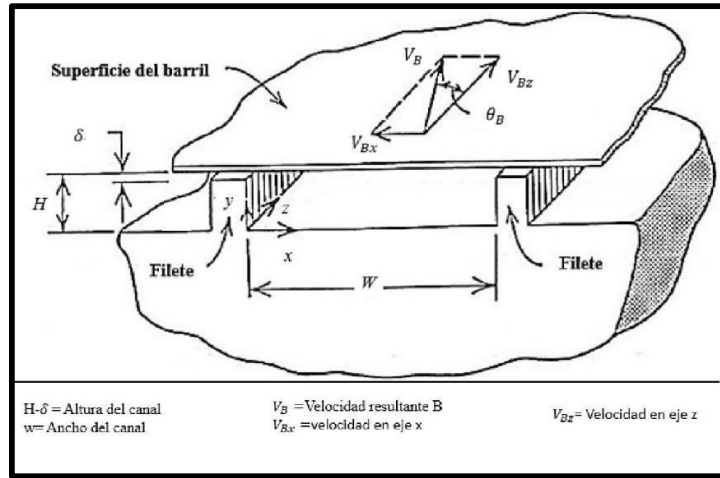
En muy común encontrar, que el paso del Husillo sea igual al diámetro del husillo.

$$L_s = D_s$$

$$\theta = 17.65^\circ$$

Para analizar el flujo en el canal formado por los filetes del tornillo, es necesario desenrollarlos. Dado que desenrollar el canal de manera recta sin distorsiones es imposible, asumiremos que el canal helicoidal puede ser sustituido por uno rectilíneo de sección rectangular.

Además, es muy difícil describir los flujos del material entre el tornillo y el barril tomando este último como fijo o estático. Es más conveniente considerar que el tornillo está fijo y que el barril gira a una velocidad angular opuesta. Podemos combinar la aproximación del tornillo estacionario con la del canal desenrollado.



**Figura 3.9** Flujo del polímero entre un canal rectangular considerando el husillo fijo y el barril girando en sentido opuesto.

$$V_{Bz} = V_B \cos \theta \dots\dots\dots (3.8)$$

$$V_{Bx} = V_B \sin \theta \dots\dots\dots (3.9)$$

$$V_B = \pi \cdot N \cdot D_B \dots\dots\dots (3.10)$$

En esta última ecuación, "N", representa la velocidad de rotación del husillo

### 3.5 Ecuaciones de flujo en la zona de bombeo

Si consideramos un flujo en la dirección z del canal, en régimen estable, utilizando una ley de comportamiento newtoniano y despreciando los términos de masa e inercia, la ecuación de equilibrio dinámico se expresa de esta manera:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left[ \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} \right] \dots\dots\dots(3.11)$$

La forma más sencilla de considerar el problema del flujo dentro de la zona de bombeo es considerar un canal con una geometría de placas paralelas. En este caso, la velocidad del fluido a lo largo del eje z es función únicamente de “y” [Lafleur y Vergnes, 2014].

Usando esta suposición, la ecuación de flujo en la dirección z se escribe como:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu \left[ \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} \right] \dots\dots\dots(3.12)$$

Asumiendo una condición sin deslizamiento en el barril y paredes del husillo e integrando la ecuación precedente se llega a la siguiente ecuación de perfil de velocidad [Lafleur y Vergnes, 2014]:

$$V_{z(y)} = V_{BZ} \frac{Y}{H} - \frac{1}{H} Y (H - Y) \frac{\partial P}{\partial z} \dots\dots\dots(3.13)$$

El flujo o gasto volumétrico se obtiene integrando a partir del perfil de velocidades [Bird y col. 1992].

$$Q = \frac{V_{BZ} \cdot W \cdot H}{2} - \frac{W \cdot H^3}{12 \cdot \mu} \frac{\partial P}{\partial z} \dots\dots\dots(3.14)$$

$$Q = \text{flujo de arrastre} + \text{flujo de presión}$$

Una extrusor siempre está acoplado a un dado que servirá para darle forma al polímero. Además de la ecuación del dado, disponemos de una relación  $Q=f(\Delta P)$  para el dado.

$$\text{Dado: } Q = k \frac{\Delta P}{\mu} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$\text{Extrusor: } Q = AN - C \frac{\Delta P}{\mu} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$\text{Con } A = \frac{\pi \cdot D_B}{2} \cdot \cos \theta W \cdot H \dots\dots\dots(3.17)$$

$$C = \frac{W \cdot H^3}{12 \cdot Z} \dots\dots\dots(3.18)$$

$$k = f(\text{geometría del dado})$$

Se pueden combinar las ecuaciones del dado y del extrusor para obtener:

$$Q = \frac{A \cdot k}{C + k} N \dots\dots\dots(3.19)$$

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot A}{C + k} N \dots\dots\dots(3.20)$$

Ecuaciones para diferentes tipos de dado (Tadmor y Gogos, 2006):

Dado (barra circular sólida)

$$K = \frac{\pi R^4}{8L} \dots\dots\dots(3.21)$$

Dado (placas)

$$K = \frac{WH^3}{12L} \dots\dots\dots(3.22)$$

$$\text{Dado (tubos concéntricos) } K = \frac{\pi R^4}{8L} [(1 - k^4) - (1 - k^2)^2] \dots\dots\dots(3.23)$$

### 3.5.1 Ecuación de flujo para un fluido obedeciendo la ley de potencia

Rauwendaal [1986] propuso la siguiente ecuación para un fluido no newtoniano:

$$Q_{BZ} = \frac{(4+n)pWHF_dV_{BZ}}{10} - \frac{pWH^{n*2}}{4(1+2n)mV^{n-1}} \frac{F_p \partial p}{\partial z} \dots\dots\dots(3.24)$$

Donde:

n=índice de potencia

F<sub>d</sub>= 1-0.571H/W (Factor de forma para flujo de dragado)

F<sub>p</sub>= 1-0.625H/W (Factor de forma para flujo de contrapresión)

La ecuación 3.24 es una aproximación que trabaja bien en el rango de índices de potencia entre 0.3 y 1.0 [Rauwendaal, 1986].

### 3.6 Elementos de mezclado

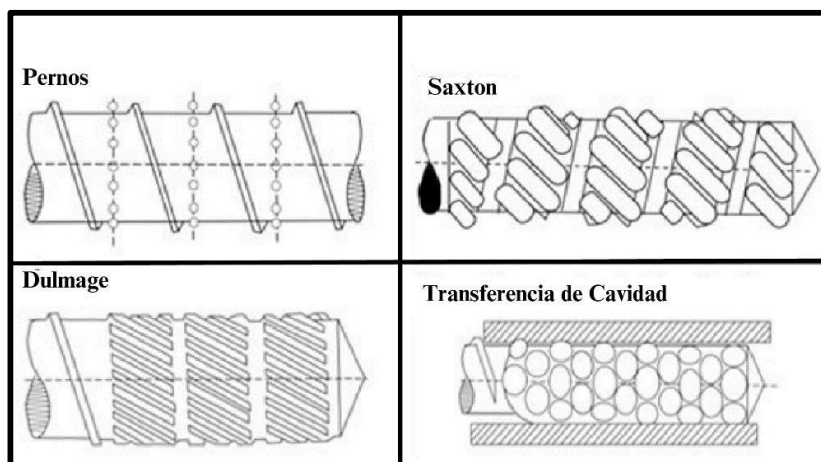
**Elementos distributivos.** - La Figura 3.10 ilustra cuatro tipos de zonas de mezclado que favorecen el mezclado distributivo [Rauwendaal, 2009]. En este caso, se pretende separar y recombinar el flujo, que es la forma más eficiente de homogeneizar la distribución del aditivo en un polímero. Los cabezales de mezclado están compuestos por pernos (pins) o canales diseñados para tal fin. Estas herramientas generalmente provocan caídas de presión y aumentos de temperatura limitados.

Las zonas de mezclado con pernos o “pins” pueden tener numerosas formas y tamaños. Normalmente se colocan en filas alrededor del canal del husillo, estos elementos inducen un nivel moderado de reorientación. Un arreglo típico tendría tres filas con una fila al comienzo de la sección de bombeo, una al centro y la otra fila estaría en el último canal de flujo. La principal ventaja es que son muy sencillos, económicos y fáciles de fabricar (White y col. 2001).

En las zonas de mezclado “Saxton”, la profundidad de los filetes es variable, con lo que se obliga a que el material se divida y reoriente continuamente, resultando en una buena capacidad de mezclado. Además, la orientación de los filetes en este tipo de mezcladores ayuda al bombeo del material hacia adelante. De esta forma se obtiene buena capacidad de mezclado, pero sin decrementar el caudal o producción del husillo (White y col. 2001).

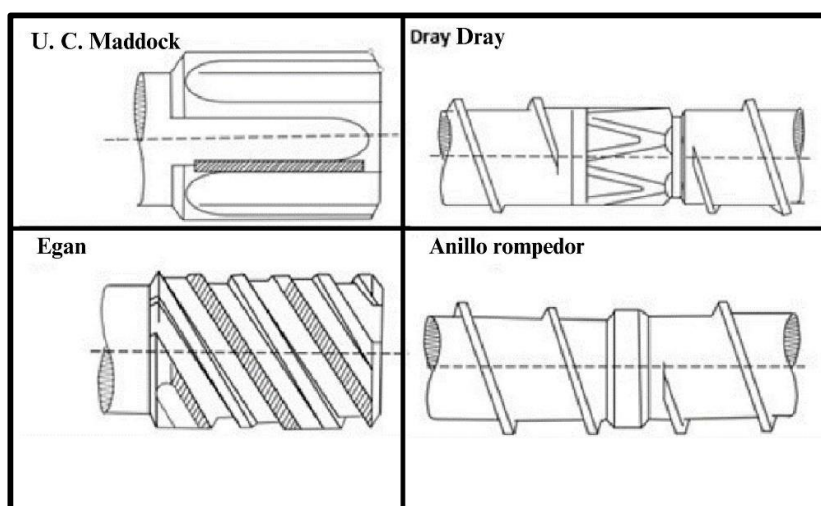
El elemento de mezclado “Dulmage” fue uno de los primeros dispositivos de mezclado [White y col. 2001]. Tiene ranuras semicirculares cortadas en un espacio largo en la misma dirección que los filetes del husillo. Generalmente hay tres o más secciones interrumpidas por secciones cilíndricas cortas. Esto interrumpe el flujo laminar, divide y recombina la masa fundida muchas veces. Todavía se utiliza para polímeros suaves o blandos (con rigidez disminuida)

Las zonas de mezclado de transferencia de cavidad consisten [Rauwendaal, 2009] de secciones el tornillo y del barril con cavidades hemisféricas. Cuando el material fundido pasa a través de esta sección, el material es frecuentemente cortado y re-orientado (lo cual es una prueba de la buena capacidad de mezclado). Sin embargo, existen algunas cuestiones prácticas que hacen que esta zona de mezclado no sea un mezclador ideal. No tiene capacidad de bombeo hacia adelante, por lo tanto, este tipo de zona de mezclado es un dispositivo que consume presión que reducirá la producción del extrusor y aumentará de manera importante la temperatura en el polímero fundido. Con las cavidades hemisféricas, no es adecuado para polímeros muy sensibles a incrementos de temperatura. Otros inconvenientes de estas zonas de transferencia de cavidad, son que implican un alto costo, son difíciles de instalar y limpiar y el barril del extrusor es difícil de limpiarlo con este tipo de elementos de mezclado.



**Figura 3.10** Zonas para mezclado distributivo.

**Elementos dispersivos.** - La Figura 3.11 muestra cuatro tipos de zonas de mezclado que aseguran la dispersión de los componentes. Para este objetivo, las partículas o aglomerados deben estar sujetos a un esfuerzo suficientemente grande como para que se rompan [MANAS-ZLOCZOWER, 2009]. Por lo tanto, el material se ve obligado a pasar a través de un espacio estrecho. Los elementos mezcladores Maddock son sin duda los más comunes para el mezclado dispersivo y a diferencia de los elementos distributivos, provocan caídas de presión adicionales y aumentos significativos de temperatura en el extremo del husillo.



**Figura 3.11** Zonas para mezclado dispersivo.

La Zona de Mezclado Maddock consiste en una serie de ranuras semicirculares opuestas a lo largo del eje del tornillo (White y col. 2001). Hay ranuras alternativas de entrada en la parte superior y las otras ranuras de descarga están en la parte inferior. También se alternan las estructuras tipo “flauta” que dividen las ranuras de entrada y descarga. El polímero se bombea hacia la ranura de entrada y a medida que el tornillo gira, la flauta de mezcla arrastra el material fundido. El material fundido acaba en la ranura de salida o descarga.

A medida que el material pasa por la flauta de mezcla, se somete a un alto cizallamiento durante un intervalo de tiempo muy corto. Posteriormente, el material se bombea saliendo de la ranura de descarga a medida que el material nuevamente ingresa a través de la flauta de mezcla.

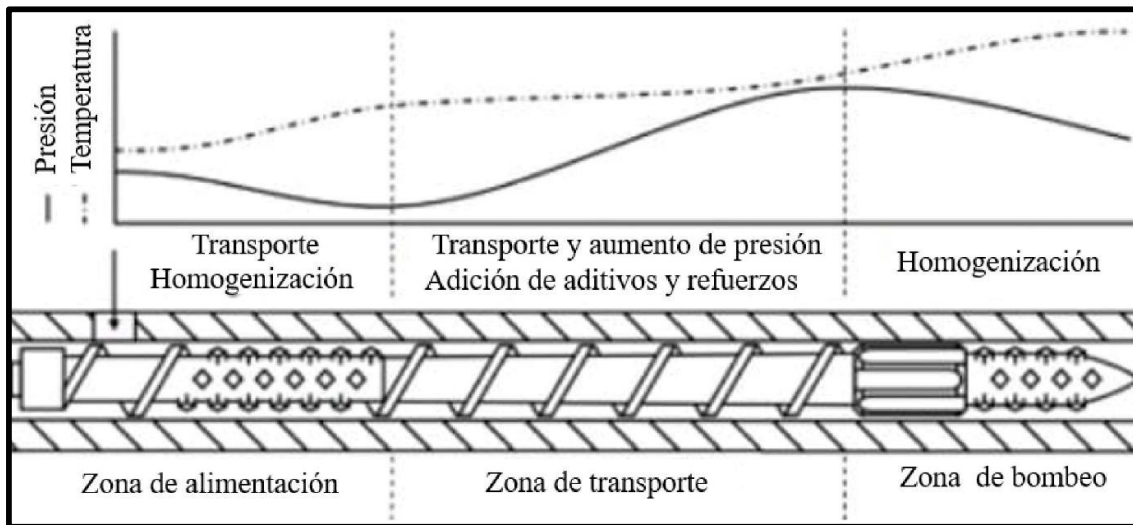
La zona de mezclado “Dray” (Dray, 1982) funciona moviendo el material de mayor viscosidad en el lado saliente del filete hacia el lado de empuje del filete, donde se mezcla con el material de menor viscosidad. El material de menor viscosidad también comienza a descender dentro de la ranura y al mismo tiempo reduciendo la velocidad de corte a la que está expuesto. A medida que el material pasa a través de la ranura, queda expuesto no sólo a la mezcla debida a los flujos convergentes sino también a la acción de arrastre provocada por el lado del filete.

Las zonas de mezclado “Egan” consisten de elementos llamados “flautas” y tiene una orientación helicoidal (Rauwendaal, 2009). Estos elementos tienen flautas de entradas y salidas separadas por filetes barrera. En la salida de esta zona, el material tiene que pasar a través de la pequeña separación de los filetes barrera, en la cual la acción de mezclado es llevada a cabo.

Las zonas de mezclado con “aro” o anillo (Rauwendaal, 2009) tienen una pequeña abertura (separación) con el barril del extrusor. Todo el material debe fluir por este espacio pequeño donde es sometido a altos esfuerzos de corte durante un periodo de tiempo muy corto. Debido a que no hay flujo de arrastre en el anillo, se provoca una caída de presión muy alta. El nivel de esfuerzos no es constante en la abertura, de esta manera la acción de mezclado no es uniforme.

En la Figura 3.12 se muestra un husillo con zona de mezclado dispersivo y distributivo, así como los perfiles de temperatura y presión. Se puede observar que la presión en la zona de

alimentación es relativamente baja y hay un aumento repentino de esta en la zona de compresión debido al transporte y a los aditivos incorporados en la matriz polimérica. La presión comienza a disminuir en la zona donde están localizados los elementos de mezclado. Se puede apreciar que los elementos de mezclado distributivo generan menos presión lo cuales muestran un desempeño no restrictivo. Estos elementos distributivos no disminuyen el flujo volumétrico lo cual es una ventaja para una mayor producción.



**Figura 3.12** Perfiles de Presión y Temperatura en un husillo para incorporar aditivos

### 3.7 Ejemplos prácticos (casos de estudio)

**Ejemplo 3.1.** Calcula el flujo volumétrico en la sección de bombeo del extrusor especificado a continuación, asumiendo una operación isotérmica y que el polímero está completamente plastificado. El tornillo gira a 32 rpm. El diámetro del extrusor es de 20.32 cm, el paso es de 20.32 cm, el espesor del filete es de 2.023 cm y la profundidad de canal es de 0.64. La viscosidad del polímero es de 3420 Pa.s. La caída de presión  $\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)$  es de 81,434  $\frac{Pa}{cm}$

Datos:

$$D_B = 20.32 \text{ cm}$$

$$L_S = 20.32 \text{ cm}$$

$$e = 2.032 \text{ cm}$$

$$H = 0.64 \text{ cm}$$

$$\mu = 3420 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right) = 81434.00 \frac{Pa}{cm}$$

**Solución**

Se calcula primeramente el ángulo de los filetes con la Ec. 3.4

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{D_S}{\pi \cdot D_B} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{20.32 \text{ cm}}{\pi \cdot 20.32 \text{ cm}} \right)$$
$$\theta = 17.66^\circ$$

El ancho del canal se calcula con la Ec. 3.5

$$W = L_S \cdot \cos \theta - e$$

$$W = (20.32 \text{ cm}) \cdot \cos(17.66^\circ) - 2.032 \text{ cm}$$

$$W = 17.33 \text{ cm}$$

La velocidad  $V_B$  con la Ec. 3.10

$$V_B = \pi \cdot N \cdot D_B$$

$$V_B = \pi \cdot (32 \text{ rev}/\text{min}) \cdot (1 \text{ min}/60 \text{ s}) \cdot (20.32 \text{ cm})$$

$$V_B = 34.05 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

La velocidad  $V_{BZ}$  con la Ec. 3.8

$$V_{BZ} = V_B \cdot \cos(17.66^\circ)$$

$$V_{BZ} = 32.44 \text{ cm/s}$$

$$Q_d = \frac{w \cdot H \cdot V_{BZ}}{2} = \frac{(17.33 \text{ cm}) \cdot (0.64 \text{ cm}) \cdot (32.44 \frac{\text{cm}}{\text{s}})}{2} = 179.90 \text{ cm}^3/\text{s}$$

El flujo de Presión  $Q_p$  (con el segundo término de la Ec. 3.14)

$$Q_p = \left( \frac{w \cdot H^3}{12\mu} \right) \cdot \frac{\Delta P}{\Delta Z} \left( \frac{(17.33 \text{ cm}) \cdot (0.64 \text{ cm})^3}{12 \cdot (3420 \text{ Pa} \cdot \text{s})} \right) \cdot \left( 81434 \frac{\text{Pa}}{\text{cm}} \right)$$

$$Q_p = 9.02 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Y finalmente el Flujo volumétrico total del extrusor.

$$Q = Q_d - Q_p = 170.88 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Se puede concluir que el Flujo de presión es relativamente bajo comparado al Flujo de arrastre. Lo cual no afecta en gran medida el flujo volumétrico total de producción

**Ejemplo 3.2.** Un extrusor industrial funciona a la misma velocidad de rotación para dos dados diferentes. Calcular la velocidad de rotación del husillo.

Datos:

Las condiciones de operación para cada uno de los dados son los siguientes:

Dado #1:  $Q = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$  y  $\Delta P = 4 \text{ MPa}$

Dado #2:  $Q = 6 \text{ cm}^3/\text{s}$  y  $\Delta P = 6 \text{ MPa}$

La geometría del extrusor es la siguiente:

Diámetro del barril (DB)= 100 mm

Profundidad de canal (H)= 5mm

Espesor de filetes (e)= 8mm

Angulo de los filetes  $\theta = 17.66^\circ$

### Solución

Como el extrusor trabaja a la misma velocidad para ambos dados se igualan las velocidades de rotación (ver Ec. 3.16)

$$N = \frac{\left(Q_1 + \frac{C \Delta P_1}{\pi}\right)}{A} = \frac{\left(Q_2 + \frac{C \Delta P_2}{\pi}\right)}{A}$$

$$Q_1 + \frac{C \Delta P_1}{\mu} = Q_2 + \frac{C \Delta P_2}{\mu}$$

$$\frac{C \Delta P_1}{\mu} - \frac{C \Delta P_2}{\mu} = Q_2 - Q_1$$

$$\frac{C}{\mu} (\Delta P_1 - \Delta P_2) = Q_2 - Q_1$$

$$\frac{C}{\mu} = \frac{(Q_2 - Q_1)}{(\Delta P_1 - \Delta P_2)}$$

$$\frac{C}{\mu} = \frac{((6 \times 10^{-6}) - (10 \times 10^{-6}))}{((4 \times 10^6) - (6 \times 10^6))}$$

Igualando las velocidades de rotación, agrupando términos y sacando factor común se llega a la siguiente relación.

$$\frac{C}{\mu} = 2 \times 10^{-12} \frac{m^5}{N_s}$$

$$W = D_B \cos \theta - e = (100 \text{ mm}) \cos 1766^\circ - 8 \text{ mm} = 87.287 \text{ mm} = 0.0873 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi D_B}{2} \cos \theta W H = \frac{\pi (0.1 \text{ m})}{2} \cos (17.66^\circ) (0.0873 \text{ m}) (0.005 \text{ m}) = 6.5310^{-4} \text{ m}^3$$

Con la relación  $C/\mu$ , y con la Ec. 3.16, se obtiene la velocidad de rotación  $N$  para cada dado:

$$N_1 = \frac{\left(Q_1 \frac{C \Delta P_1}{\mu}\right)}{A} = \frac{\left((10 \times 10^{-6})((2 \times 10^{-12})(4 \times 10^6))\right)}{(6.53 \times 10^{-4} \text{ m}^3)} = \frac{0.276}{s}$$

$$N_2 = \frac{\left(Q_2 \frac{C \Delta P_2}{\mu}\right)}{A} = \frac{\left((6 \times 10^{-6})((2 \times 10^{-12})(6 \times 10^6))\right)}{(6.53 \times 10^{-4} \text{ m}^3)} = 0.276 \text{ rps}$$

$$N_2 = 16.53 \text{ rpm} = 0.256 \text{ rps}$$

Con esto se comprueba que la velocidad de rotación es la misma para cada dado.

**Ejemplo 3.3.** Para el mismo extrusor del ejemplo 3.1 calcular el flujo volumétrico Q, considerando un fluido no-newtoniano siguiendo la ley de potencia de viscosidad ( $m = 108455 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0.35}$ ,  $n = 0.35$ ).

### Solución

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{L_2}{\pi D_S}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{20.32 \text{ cm}}{\pi(20.32 \text{ cm})}\right)$$

$$\theta = 17.66^\circ$$

$$V_B = \pi N D_B$$

$$V_B = \pi \left(32 \frac{\text{rev}}{\text{min}}\right) (20.32 \text{ cm})$$

$$V_B = 34.05 \frac{\text{cm}}{\text{sg}}$$

$$V_{BZ} = V_B (\cos 17.66^\circ)$$

$$V_{BZ} = 32.44 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$

$$W = L_S \cos \theta - e$$

$$F_d = 1 - 0.571 \left(\frac{0.64 \text{ cm}}{17.33 \text{ cm}}\right) = 0.979$$

$$F_p = 1 - 0.625 \left(\frac{0.64 \text{ cm}}{17.33 \text{ cm}}\right) = 0.977$$

Usando Ec. 24

$$Q = \frac{(4 + n) P W H F_d V_{BZ}}{10} - \frac{P W H^{n+2} F_p}{4(1 + 2n) m V^{n-1}} \left[\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right]$$

$$Q = \frac{(4 + 0.35) 1 (17.33 \text{ cm}) (0.64 \text{ cm}) (0.979) \left(32.44 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}\right)}{10} - \frac{(1) (17.33 \text{ cm}) (0.64)^{2.35} (0.977) \left(81434.25 \frac{\text{Pa}}{\Delta Z}\right)}{4(1.7) \left(108,445 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0.35} \left(32.44 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}\right)\right)}$$

$$Q = 153.08 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} - 6.29 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$$

$$Q = 146.79 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$$

Comparando este resultado con el obtenido en Ejemplo 3.1 (para el caso de un fluido newtoniano) hay una diferencia de 14%, lo cual es un resultado bastante aceptable. La diferencia no es significativa

## REFERENCIAS

1. Bird R.B, Stewart W.E, Lightfoot E.N. (2020), Fenómenos de Transporte, Editorial Reverté, Barcelona.
2. Dray, R. (1982). US.Patent, 4,444,507.
3. Kohlgrüber K, Bierdel M, Rust H. (2022), Plastics Compounding and Polymer Processing, Hanser, Munich.
4. Lafleur P. and Vergnes B. (2014), Polymer Extrusion, Editorial Wiley.
5. Manas-Zloczower I., Feke D.L. (2009). “Dispersive mixing of solid additives”, in Manas-Zloczower I. (ed.), Mixing and Compounding of Polymers, Hanser, Munich.
6. Rauwendaal C (1986), Polymer Extrusion, Hanser Verlag.
7. Rauwendaal C. (2009), “Mixing in single screw extruders”, in MANASZLOCZOWER I. (ed.), Mixing and Compounding of Polymers, Hanser, Munich.
8. Tadmor Z. (1966), Polym. Eng. Sci, 6, 185.
9. Tadmor Z, and Gogos C.G. (2006), Principles of Polymer Processing, Editorial Wiley, Second Edition.
10. White J. L, Coran A.Y y Abdelsamie M. (2001), Polymer Mixing, Hanser, Munich.

## CAPÍTULO IV EXTRUSIÓN DE PERFILES

### 4.1 Introducción

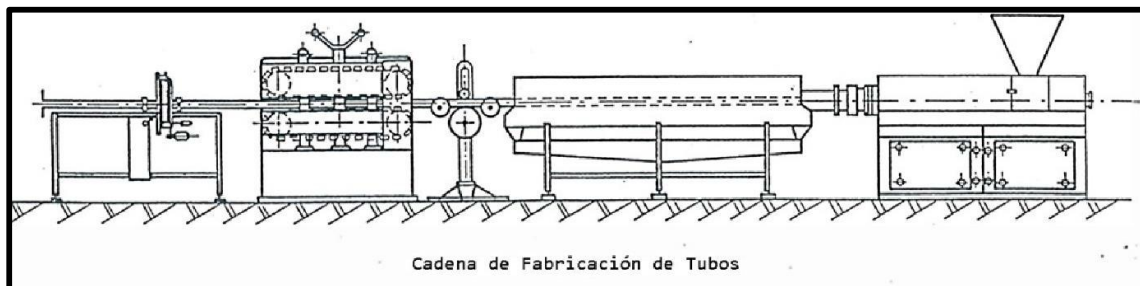
Los perfiles obtenidos mediante la extrusión de materiales termoplásticos pueden ser cilíndricos sólidos (barras), cilíndricos huecos (tuberías, tubos) o tomar formas variadas (placas, perfiles para ventanas, etc.).

En este capítulo se estudiarán perfiles huecos y sólidos, revisando los problemas encontrados y el enfoque teórico para el cálculo de los flujos en los correspondientes dados de producción.

### 4.2 Línea de producción de perfiles

Una instalación de extrusión de perfiles incluye:

- Extrusor
- El conjunto cabezal-dado
- El sistema de enfriamiento
- El sistema de estirado (oruga o transportador de banda)
- El sistema de recepción del perfil: corte para los perfiles o tubos rígidos, enrollamiento en carretes para los perfiles flexibles.



**Figura 4.1** Línea Completa de Producción de Tubos (Lafleur y Vergnes, 2014).

### 4.3 Extrusores

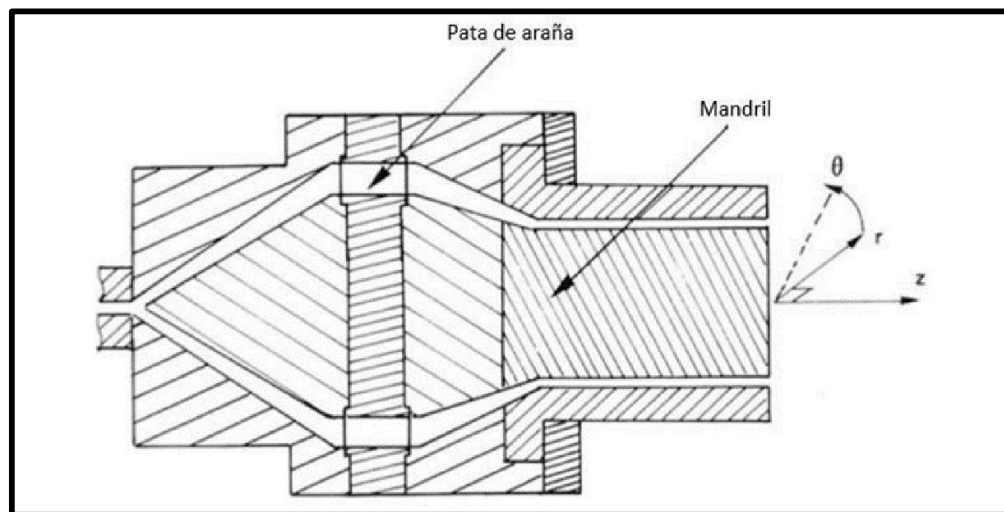
Se utilizará un extrusor monohusillo para la transformación de materiales termoplásticos que se presentan en forma de gránulos.

Para la extrusión de mezclas en polvo, especialmente los compuestos vinílicos "Dry Mix", se preferirán los extrusores de doble husillo.

### 4.4 Conjunto Cabezal-Dado

La función de un dado de extrusión es dar forma a la masa fundida llevada por el tornillo en una sección transversal específica. En el diseño de un dado, se debe considerar el costo del dado en función de la importancia de las series de producción, la facilidad de fabricación y la posible adaptación a la producción de otros perfiles. Se debe prever un desmontaje rápido para facilitar la limpieza.

#### 4.4.1 Tuberías y tubos



**Figura 4.2** Dado soportado por pata de araña (Lafleur y Vergnes, 2014).

Este dado de la Figura 4.2 es una herramienta axisimétrica compuesta por un mandril fijado a la carcasa exterior mediante una serie de patas de araña, regularmente espaciadas alrededor del

mandril. El polímero fundido que llega del extrusor se distribuye primero alrededor del mandril y luego fluye alrededor de las patas de araña, antes de entrar en la zona final con un espacio constante que dará las dimensiones al tubo. Con este tipo de dado, se puede producir una gran variedad de tubos, desde catéteres médicos de varios milímetros hasta tuberías de agua de 2 m de diámetro.

#### **4.4.2 Tipo de dados para perfiles**

Se utilizan tres tipos de dados de extrusión de perfiles:

1. Monoplaca
2. Multiplaca
3. Dado con trayectoria de flujo perfilado.

**Dado monoplaca.-** El dado monoplaca está compuesto por una conector y una placa en la cual un orificio permite la extrusión en la forma deseada. En este dado, hay cambios abruptos en la trayectoria de flujo y zonas de estancamiento significativas. Esto es especialmente problemático para los materiales que son propensos a la degradación térmica.

Este dado es simple y económico, pero no permite caudales de extrusión elevados y no puede utilizarse para obtener perfiles que deban cumplir con tolerancias dimensionales estrictas. Los dados monoplaca se utilizan principalmente en la extrusión de elastómeros termoplásticos.

**Dado multiplaca.-** Este tipo de dado está compuesto por:

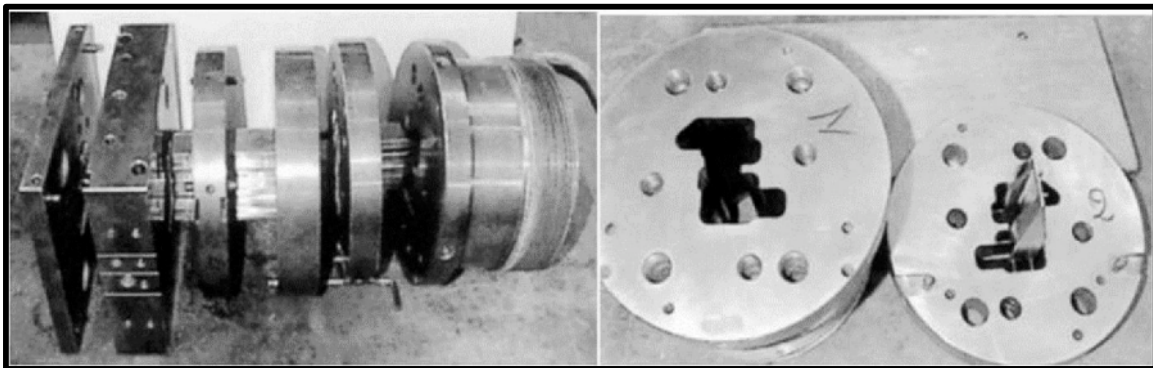
- Un conector
- Una o varias placas intermedias
- Una placa con geometría constante

La parte conectadora servirá para conectar el dado al extrusor. Las placas intermedias permiten llevar la trayectoria de flujo desde una sección circular (extrusor) hasta la sección final por pequeños segmentos.

Esto permite reducir las zonas de estancamiento y evitar cambios demasiado bruscos en la trayectoria del flujo. Esta sección también permite "equilibrar" el flujo en el dado. Es decir, garantizar un avance del frente de flujo lo más constante posible.

Esta sección de geometría constante permite que el fluido "olvide" parcialmente su historial de deformación y se fusione de manera efectiva.

Los dados multiplaca son fáciles de maquinar, montar, desmontar y limpiar. Permiten fabricar piezas más precisas y con un mayor caudal que los dados monoplaca y son ampliamente utilizadas en la industria de perfiles.



**Figura 4.3** Configuración de Dado multiplacas (Saint-Gobain Seva).

#### **Dado con trayectoria de flujo perfilado**

Este tipo de dado es técnicamente ideal. Elimina estancamientos y cambios bruscos y permite obtener dimensiones muy precisas. Sin embargo, su maquinado es tardado y costoso para perfiles simples y es prácticamente imposible en casos más complejos. Raramente se utiliza en la extrusión de perfiles.

Tres fenómenos afectan la geometría y las dimensiones del perfil entre su salida del dado y su completa solidificación:

- El hinchamiento postextrusión
- El estiramiento
- La contracción

El estiramiento se debe a la fuerza de tracción necesaria para guiar el perfil en el equipo de enfriamiento. Dado que el estiramiento puede modificar la forma del perfil, se reduce al mínimo. Un estiramiento que reduce las dimensiones del perfil en un 10% (después del hinchamiento) se considera normal y puede considerarse isotrópico.

La contracción es el cambio de dimensión debido a la diferencia de densidad entre el perfil caliente y el perfil enfriado y solidificado. La contracción se evalúa fácilmente a partir de un diagrama PVT y se considera isotrópico.

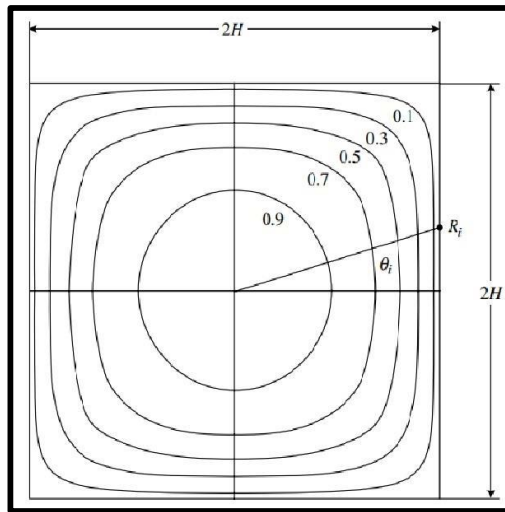
El hinchamiento post extrusión es un problema más significativo. El hinchamiento es una manifestación de la relajación de las tensiones elásticas en la salida del dado. Se asocia con la relajación de dos tipos de tensiones/esfuerzos:

- 1- La relajación de las tensiones normales que se crean durante el flujo en el dado (de cualquier fluido viscoelástico) y que está relacionada con el campo de deformación en cizallamiento. A este primer mecanismo se le llama "Relajación de los esfuerzos normales".
- 2- La relajación de las tensiones en elongación inducidas en la entrada del dado. A este segundo mecanismo se le llama "Efecto memoria" debido a la disminución de su influencia con el tiempo de residencia del polímero en el dado.

El hinchamiento ocurre principalmente en la dirección donde la velocidad de corte es máxima. Así, durante la extrusión de un rectángulo delgado, el grosor se verá más afectado que el ancho. Por lo tanto, el hinchamiento no es isotrópico.

El hinchamiento varía especialmente con el caudal, la geometría del dado (relación longitud sobre diámetro, longitud sobre grosor, etc.) y, por supuesto, según el polímero extruido. Para dar una idea general, un extruido circular (capilar) de PVC puede hincharse hasta 1.5 veces el diámetro del capilar (2.25 veces el área de la sección). Un polietileno puede hincharse hasta 3 veces el diámetro del capilar (9 veces el área del dado).

La geometría final del dado debe tener en cuenta el hinchamiento, el estiramiento y la retracción para obtener un perfil que cumpla con las tolerancias dimensionales establecidas. Esto no es fácil, especialmente debido al hinchamiento post extrusión, que es difícil de prever. Como resultado, el diseño se realiza mediante prueba y error y depende en gran medida de la experiencia de los técnicos de maquinado. El ejemplo de un dado sección cuadrada se presenta en a figura 4.4.



**Figura 4.4** Dado Sección Cuadrada (Tadmor y Gogos, 2006).

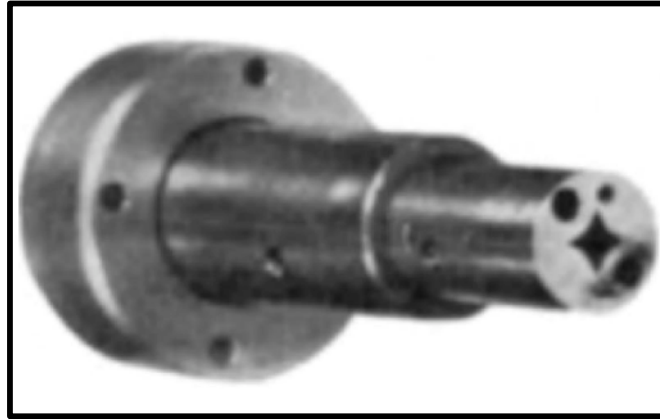
Perfil de velocidad longitudinal ( $V_z$ )

$\frac{dV_z}{dr}$  es función del ángulo  $\theta$

Cuando  $\theta = \pi/2$   $\Delta V_z / \Delta r$  son grandes

Cuando  $\theta = \pi/4$   $\Delta V_z / \Delta r$  son pequeños

Para un polímero fluyendo en una matriz cuadrada, el hinchamiento será más pronunciado en el centro de cada uno de los lados. Para producir una sección cuadrada, es necesario extruir una sección con la siguiente forma:



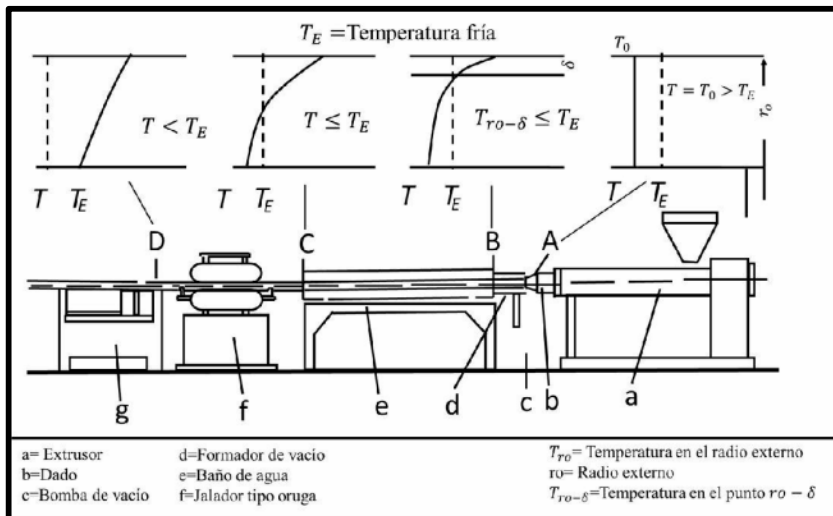
**Figura 4.5** Configuración para la fabricación de perfiles con sección cuadrada.

#### **4.5 Enfriamiento**

El enfriamiento directo al aire se utiliza para perfiles planos que no sufren deformaciones, o para perfiles muy delgados que se enfrían rápidamente al contacto con el aire. Este enfriamiento se realiza normalmente en el equipo de estirado o jalado del perfil. Se aplica especialmente a los perfiles de PVC flexible.

El enfriamiento directo con agua se aplica a perfiles un poco más complejos. Se realiza al pasar el perfil por una tina de agua. Antes de ingresar a la tina, el perfil suele ser roceado directo con agua desde la salida del dado, mediante un chorro de agua fría. Este proceso es simple, económico, eficiente, pero solo se aplica a perfiles para los cuales no se exigen dimensiones muy precisas.

En caso contrario, se prefiere el enfriamiento con calibrado (o conformado). Cuando un perfil sale del dado, aún se encuentra en un estado viscoso y es necesario enfriarlo continuamente mientras se mantiene en la forma y dimensiones requeridas.



**Figura 4.6** Línea de extrusión con tina de agua para enfriamiento (Lafleur y Vergnes, 2014).

#### 4.5.1 Calibración de los tubos

Existen dos sistemas de calibrado para tubos.

- Calibrado bajo presión
- Calibrado al vacío

En el calibrado bajo presión, el tubo termoplástico, en uno de sus extremos sellado, pasa a través del calibrador y se expande continuamente mediante la presión de aire proveniente de un conducto practicado en el mandril. La superficie exterior del tubo está en contacto con la superficie interior enfriada del calibrador. La presión de aire puede variar entre 0.03 y 3 bares, dependiendo del grosor del tubo y la viscosidad del material.

La longitud del tubo de calibrado debe ser tal que el tubo termoplástico se endurezca lo suficiente en su superficie exterior durante el período de contacto y a una cierta profundidad, para evitar la explosión al salir del calibrador, antes de su paso por la tina de enfriamiento.

Siempre es preferible utilizar un calibrador corto y un enfriamiento intensivo, ya que un calibrador largo, que provoca un alto nivel de fricción, puede introducir deformaciones y requerir un sistema de estirado más potente.

En la calibración al vacío, el sistema es idéntico, pero es el vacío el que garantiza el contacto necesario de deslizamiento. De esta manera, se evita la introducción de un tapón en el interior del tubo. Este mismo principio se aplica a la calibración de perfiles huecos.

#### 4.6 Jalado/Estirado

Principalmente se utilizan estiradoras de oruga. Estas consisten en dos bandas sin fin que pueden ser presionadas contra el producto extruido. En las correas sin fin, hay una serie de cojines resilientes que rápidamente adoptan la forma de la sección. Las correas son soportadas, en la zona de contacto, por una serie de pequeños rodillos de acero que aseguran el contacto con el material extruido. Las distancias entre las bandas son ajustables.



**Figura 4.7** Jalador tipo oruga para perfiles (Comprado a *BEUTELSPACHER S.A de C.V.*).

## **4.7 Recepción De Los Perfiles Terminados**

Los tubos y los perfiles flexibles pueden enrollarse en un carrete controlado por un embrague deslizante y un motor de velocidad variable. Dos bobinas, montadas una al lado de la otra, pueden ser puestas en funcionamiento de manera que se pueda iniciar la bobina nueva tan pronto como la anterior esté llena.

Para los tubos y perfiles rígidos, se requiere un mecanismo de corte. Se utiliza una sierra circular fijada al perfil y moviéndose con él. Existen equipos de manipulación automática de tubos y perfiles que permiten cortar el producto en longitudes precisas que luego son apiladas en un carrito adyacente.

## **4.8 Materiales**

Todas las materias termoplásticas pueden ser transformadas por extrusión en tubos o en perfiles. Los materiales más comúnmente utilizados en este método de transformación son los siguientes.

### **4.8.1 PVC Flexible**

El PVC plastificado es una mezcla compuesta de polímero, plastificantes, estabilizantes térmicos y lubricantes. La extrusión se realiza principalmente a partir de gránulos, en extrusores monohusillo de 20 a 30 veces el diámetro del tornillo. Las temperaturas de procesamiento dependen del contenido de plastificantes. Van desde 90°C a 145°C, desde la alimentación hasta el dado, para un producto muy plastificado (60/40), y de 110°C a 175°C, para un producto poco plastificado (75/25). La transformación a partir de mezclas secas se utiliza poco (en grandes producciones). En estos casos, se requieren extrusores de doble husillo.

Los principales artículos producidos son: tuberías (riego, gas, etc.), perfiles de relleno, umbrales de puertas, pasamanos de escaleras, zoclo paredes, tubos para uso médico, etc. PVC Rígido

#### **4.8.2 PVC Rígido**

El mercado más importante está constituido por los tubos para el transporte y evacuación de líquidos. En general, para la extrusión, se parte de mezclas secas (Dry mix). A veces se añade un pequeño porcentaje de elastómero para mejorar la resistencia al impacto.

Las extrusoras utilizadas son de doble husillo de 15 a 20 veces el diámetro del tornillo. Las temperaturas varían entre 130°C en la alimentación y 190°C en el dado.

Principales aplicaciones: tubos para evacuación de agua, canalones, tubos de drenaje, fundas de protección para tuberías subterráneas, etc.

Para la fabricación de perfiles rígidos, se utiliza la misma técnica de extrusión que para los tubos flexibles. Las aplicaciones son las siguientes: canaletas eléctricas, persianas enrollables, persianas fijas, perfiles para ventanas, etc.

#### **4.8.3 Poliolefinas**

El polietileno de baja densidad (PEBD) se transforma mediante extrusión en perfiles, pero principalmente en tubos. Los tubos de PEBD son muy apreciados en agricultura, ya que, al no tener la rigidez del PVC, pueden enrollarse en carretes de gran diámetro y transportarse, enrollados, hasta los lugares de uso. Allí, se desenrollan en la zanja a lo largo de grandes distancias. De esta manera, se evitan el pegado y la soldadura como en el caso del PVC rígido.

Se utilizan gránulos con un Índice de Fluidez (IF) inferior a 0.7 y una densidad de 0.925. Este PEBD suele ser de color negro, utilizando negro de carbono para evitar un envejecimiento prematuro. Se extruye en extrusores moonhusillo de 15 a 24 veces el diámetro del tornillo, con una relación de compresión de 3, entre 150°C (entrada) y 200°C (dado).

El polietileno de alta densidad (PEAD) se utiliza menos. Produce productos más rígidos. La extrusión de los gránulos se realiza en extrusoras de tornillo único de 20 a 24 veces el diámetro

del tornillo, con una relación de compresión de 3 a 5. Las temperaturas de extrusión son de 200°C en la entrada y de 210°C en el dado.

El polipropileno (PP) se extruye en tubos y láminas, pero en cantidades pequeñas. La extrusión de los gránulos se realiza en extrusores monohusillo de 20 a 24 veces el diámetro del tornillo, con una relación de compresión de 3. Las temperaturas de extrusión son de 220°C en la entrada y de 260°C en el dado.

#### 4.9 Diseño de dados

En el diseño de dados son muy importantes las siguientes etapas que desarrolla el polímero:

- 1) Expansión en la salida del dado
- 2) Contracción durante el enfriamiento
- 3) Estiramiento del perfil.

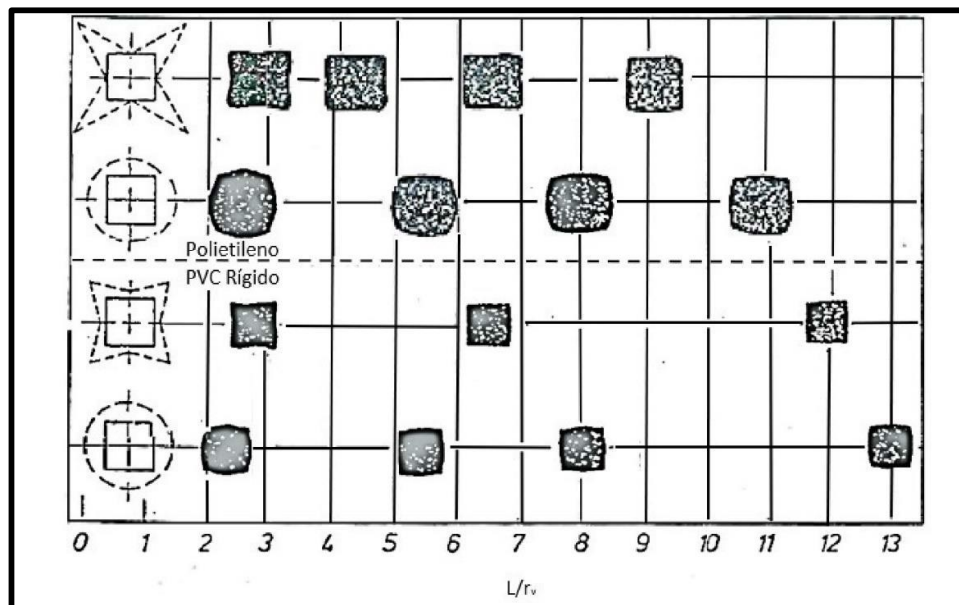
- 1) La expansión es más importante en el producto obtenido que en el dado.
- 2) En lo que respecta a la contracción esta es a la inversa, es más importante en el dado que en el producto extruido.

| En la salida del dado         | Pieza solidificada            |
|-------------------------------|-------------------------------|
| $\rho M = 0.8 \text{ g/cm}^3$ | $\rho S = 0.4 \text{ g/cm}^3$ |
| $W = 0.8 \text{ g}$           | $W = 0.8 \text{ g}$           |
| $V = 1 \text{ cm}^3$          | $V = 0.851 \text{ cm}^3$      |

Por ejemplo, en la salida del dado el peso del producto es el mismo, la densidad aumenta ligeramente en el producto y el volumen de este decremента de manera no muy significativa.

- 3) El estiramiento tiene efectos más importantes en el dado que en el producto obtenido. En el dado el polímero todavía está fundido y es más fácil de deformarlo comparado al estado completamente sólido.

En la Figura 4.8 se presentan en la primera columna, la sección deseada del perfil en línea continuas y la forma del dado se en líneas punteadas. De esta Figura se observa que a mayor relación entre Longitud del dado/radio del dado ( $L/r$ ) el perfil tiene una mejor uniformidad en las dimensiones.



**Figura 4.8** Guía para diseño de dados para perfiles cuadrados (Tadmor y Gogos, 2006).

#### 4.9.1 Ecuaciones de Flujo

El flujo en dados de perfiles puede ser estudiado mediante expresiones analíticas para un flujo Poiseuille. En capítulo 3 se dio la constante "k" para dados de flujo en un tubo (barras sólidas circulares), placas y tubos concéntricos (fabricación de tubos). Nos concentraremos con estas geometrías para realizar cálculos del sistema extrusor-dado. Para más perfiles ver referencia de [Tadmor y Gogos, 2006].

**Ejemplo 4.1** Un extrusor de 2 plg de diámetro alimenta un dado rectangular para la fabricación de placas. Las dimensiones del dado son las siguientes: 3 plg de longitud, 1 plg de ancho y 0.8 plg de espesor. Los parámetros geométricos del extrusor están dados en la siguiente tabla. Se considera que el fluido es newtoniano y su viscosidad es de 0.2 Psi.s. Para una velocidad de rotación de 60 rpm, calcule la caída de presión ( $\Delta P$ , en psi) y el gasto (*en cm<sup>3</sup>/min*) del sistema extrusor dado.

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| Longitud lineal del extrusor | 14.75 plg |
| Diámetro del husillo, $D_s$  | 1.982 plg |
| Profundidad del canal, $H$   | 0.166 plg |
| Angulo de los filetes, $D$   | 30°       |
| Anchas del canal, $W$        | 3.11 in   |

$$D_B = (\text{a partir de los datos } D_s)$$

$$k = \frac{WH^3}{12L} = \frac{1(0.8)^3}{(12)(3)} = 1.42 \times 10^{-2} \text{plg}^3$$

$$z = \frac{L}{\text{Sen}\theta} = \frac{14.75}{\text{Sen } 30^\circ} = 29.5 \text{plg}$$

$$C = \frac{WH^3}{12z} = \frac{(3.11)(0.166)^3}{(12)(29.5)} = 4.01 \times 10^{-5} \text{plg}^3$$

$$A = \left(\frac{\pi D_B}{2}\right) \text{Cos}\theta WH = \left[\frac{\pi 2}{2}\right] \text{Cos}30^\circ (3.11)(0.166) = 1.4045 \text{plg}^3$$

$$Q = \frac{A \cdot K}{C + K} N = \left[ \frac{(1.4045)(1.42 \times 10^{-2})}{(4.01 \times 10^{-5} + 1.42 \times 10^{-2})} \right] 60 = 84.04 \text{plg}^3/\text{min}$$

$$\Delta P = \left(\frac{\mu A}{c + K}\right) N = \left[ \frac{(0.2)(1.4045)}{4.0186 \times 10^{-5} + 1.42 \times 10^{-2}} \right]$$

$$\Delta P = 19.73 \text{Psi}$$

**Ejemplo 4.2.** Una barra circular solida se fabrica a partir de un monohusillo y de un dado tubular. Calcular la velocidad de rotación en rpm del tornillo para una caída de presión ( $\Delta P$ ) de  $18 \times 10^6 Pa$

$$\mu = 1000 Pa \cdot s$$

Extrusor

Dado

$$D_{13} = 60 mm = 6 cm$$

$$D = 1 cm$$

$$D_s = 59.5 mm = 5.95 cm$$

$$L = 5 cm$$

Combinando 3.16 y 3.15

$$H = 5 mm = 0.5 cm$$

$$Q = AN - \frac{C \Delta P}{\mu} = \frac{K \Delta P}{\mu}$$

$$L = 20 cm$$

Se despeja "N"

$$\theta = 17.7^\circ$$

$$N = \left( \frac{K \Delta P}{\mu} + \frac{C \Delta P}{\mu} \right) \frac{1}{A}$$

$$E = 2 mm = 0.2 cm$$

$$N = \frac{\Delta P (K + C)}{\mu A}$$

Con Ec. 3.6 se calcula ancho del canal

$$W = \pi D_s \sin \theta - e = \pi (5.95 cm) (\sin 17.7^\circ) - 0.2 cm \quad W = 5.48 cm$$

Con Ec. 3.17 se calcula A

$$A = \frac{\pi D_B}{2} \cos \theta \quad WH = \frac{\pi (6 cm)}{2} (\cos 17.7^\circ) (5.48 cm) (0.5 cm) = 24.83 cm$$

Z se calcula con Ec. 3.7

$$Z = \frac{L}{\sin \theta} = \frac{20 cm}{\sin 17.7^\circ} = 65.78 cm$$

C se calcula con la Ec. 3.18

$$C = \frac{w H^3}{12 Z}$$

$$C = \frac{(5.48)(0.5 cm)^3}{12(65.78 cm)} = 8.7584 \times 10^{-4}$$

La constante k del dado se calcula con la Ecuación 3.21

$$K_{tubos} = \frac{\pi R^4}{8L} = \frac{\pi \left(\frac{1 \text{ cm}}{2}\right)^4}{8 (5 \text{ cm})} = 4.71 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$$

Finalmente se evalúa la velocidad de rotación

$$N = \frac{18 \times 10^6 \text{ Pa} (4.71 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 + 8.7584 \times 10^{-4} \text{ cm}^3)}{(1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}) (24.8305 \text{ cm}^3)}$$

$$N = 4.1943 \frac{1}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 251.65 \text{ rpm}$$

**Ejemplo 4.3.** Un extrusor monohusillo está acoplado a un dado anular (tubos concéntricos) para la fabricación de tubos huecos. Las dimensiones del extrusor y el dado son las siguientes:

Extrusor:

Diámetro del barril:  $D_B = 120 \text{ mm}$

$L/D=24$

Longitud de la zona de bombeo  $L= 8 D$

Profundidad de los filetes,  $H=5 \text{ mm}$

Espesor del filete,  $e = 5 \text{ mm}$

Velocidad de rotación  $N=60 \text{ rpm}$

Angulo de los filetes  $\Theta=20$

Dado:

Radio interior (kR)=1.2cm

Radio Exterior (R)= 1.6 cm

El polímero puede ser considerado como newtoniano con una viscosidad de 1000 Pa.s. El sensor de presión colocado en la entrada de la zona de bombeo indica 1 MPa y el sensor colocado entre el extrusor y el dado indica 6 MPa. Determine la longitud del dado.

### Solución

Se evalúan  $V_B$  y  $V_{BZ}$ :

$$V_B = \pi N D_B = \pi \left( 60 \frac{1}{mm} \right) \left( \frac{1 mm}{60 s} \right) (120 mm) = 377 \frac{mm}{s}$$

$$V_{BZ} = V_B \cos \theta = \left( 377 \frac{mm}{s} \right) \cos 20 = 354 \frac{mm}{s}$$

Se evalúan los parámetros  $W$  y  $Z$  del husillo:

$$W = L_s \cos \theta - e = D_B \cos \theta - e = (120 mm) \cos 20 - 5 mm - 107.76 mm$$

$$W = 107.76 mm$$

$$Z = \frac{8(120 mm)}{\sin 20} = 2806.05 mm$$

Se calcula el flujo volumétrico del extrusor:

$$Q = \frac{V_{BZ}}{2} - \frac{WH^3 \Delta P}{12\pi \Delta Z} = \frac{\left( 354.36 \frac{mm}{s} \right) (107.76)(5 mm)}{2} - \frac{(107.76 mm)(5 mm)^3}{12 (1000 Pa \cdot s)} \left[ \frac{5 \times 10^6 Pa}{2806.05 mm} \right]$$

$$Q = 93438.067 \frac{mm^3}{s}$$

De la Ecuación 3.15 se obtiene la constante "del dado:

$$K = \frac{Q_\mu}{\Delta P} = \frac{\left( 93438.067 \frac{mm^2}{s} \right) (1000 Pa \cdot s)}{5 \times 10^6 Pa} = 18.69 mm^3$$

$$K_\theta = \frac{kR}{R} = \frac{(1.2 cm)}{1.6 cm} = 0.75$$

De la Ecuación 3.23 se despeja la longitud "L" del dado

$$L = \frac{\pi R^4}{8K} = \left[ (1 - K_g^4) - \frac{(1 - K_g^2)^2}{\ln\left(\frac{1}{K_g}\right)} \right] = \frac{\pi(16 \text{ mm})^4}{8(18.69 \text{ mm}^3)} \left[ (1 - (0.75)^4) - \frac{(1 - (0.75)^2)^2}{\ln\left(\frac{1}{0.75}\right)} \right]$$

$$L = 25.1 \text{ mm} = 2.51 \text{ cm}$$

## REFERENCIAS

1. Wilkinson A.N and Ryan A.J (1998), “Polymer Processing and Structure Development”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
2. F. Hensen. (1997). "Plastics Extrusion Technology", 2nd ed. Hanser, Munich.
3. Lafleur P. y Vergnes B (2014), Polymer Extrusion, Editorial Wiley.
4. Tadmor Z. y Gogos C.G (2006), Principles of Polymer Processing, Editorial Wiley, Second Edition

## CAPÍTULO V

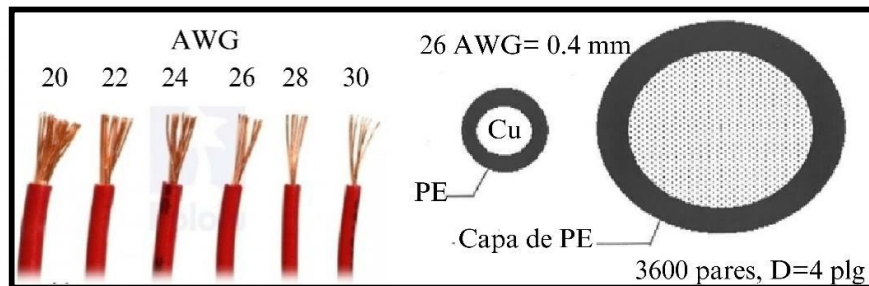
### RECUBRIMIENTO DE CABLES Y CONDUCTORES

#### 5.1 Introducción

El consumo de materias primas para el aislamiento y recubrimiento de alambres y cables cada vez es más demandante. Los materiales más utilizados para el recubrimiento son los siguientes: LDPE, LLDPE, HDPE, PP, PVC

Los cables telefónicos están formados por hilos de cobre de pequeño diámetro recubiertos con una delgada capa de aislante plástico. Estos hilos luego se agrupan por pares y se ensamblan.

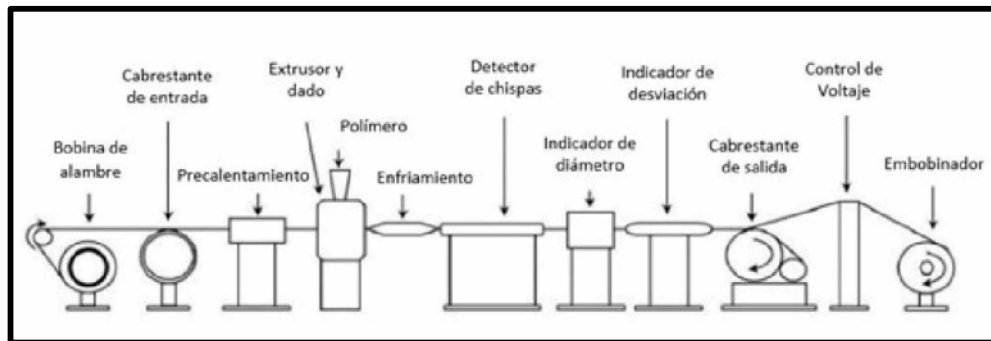
En la Figura 1, se presenta un esquema de un cable telefónico: los cables aislados previamente se enredan/entrelazan entre pares para ser recubiertos posteriormente con una capa de polietileno (hasta de 1mm) Los cables 26 AWG pueden soportar 105 °C, el diámetro del núcleo es de aproximadamente 0.4 mm/0.02 pulgadas y el diámetro exterior es de aproximadamente 1mm/0.04 pulgadas.



**Figura 5.1.** Esquema del recubrimiento de cable telefónico (Lafleur y Vergnes, 2014).

#### 5.2 Línea de producción

En la Figura 5.2 se presenta una típica línea de producción de recubrimiento de cables. En primer lugar, la bobina desenrolla el conductor y alimenta el dado transversal (es decir, perpendicular a la extrusora) a través de un cabrestante, cuya función es tensar el cable. El cable debe precalentarse antes de entrar al dado para que se adhiera mejor al polímero y también para eliminar la humedad del conductor. Una vez dentro del dado, el cable se recubre con el polímero fundido que proviene de una extrusor conectado.



**Figura 5.2** Línea de producción de aislamiento de cable (Lafleur y Vergnes, 2014).

En la producción de cable, los husillos de extrusión tienen un diámetro que varía entre 35 y 250 mm, con un caudal de entre 100 y 160 kg/h. La relación L/D (longitud/diámetro) suele ser de 20:1, y el material fundido en el dado tiene una presión de aproximadamente 55 MPa [Podolsak y Tiu, 1988]. A la salida del dado, el conductor revestido, término que aquí se utiliza indistintamente con el del alambre (metal), entra en los tanques de enfriamiento, cuya longitud está determinada por el diámetro del alambre, el espesor de la capa de polímero y la velocidad del proceso. En algunos casos, la longitud puede alcanzar hasta 100 m. Es importante detectar cualquier defecto (falta de polímero, puntos débiles) a lo largo de la superficie revestida. Por este motivo, el conductor pasa por un detector de chispas, donde se aplica un alto voltaje. Si hay un pequeño defecto o si el recubrimiento (aislamiento) es inadecuado, se observa una descarga y se registra. Generalmente, se miden y cuantifican diferentes parámetros como el diámetro del alambre, la excentricidad del conductor y la presencia de burbujas de aire mediante una variedad de instrumentos instalados en la línea de producción.

Finalmente, un cabrestante arrastra el cable recubierto enrollado en una bobina, sustituyendo automáticamente una bobina completa por una vacía para evitar paros o ralentizaciones de la producción.

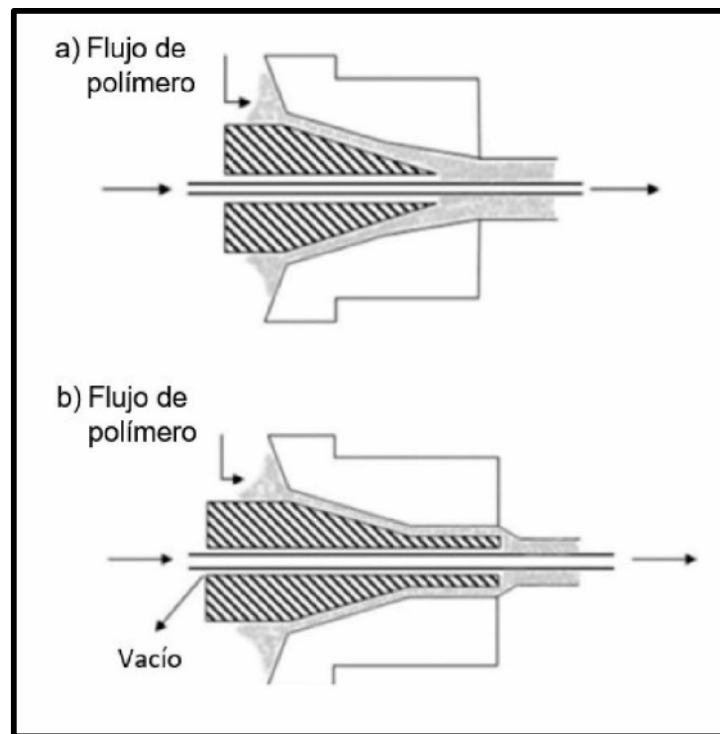
## 5.3 Componentes para el aislamiento de cables y conductores

### 5.3.1 Extrusor

Uno o varios extrusores cuyas características variarán según el tipo de materiales extruidos. Cada extrusor está equipado con una cabezal angular monocapa o multicapa, en la cual se fijan los dados de recubrimiento.

### 5.3.2 Dados de aislamiento (recubrimiento)

El dado de cruceta es el elemento principal en el aislamiento y recubrimiento por extrusión. Tanto los dados de presión y los de tubo son geometrías frecuentemente utilizadas, según el tipo de producto fabricado (Figura 5.3).



**Figura 5.3.** Tipos de dado de aislamiento de alambre: a) Presión, b) Tubular (Lafleur y Vergnes, 2014).

Normalmente, el cable o alambre que se va a recubrir pasa a través del conductor guía (o mandril) y se recubre con polímero fundido cerca de la salida del dado. En el caso de un dado a presión, el polímero fundido se presuriza antes de salir del dado. En la salida, el cable ya está recubierto, a diferencia del dado tipo tubo, donde se extruye una corona de polímero alrededor del conductor. En este caso, la corona se presiona contra el conductor fuera del dado, aplicando un vacío en el alambre guía. La concentricidad y la uniformidad del espesor del polímero que cubre el cable o alambre se pueden ajustar modificando los pernos que centran el dado con respecto al alambre guía.

El dado del tipo presión, cuyas velocidades de producción pueden alcanzar hasta 3, 000 m/min en el caso del revestimiento de cables telefónicos, también se utiliza para el aislamiento de cables. El dado tipo tubo se utiliza fundamentalmente para el aislamiento de cables, en los que los diámetros son grandes (hasta 10 cm) y las velocidades de producción son relativamente bajas (aproximadamente 5-10 m/min). Con el dado de tipo tubo también se aíslan los cables más frágiles, ya que el esfuerzo de tracción para arrastrar el conductor a través del polímero fundido es menor que en el dado tipo presión.

### **5.3.3 Dados multicapa**

También es posible adaptar la coextrusión al recubrimiento de cables. Uno de los primeros estudios sobre Co-extrusión fue realizado por LeNir [LeNir, 1974], quien adaptó la técnica de Fenner y Williams (Fenner y Williams, 1967) a la coextrusión. Esto permitió que dos (o más) capas se extruyeran simultáneamente sobre las mismas bases. Los dos polímeros fundidos se extruyen desde diferentes extrusores y entran en contacto en el dado tipo presión (Figura 5.4). La línea de coextrusión es idéntica a la extrusión clásica, pero con diferente dado y la presencia de extrusores adicionales (Han y Rao, 1980). El proceso de coextrusión se utiliza a menudo porque es económico.

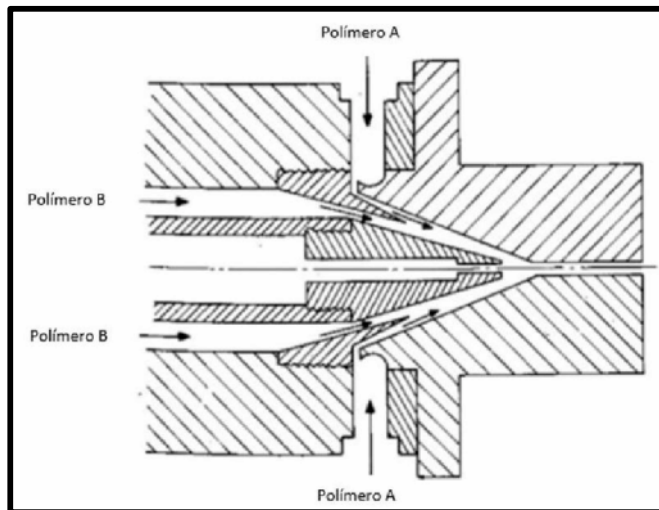


Figura 5.4. Dado de co-extrusión de alambres (Han y Rao, 1980).

## 5.4 MATERIALES

### 5.4.1 Polietileno de Baja Densidad

Generalmente se utiliza polietileno de baja densidad (LDPE) con un Índice de Fluidez (IF) inferior a 0.5 (densidad 0.923).

Temperatura de extrusión: 150°C en la Tolva, 200°C en el dado.

#### Ventajas:

- Buena constante dieléctrica de 2.25 a 2.35
- Propiedades mecánicas bastante buenas
- Químicamente inerte
- Baja permeabilidad al agua y a los gases
- Fácil de colorear

#### Desventajas:

- No tiene resistencia mecánica por arriba de los 100°C.
- Sensible a los agentes tensoactivos.

- Tiende a agrietarse bajo tensión.
- Se quema fácilmente

#### **5.4.2 Polietileno de Alta Densidad**

Densidad: 0.95 g/cm<sup>3</sup>

Temperatura de extrusión: 200°C en la Tolva, 230°C en el dado.

##### Ventajas:

- Mejor resistencia a la fisuración bajo tensión que el LDPE.

##### Desventajas:

- Rígido a bajas temperaturas: baja resistencia a la flexión.

#### **5.4.3 Policloruro de Vinilo**

PVC plastificado: Generalmente, se utiliza un 40% de plastificante (DOP de calidad eléctrica).

Temperatura de extrusión: 110°C a lo largo, 130°C en la tolva y 150°C en el dado.

##### Ventajas:

- Buenas propiedades mecánicas.
- Buena resistencia a los aceites y a los productos químicos.
- No propaga la llama.
- Fácil de colorear

Desventajas:

- Propiedades eléctricas medias, constante dieléctrica-4
- Fragilidad a baja temperatura
- Pérdida de propiedades mecánicas por encima de los 100°C.
- Emisión de HCl durante la combustión.

**5.4.4 Resinas Fluoradas:**

Ejemplo: Polifluoruro de vinilideno (PVF2) Temperaturas de extrusión: 200-250°C

Ventajas:

- Muy buenas propiedades eléctricas.
- Amplio rango de uso: -40 a 150°C.
- Buena resistencia a la abrasión y a los solventes.

Desventajas:

- Materiales costosos.
- Difícil procesamiento
- Halogenado.

**5.5 Problemas tecnológicos encontrados en el aislamiento de conductores**

A velocidades más allá de cierto punto, la superficie del aislante se vuelve granulosa e irregular conduciendo a la ruptura del extruido (melt-fracture).

La velocidad crítica depende principalmente del material utilizado y su temperatura de procesamiento. La presencia de material no fundido conduce a desgarros en la capa de

aislamiento al pasar por el dado. Por lo tanto, el extrusor debe proporcionar un producto homogéneo y fundido.

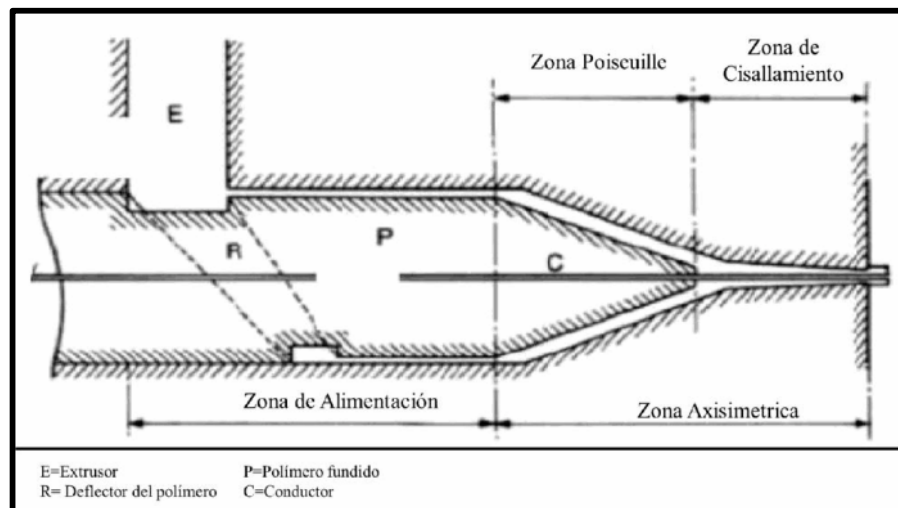
En el caso del conductor, durante el proceso de trefilado, la presencia de defectos en el cobre puede provocar rupturas (con un promedio de 1 ruptura por tonelada).

Para un conductor de diámetro de 0.5 mm aislado a una velocidad de 2000 m/min, normalmente produce un paro (una interrupción) cada 5 horas en promedio.

Durante el paso del polímero en el dado, las velocidades respectivas del conductor y del polímero no son idénticas: habrá una fuerza de retención ejercida por el polímero sobre el conductor. Esta fuerza de interacción puede ser significativa y provocar la ruptura o el alargamiento del conductor. Se requieren tolerancias severas en el diámetro.

## 5.6 Zonas principales de un dado de aislamiento de conductores

El dado se compone generalmente de dos zonas (Figura 5.5). La primera zona es la zona de alimentación, cuya función es distribuir el polímero fundido desde el extrusor alrededor del conductor, con un ángulo de  $90^\circ$  (de ahí el nombre de cabezal transversal).

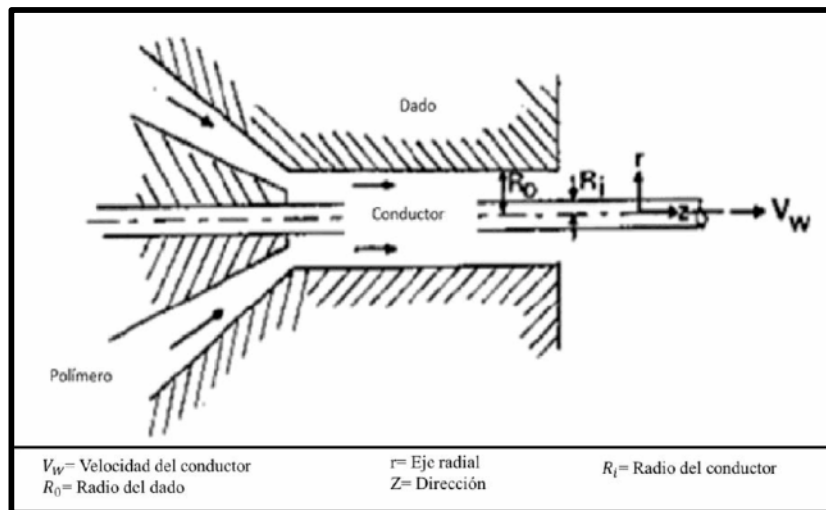


**Figura 5.5** Zonas principales de un dado de aislamiento de alambre (Vergnes, 1981).

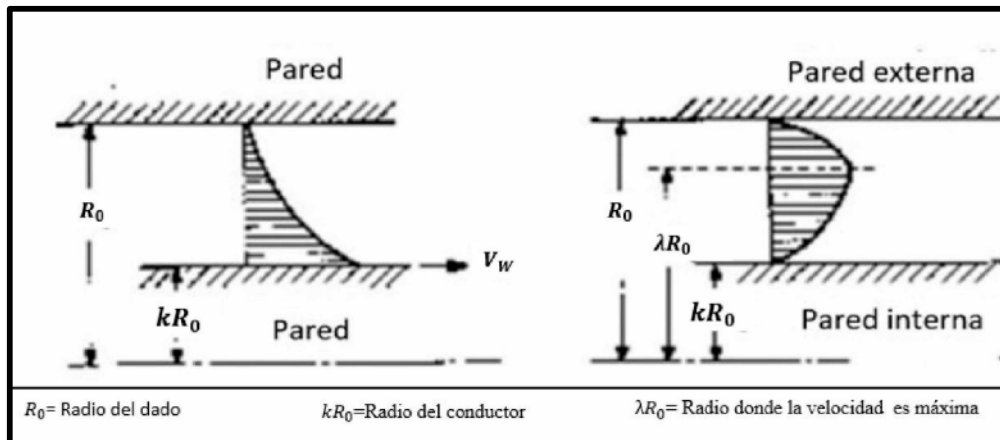
La segunda zona es la zona axisimétrica, que se compone de dos secciones:

- 1) Una parte donde el polímero está en contacto entre las dos paredes fijas del punzón y las 2 del dado en la cual el flujo se hace solamente sobre la acción de la presión (Zona Poiseuille)
- 2) La a zona de corte: donde el polímero está en contacto con la pared del dado y el conductor en movimiento.

En la Figura 5.6 se representan las líneas de flujo en un dado de tipo presión para el aislamiento de conductores y en la Figura 5.7 se muestran los perfiles de velocidad para flujo de corte y flujo bajo presión (Flujo Poiseuille).



**Figura 5.6** Dirección del flujo en un dado de aislamiento de cable (Lafleur y Vergnes, 2014).



**Figura 5.7 .** Diagramas de perfiles de velocidad en las zonas de aislamiento de un conductor:  
a) cizallamiento simple, b) flujo bajo presión (Han y Rao, 1978).

## 5.7 Ecuaciones de movimiento en la zona axisimétrica

Qv: flujo volumétrico del dado

$$Q_v = \frac{Q_M}{\rho} \dots \dots \dots (5.1)$$

$$S = \pi(R_F^2 - R_C^2) \dots \dots \dots (5.2)$$

$$Q_M = \rho_0 \cdot V_F \cdot \pi \cdot (R_F^2 - R_C^2) \dots \dots \dots (5.3)$$

$$Q_V = \frac{\rho_0}{\rho} \cdot V_F \cdot \pi \cdot (R_F^2 - R_C^2) \dots \dots \dots (5.4)$$

Donde:

S= Superficie de flujo

$Q_M$  = Flujo Másico

$Q_v$  =Flujo Volumétrico

$\rho_0$  =Densidad a la entrada

$\rho$  =Densidad a la temperatura de salida del dado

$R_C$  =Radio del conductor

$R_F$  =Radio del alambre aislado después del enfriamiento

$V_F$  =Velocidad del conductor

A partir de las ecuaciones de continuidad en coordenadas cilíndricas considerando flujo Poiseuille y de cizallamiento en la dirección z del canal (Figura 5.6), en régimen estable y despreciando los términos de masa e inercia se llega a la siguiente ecuación (Bird y colaboradores, 1992):

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \cdot \tau_{rz}) = - \frac{dP}{dz} \dots \dots \dots (5.5)$$

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \left[ - \frac{dP}{dz} \right] + \frac{C_1}{r} \dots \dots \dots (5.6)$$

Para un flujo newtoniano

$$\tau_{rz} = \mu \cdot \frac{dV_z}{dr} \dots \dots \dots (5.7)$$

$$\frac{dV_z}{dr} = \frac{r}{2\mu} \cdot \left[ - \frac{dP}{dz} \right] + \frac{C_1}{\mu \cdot r} \dots \dots \dots (5.8)$$

$$V_z = \frac{r^2}{4\mu} \left[ - \frac{dP}{dz} \right] + \frac{C_1}{\mu} \ln(r) + C_2 \dots \dots \dots (5.9)$$

Las condiciones límite para determinar las constantes de integración C1 y C2 son:

$$(i) \ r = K \cdot R_F \rightarrow V_z = V_F \dots \dots \dots (5.10)$$

$$(ii) \ r = R_F \rightarrow V_z = 0$$

Con la expresión de la velocidad en función del radio, se puede integrar para obtener el flujo volumétrico.

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_{K \cdot R_F}^{R_F} V_z(r) \cdot r \cdot dr \cdot d\theta \dots \dots \dots (5.11)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot R_F^2 \cdot V_F}{2} \frac{(1-k^2)}{\ln(1/k)} - 2 \cdot k^2 + \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R_F^4}{8 \cdot \mu \cdot L} 1 - k^4 - \frac{(1-k^2)^2}{\ln(1/k)} \dots \dots \dots (5.12)$$

$$k = Rc/R_F$$

Se puede combinar con la expresión del flujo volumétrico obtenida a partir del espesor de la capa de aislamiento.

$$R_F = Rc + \delta \dots \dots \dots (5.13)$$

$$R_F^2 = Rc^2 + 2 \cdot \delta \cdot Rc + \delta^2 \dots \dots \dots (5.14)$$

$$Q_V = \frac{\rho_0}{\rho} V_F \cdot \pi [Rc^2 + 2 \cdot \delta \cdot Rc + \delta^2 - Rc^2] \dots \dots \dots (5.15)$$

$$Q_V = \frac{\rho_0}{\rho} V_F \cdot \pi \cdot [2 \cdot \delta \cdot Rc + \delta^2] = Q \dots \dots \dots (5.16)$$

$$\delta^2 + 2 \cdot \delta \cdot Rc - \frac{\rho \cdot Q}{\rho_0 \cdot V_F \cdot \pi} = 0 \dots \dots \dots (5.17)$$

$$\frac{\delta}{Rc} = -1 + \left[ 1 + \left( \frac{\rho \cdot Q}{\rho_0 \cdot V_F \cdot \pi Rc^2} \right)^{0.5} \right] \dots \dots \dots (5.18)$$

$$\delta' = \frac{\delta}{Rc} = (1 + f_D + f_P)^{1/2} - 1$$

Agrupando:

$$f_D = \frac{\rho}{\rho_0} \left[ \frac{1 - k^2}{2 \cdot k^2 \cdot \ln(1/k)} \right]$$

$$f_P = \frac{\rho}{\rho_0} \Phi \frac{1}{8 \cdot k^2} \left[ 1 - k^4 - \frac{(1 - k^2)^2}{\ln(1/k)} \right]$$

$$\Phi = \frac{\Delta P \cdot R_F^2}{\mu \cdot V_F \cdot L} \dots \dots \dots (5.19)$$

Estas ecuaciones nos proporcionan:

$$\delta' = f(\Phi, k) \dots \dots \dots (5.20)$$

Pero también podemos obtener:

$$\Phi = f(\delta', k) \dots \dots \dots (5.21)$$

$$\Phi = \frac{8 \cdot k^2}{\left[1 - 4k^4 - \frac{(1 - k^2)^2}{\ln(1/k)}\right]} \frac{\rho_0}{\rho} (\delta'^2 + 2 \cdot \delta' - f_D)$$

$$f_D = \frac{\rho}{\rho_0} \left[ \frac{1 - k^2}{2 \cdot k^2 \cdot \ln(1/k)} - 1 \right]$$

$$k = \frac{R_C}{R_F} \quad \delta' = \frac{\delta}{R_C} \dots \dots \dots (5.22)$$

$\delta'$ : Espesor adimensional de la capa de aislamiento

$k$ : Factor geométrico del dado

$\Phi$ : Factor adimensional de presión

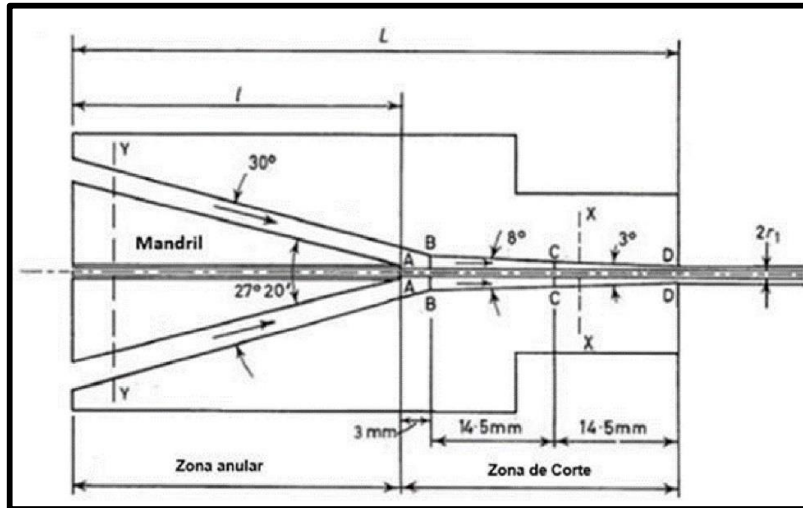
## 5.8 Ecuaciones para un fluido no newtoniano en la zona axisimétrica

Uno de los primeros estudios fundamentales sobre dados de recubrimiento de cable fue realizado por Fenner y Williams [Fenner and Williams, 1967]. Este estudio involucra un fluido no newtoniano y aplica la teoría de lubricación. Se basa en las siguientes suposiciones:

- Flujo laminar;
- Fluido incompresible;

- Flujo isotérmico;
- Sin deslizamiento en las paredes;
- Sin efectos elásticos.

El dado utilizado para este análisis se muestra en la figura 5.8 y se ha convertido en un dado de referencia para muchos autores.



**Figura 5.8** Dado de aislamiento de alambre propuesto por Fenner and Williams

De la Ecuación 5.23 a la Ecuación 5.31 se presenta el análisis para un fluido no newtoniano en un dado donde se presentan flujo por presión y por arrastre.

Resolviendo la ecuación de flujo da el gradiente de presión  $P_z$  en la dirección  $z$  para un dado de flujo volumétrico  $Q$ . La ecuación de flujo, bajo las condiciones listadas anteriormente, se escribe en la dirección axial de la siguiente manera:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\tau) = \frac{dp}{dz} = P_z \dots \dots \dots (5.23)$$

donde  $p$  es la presión y  $\tau$  es el esfuerzo de corte.

Suponemos que el esfuerzo de corte sigue la ley de potencia de viscosidad:

$$\tau = \eta_0 \frac{d\omega}{dr} \left( \frac{d\omega}{dr} \right)^{m-1} \dots\dots\dots(5.24)$$

donde  $\eta_0$  es la viscosidad de referencia,  $m$  es el índice de ley de potencia y  $\omega(r)$  es la velocidad del fluido en la dirección  $z$ .

El esfuerzo de corte medio  $\bar{\tau}$ , calculado para una tasa de corte media  $\frac{V}{H}$ , es dado como sigue:

$$\bar{\tau} = \eta_0 \left( \frac{V}{H} \right)^m \dots\dots\dots(5.25)$$

Donde:

$V$ = velocidad del conductor y  $H$  es el espacio radial entre el conductor y la pared del dado.

Fenner y Williams (1967) definieron el parámetro de flujo anular  $\pi_A$  como:

$$\pi_A = \frac{Q\eta}{CH^2(-P_z)} \dots\dots\dots(5.26)$$

Donde  $C$  es la circunferencia media tal como:

$$C = \frac{\pi}{2(D + d)}$$

Donde  $D$  y  $d$  son los diámetros del dado y del conductor, respectivamente. El signo negativo se agrega por conveniencia, ya que el término de gradiente de presión axial  $P_z$  es usualmente negativo.

La viscosidad media del polímero  $\bar{\eta}$  es definida como:

$$\eta = \eta_0 \left( \frac{Q}{AH} \right)^{m-1} \dots\dots\dots(5.27)$$

con  $A$  siendo la sección de flujo:  $A = \pi (D^2 - d^2)/4$ . Usualmente,  $\pi_A$  es una función de  $m$  y  $\kappa = D/d$ , pero se vuelve independiente de  $\kappa$  cuando este valor es pequeño. Cuando  $\kappa = 1$ , se convierte en:

$$\pi_A = \left( \frac{2m}{2m+1} \right)^m \frac{1}{2^{2m+1}} \dots \dots \dots (5.28)$$

El flujo másico del polímero es constante y se escribe como sigue:

$$Q_m = p v \frac{\pi}{4} [(d + 2h)^2 - d^2] \dots \dots \dots (5.29)$$

donde  $h$  es el espesor final del recubrimiento después de enfriarse a temperatura ambiente y  $\rho$  es la densidad del polímero a esta temperatura. Para un flujo isotérmico incompresible, el flujo volumétrico es constante y se expresa como:

$$Q = \frac{Q_m}{\rho_m} \dots \dots \dots (5.30)$$

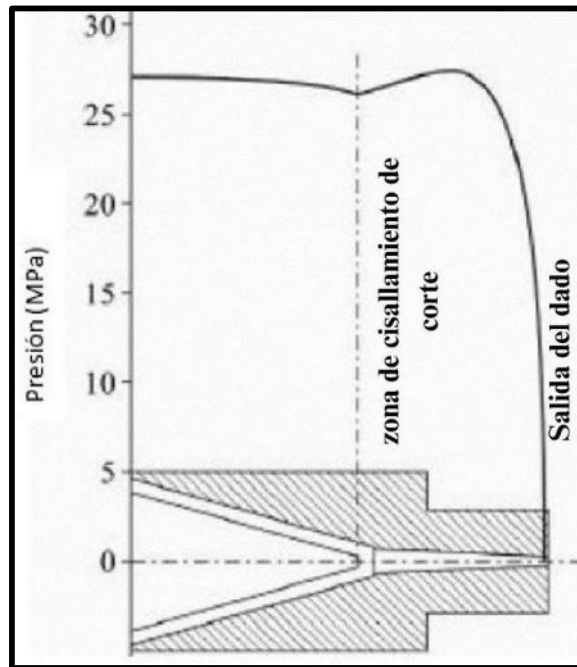
$\rho_m$  siendo la densidad del polímero fundido a la temperatura de procesamiento.

Así, al definir  $z = 0$  como el comienzo de la zona anular, la presión inicial  $p$  se expresa como:

$$p = \frac{Q}{\pi_A} \int_0^L \frac{\eta}{CH^3} dz + \int_L^L \frac{\pi p \tilde{\tau}}{H} dz \dots \dots \dots (5.31)$$

Donde  $\pi_A$  y  $Q$  se calculan a partir de las propiedades del polímero y la geometría, usando las ecuaciones anteriores, con todas las demás variables siendo funciones conocidas de  $z$ .

Por ejemplo, la Figura 5.9 muestra la evolución de la presión, calculada por Fenner y Williams (Fenner and Williams, 1967), para un polímero con un índice de ley de potencia de  $n = 0.48$ . Se observa un ligero descenso en la zona de Poiseuille, seguido por un fuerte aumento en la zona de corte (cizallamiento) y una rápida disminución justo antes de salir del dado.



**Figura 5.9** Perfil de presión en el dado de recubrimiento de alambre a una velocidad de **300 m/min** (Fenner and Williams, 1967).

## 5.9 Ejemplos prácticos (casos de estudio)

**Problema 1.** Un extrusor monohusillo está acoplado a un dado de cablería para producir un cable de cobre aislado con LDPE. Para las condiciones de operación y geometría dado extrusor proporcionados. Calcule el espesor del aislante de LDPE sobre el alambre de cobre.

Datos:

Extrusor

Diámetro de barril: 50 mm =  $L_S = D_B$

Profundidad del canal = 2 mm = H

Q = 17.66°

e = 4 mm

Longitud de la zona de bombeo = 30 mm = L

Condiciones de operación

V conductor = 600 m/mm = 600,000 mm/min

N = 60 rpm = 60  $\frac{rev}{min}$

Polímero

$\rho_0 = 0.95 \frac{g}{cm^3} = \rho \text{ solido}$

$\rho = 0.80 \frac{g}{cm^3} = \rho \text{ salida dado}$

Dado

Diámetro del alambre = 0.05 mm

Diámetro del dado = 1 mm

L = 2 cm

**Solución**

$\delta = ?$

$$K = \frac{Rc}{kf}; \quad f_D = \frac{\delta}{\delta_0} \left[ \frac{1-k^2}{2k^2 \ln(k^{-1})} - 1 \right];$$

$$K = \frac{\pi R^4}{8Ldado} \left[ (1 - kg^4) - \frac{(1 - kg^2)^2}{\left(\ln \frac{1}{kg}\right)} \right]; \quad kg = \frac{KR}{R} = \frac{\text{radio menor}}{\text{radio mayor}}$$

$$\Phi = \frac{\Delta P \cdot R f^2}{\mu \cdot V_f \cdot L} = \frac{A \cdot R_f^2 \cdot \mu \cdot N}{(c+k) \mu V_f \cdot L_{dado}};$$

$$\Phi = \frac{8k^2}{\left[ 1 - k^4 - \frac{(1 - k^2)^2}{\left(\ln \frac{1}{k}\right)} \right]} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} \cdot [(\delta')^2 + 2\delta' - f_D]$$

$$\Delta P = \frac{\mu A}{C + K} N$$

A, C y Z son parámetros geométricos del extrusor

$$A = \frac{\pi D_B}{2} \cos \theta \cdot WH ; C = \frac{WH^3}{12Z} ; Z = \frac{L}{\sin \theta}$$

La constante del dado se evalúa con la Ecuación 3.23

$$K = \frac{\pi(0.5 \text{ mm})^4}{8(20 \text{ mm})} \left[ (1 - 0.5^4) - \frac{(1 - 0.5^2)^2}{\ln(0.5^{-1})} \right] = 1.54 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 ;$$

$$KG = \frac{(0.5 \text{ mm})/2}{(1 \text{ mm})/2} = 0.5$$

$$Z = \frac{300 \text{ mm}}{\sin 17.66} = 988.898 \text{ mm}$$

$$C = \frac{WH^3}{12Z} = \frac{(43.6436 \text{ mm})(2 \text{ mm})^3}{12(988.898 \text{ mm})} = 0.029422 \text{ mm}^3$$

$$W = Ls \cos \theta - e = ((50 \text{ mm})(\cos 17.66) - 4 \text{ mm}) = 43.6436 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi(50 \text{ mm})}{2} (\cos 17.66)(43.6436 \text{ mm})(2 \text{ mm}) = 6,532,444 \text{ mm}^3$$

$$\Phi = \frac{A \cdot R f^2 \cdot N}{(C+K) V_f \cdot L_{dado}} = \frac{(6,532.44 \text{ mm}^3)(0.5 \text{ mm})^2(60 \text{ rev/min})}{(0.029422 \text{ mm}^3 + 1.546 \times 10^{-4} \text{ mm}^3) \left( 600,000 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) (20 \text{ mm})} = 0.2761$$

$\Phi = \text{Factor adimensional de presión}$

$$K = \frac{Rc}{Rf} = \frac{(0.5/2) \text{ mm}}{(1/2) \text{ mm}} = 0.5 ; \frac{\delta_o}{\delta} = \frac{0.95}{0.8} = 1.1875$$

$$f_d = 0.8421 \left[ \frac{1 - 0.5^2}{2(0.5)^2 \ln(0.5^{-1})} - 1 \right] = 0.98024$$

$$\frac{8k^2}{\left[ 1 - k^4 - \frac{(1 - k^2)^2}{\ln(k^{-1})} \right]} = \frac{8(0.5)^2}{\left[ 1 - 0.5^4 - \frac{(1 - 0.5^2)^2}{\ln 0.5^{-1}} \right]} = 15.87502$$

$$0.27608 = (15.87502)(1.1875)[(\delta')^2 + 2\delta' - 0.98024]$$

$$(\delta')^2 + 2\delta' = 0.994885$$

$$(\delta')^2 + 2\delta' - 0.99485 = 0$$

Utilizando la formula general

$$\delta'_1, \delta'_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \delta'_1, \delta'_2 = \frac{-2 \pm \sqrt{2^2 - 4(1)(-0.99485)}}{2(1)}$$

$$\delta'_1 = 0.4124 \quad \delta' = \frac{\delta}{R_c} = 0.4124 = \frac{\delta}{0.25} \quad \delta = 0.1031 \text{ mm}$$

$$\delta'_2 = -1$$

$\delta'_1$  y  $\delta'_2$  son espesores adimensionales de la capa de aislamiento. Estos no pueden ser negativos, solo se toma el valor positivo de 0.4124

El espesor del aislante  $\delta=0.1031$  mm, lo cual es un valor razonable. Ya que la suma del radio del conductor metálico con su capa de aislante no debe ser mayor que el radio del dado.

**Problema 2.** Un polietileno se utiliza para aislar un alambre de cobre de 0.06” de diámetro. El dado tiene un diámetro interno de 0.09” y una longitud de 1,5”. La caída de presión es de 1950 psi. El espesor del aislante es de 0.009”. la viscosidad del polímero fundido = 100 Pa.s. Calcule la velocidad a la cual se desplaza el cable.

$$R_c = 0.03 \text{ in}$$

$$R_F = 0.045 \text{ in}$$

$$L = 1.5 \text{ in}$$

$$\Delta P = 19500 \text{ psi}$$

$$\delta = 0.009 \text{ in}$$

$$\mu = 100 \text{ Pas}$$

$$\delta' = \frac{\delta}{R_c} = \frac{0.009 \text{ in}}{0.03 \text{ in}} = 0.3$$

$$K = \frac{R_c}{R_F} = \frac{0.03 \text{ in}}{0.045 \text{ in}} = 0.666$$

$$f_D = \frac{\rho}{\rho_o} \left[ \frac{1 - k^2}{2k^2 \ln\left(\frac{1}{k}\right)} - 1 \right] \quad \text{asumiendo} \quad \frac{\rho}{\rho_o} = 1$$

$$f_D = \left[ \frac{1 - 0.666^2}{2(0.666)^2 \ln\left(\frac{1}{0.666}\right)} - 1 \right] = 0.543$$

$$\phi = \frac{8(0.666)^2}{\left[ 1 - (0.666)^4 - \frac{(1 - 0.666^2)^2}{\ln(1/0.666)} \right]} (0.3^2 + 2(0.3) - 0.543)$$

$$\phi = (85.5122)(0.147) = 12.57$$

$$\phi = \frac{\Delta P R_f^2}{\mu V_f L} \quad V_f = \frac{\Delta P R_f^2}{\mu \phi L}$$

$$V_f = \frac{(1950 \text{ psi})(0.045 \text{ in})^2}{(100 \text{ Pa.s}) \left( \frac{1 \text{ psi}}{6894 \text{ Pa}} \right) (12.57)(1.5 \text{ in})} = 14.44 \frac{\text{in}}{\text{s}} \left( \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right)$$

$$V_f = 1.2 \text{ ft/s}$$

**Problema 3.** Se desea recubrir un cable con polímero a una velocidad de  $0.5 \text{ m/s}$ . El diámetro del cable es de  $15 \text{ mm}$  y el espesor del recubrimiento debe ser de  $0.3 \text{ mm}$ . El dado posee una longitud de  $60 \text{ mm}$  y un diámetro externo cte de  $16 \text{ mm}$ . ¿Cuál presión debe ser desarrollado a la entrada del dado si en estas condiciones de operación la viscosidad característica del polímero es de  $100 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$  la densidad es de  $1.0 \text{ g/cm}^3$ .

|                         |                           |                        |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|
| $V=0.5 \text{ m/s}$     | $\eta=100 \text{ Pa.s}$   | $R_c=0.0075 \text{ m}$ |
| $D_c=15 \text{ mm}$     | $\delta=1 \text{ g/cm}^3$ | $R_f=0.008 \text{ m}$  |
| $\delta=0.3 \text{ mm}$ | $P_1=?$                   | $L=0.06 \text{ m}$     |
| $Z=60 \text{ mm}$       |                           |                        |
| $D_c=16 \text{ mm}$     |                           |                        |

$$\delta' = \frac{\delta}{R_c} = \frac{0.3 \text{ mm}}{7.5 \text{ mm}} = 0.04 \quad K = \frac{R_c}{R_f} = \frac{7.5}{8} = 0.9375$$

$$f_D = \frac{\delta}{E} \left[ \frac{1 - K^2}{2K^2 \left( 2K^2 \left( \ln 1/k \right) \right)} - 1 \right] = (1) \left[ \frac{1 - 0.9375^2}{2(0.9375)^2 \ln(0/0.9375)} - 1 \right]$$

$$f_D = 0.067$$

$$\phi = \frac{8K^2}{1 - K^4 - \frac{(1 - K^2)^2}{\ln(1/k)}} \frac{\rho_o}{\rho} (\delta'^2 + 2\delta' - f_D)$$

$$\phi = 325.51$$

$$\Delta P = \frac{\phi \mu V_f L}{R_f^2} = \frac{(325.51)(100)(0.5)(0.06)}{(0.008)^2}$$

$$\Delta P = 14.84 \text{ MP}$$

## REFERENCIAS

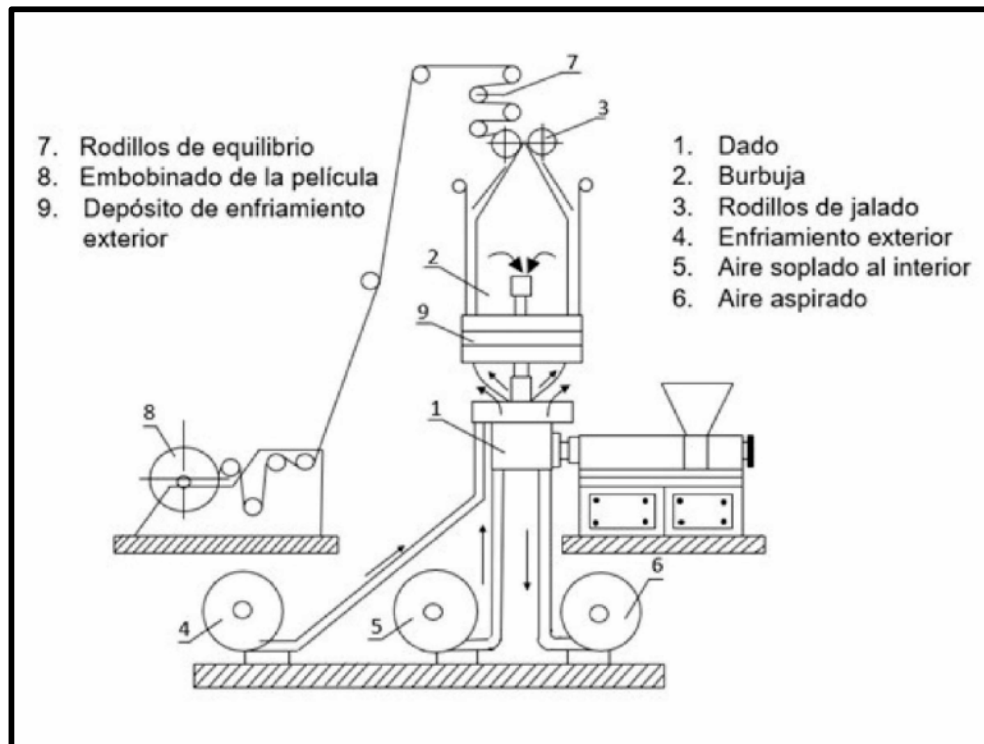
1. Bird R.B, Stewart W.E, Lightfoot E.N. (2020), Fenómenos de Transporte, Editorial Reverté, Barcelona.
2. Fenner R.T. and Williams J.G.(1967) “Analytical methods of wire-coating die design”, *Translations of the Journal of Plastics Institute*, vol. 35, pp. 701–706.
3. Han C.D. and Rao D.A.(1978), “Studies on wire coating extrusion. I. The rheology of wire coating extrusion”, *Polymer Engineering & Science*, vol. 18, pp. 1019– 1029.
4. Han C.D. and Rao D.A (1980), “Studies on wire coating extrusion. II. The rheology of wire coating coextrusion”, *Polymer Engineering & Science*, vol. 20, pp. 128–139.
5. Drobny J.G (2013). *Polymers for Electricity and Electronics: Materials, Properties, and Applications* 1st Edición, John Wiley & Sons Ltd ISBN-13 978- 0470455531.
6. Lafleur P. and Vergnes B (2014). *Polymer Extrusion*, Editorial Wiley.
7. Lenir V (1974). “Melt flow analysis in wire coating dies for dual extrudates”, *Wire Journal*, vol. 7, pp. 59–64.
8. Podolsak A.K., Tiu C. (1988), “A review of wire coating and cable sheating extrusion processes”, *Polymer and Plastics Technology and Engineering*, vol. 27, pp. 389–427.
9. Vergnes B. (1981). “Etude de l’écoulement d’un polymère fondu dans une filière de câblerie téléphonique”, *Matériaux et Techniques.*, vol. 6, pp. 187–191.
10. Huang X and Tanaka K. (2022). *Polymer Composites for Electrical Engineering*, John Wiley & Sons Ltd. Print ISBN:9781119719601, Online ISBN:9781119719687, DOI:10.1002/9781119719687

## CAPÍTULO VI

### EXTRUSIÓN SOPLADO DE PELÍCULAS

#### 6.1 Introducción

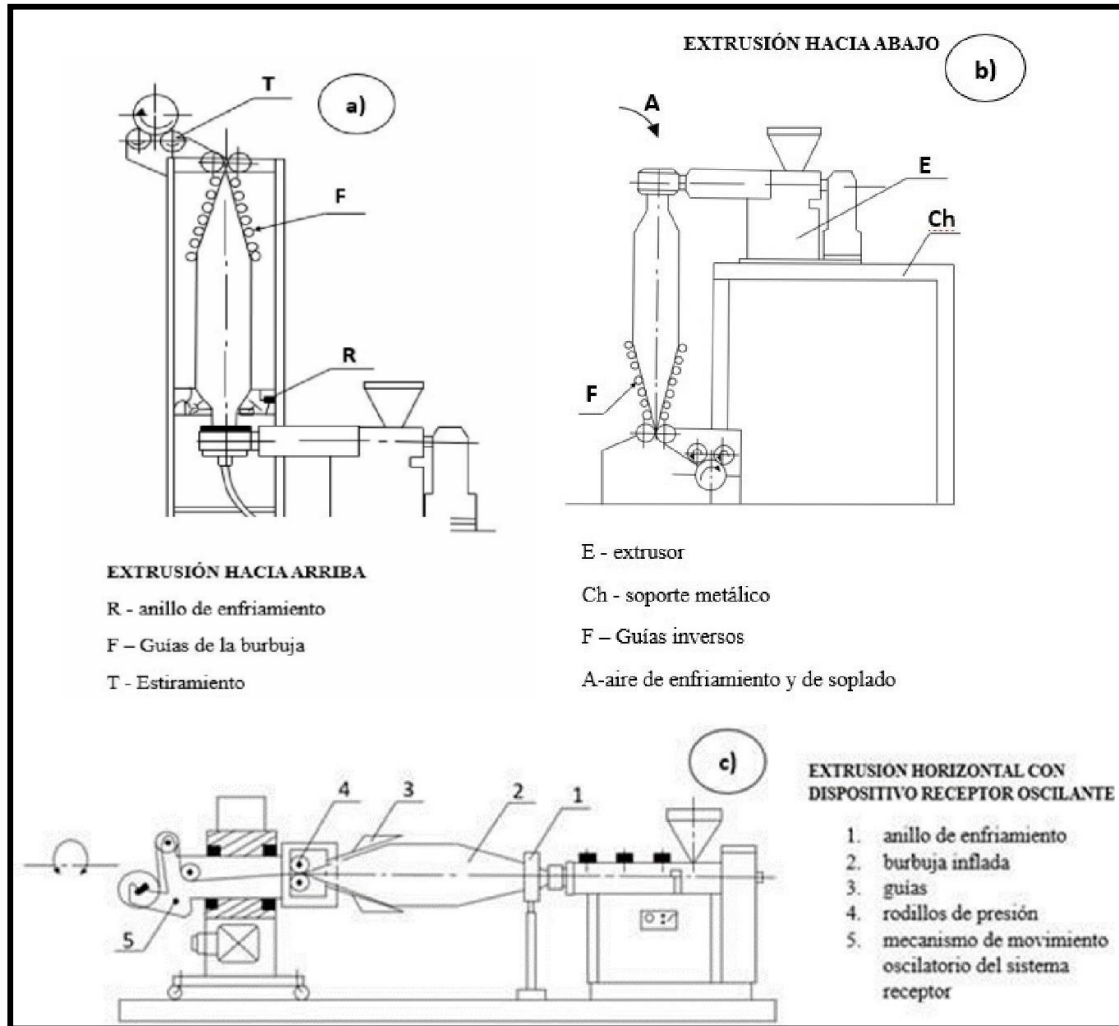
El polímero fundido se extruye a través de un dado anular, formando un tubo delgado. Mediante la aplicación de aire comprimido, este tubo delegado, aún en estado fundido, se infla al mismo tiempo que se enfría de manera gradual. Una vez que el tubo se solidifica, su forma y tamaño ya no cambian. De esta forma, se obtiene una burbuja que se jala, se presiona sobre rodillos y se enbobina.



**Figura 6.1.** Proceso de extrusión de película soplada (Por cortesía de VASA, S.A de C. V.)

#### 6.2 MÉTODOS DE FABRICACIÓN

Existen tres métodos de fabricación de películas sopladas basados en la dirección de la extrusión: 1) hacia arriba, 2) hacia abajo y 3) extrusión horizontal. En los dos primeros métodos se utiliza un dado vertical, mientras que en el tercer método se emplea un dado horizontal.



**Figura 6.2** Tipo de configuración de extrusores para extrusión de película soplada (Por cortesía de VASA, S.A de C. V.)

La técnica de extrusión-soplado se aplica a la mayoría de los materiales termoplásticos (los cuales en estado fundido presentan una alta viscosidad), permitiendo la fabricación de películas extremadamente delgadas, hasta de 10  $\mu\text{m}$  de espesor. Las películas comerciales oscilan entre los 20  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$  (0.001 y 0.015 pulgadas respectivamente).

La burbuja resultante se suele soldar transversalmente en la fabricación de bolsas y sacos utilizados en el embalaje y distribución de diversos productos, como textiles, alimentos, fertilizantes, etc. Para diámetros más grandes, la burbuja puede dividirse longitudinalmente a lo largo de un generador para producir películas planas continuas, cuya longitud puede alcanzar hasta 8 metros (26 pies), siendo muy valoradas en sectores agrícolas (películas para reservorios de agua) y en la construcción (películas de protección).

El material plástico preferido para la fabricación de burbujas es el polietileno en sus tres variantes: baja densidad (LDPE), lineal de baja densidad (LLDPE) y alta densidad (HDPE). Otros materiales termoplásticos también pueden transformarse en burbujas como el polipropileno (PP) y el Policloruro de vinilo (PVC).

La relación de tomado (TUR), también llamada relación de estiramiento (DR), define el estiramiento longitudinal de la película inducido por los rodillos de presión:

$$TUR = \frac{V_f}{V_0} \dots\dots\dots(6.1)$$

donde  $V_f$  es la velocidad de la película sólida y  $V_0$  es la velocidad inicial a la salida del dado.

La relación de soplado (BUR) define el estiramiento transversal de la película inducido por el soplado de la película:

$$BUR = \frac{R_f}{R_0} \dots\dots\dots(6.2)$$

donde  $R_f$  es el radio final de la burbuja y  $R_0$  es el radio del dado.

Es posible evaluar la relación de reducción (DDR), utilizando la conservación del caudal másico “ $Q_m$ ”, entre la salida del dado y la película sólida terminada, utilizando la siguiente relación:

$$DDR = \frac{e_0}{e_f} = \frac{Q_m}{\rho_f 2\pi R_0 V_0} \frac{\rho_f 2\pi R_f R_f}{Q_2} = \frac{\rho_f}{\rho_0} TUR BUR \dots \dots \dots (6.3)$$

donde  $\rho_0$  es la densidad en la salida del dado y  $\rho_f$  es la densidad de la película sólida.

Por lo tanto, es posible controlar el espesor de la película ajustando adecuadamente el flujo volumétrico, la TUR y la BUR.

El soplado de películas presenta numerosas ventajas. Se caracteriza por el hecho de que se impone una tensión biaxial sobre la película. Las propiedades de impacto de las películas obtenidas mediante esta técnica son superiores, para anchos iguales (igualdad de anchura), a las de las películas planas obtenidas mediante extrusión con rodillos fríos. Las propiedades mecánicas y ópticas de la película también se pueden controlar, en cierta medida, ajustando el enfriamiento, la TUR y la BUR. Otra ventaja de esta técnica de fabricación, en comparación con la anterior, es el pequeño tamaño del dado. De hecho, para producir una película con una anchura de 2,5 m mediante extrusión de película plana (ver sección 7.2.3), se debe utilizar un dado de 2,6 m. Sin embargo, utilizando la técnica de soplado de películas, con una BUR de 3, es suficiente un diámetro de dado de 0,265 m. Este proceso es, por tanto, el único que permite producir películas de gran tamaño, al mismo tiempo que utiliza menos energía, lo que reduce los costos. Por último, es posible producir películas de diferentes anchuras utilizando una única máquina, sin cambiar el dado. Este proceso es, por tanto, muy versátil.

### 6.3. COMPONENTES DE UNA LINEA DE EXTRUSION SOPLADO

Una línea de extrusión-soplado de películas incluye los siguientes componentes:

- Un extrusor monohusillo
- Un cabezal de soplado
- Un dispositivo de enfriamiento
- Un dispositivo de estirado de la burbuja
- Un dispositivo de recepción

### 6.3.1 Extrusor

Los extrusores monohusillo son ideales para la transformación de gránulos de polietileno. La selección del extrusor adecuado dependerá del tipo específico de burbuja que se desee producir.

Para películas delgadas de 20 a 100  $\mu\text{m}$ :

Diámetro del tornillo: 25 a 90 mm

Gasto de Producción: entre 35 y 150 kg/h

Para películas gruesas de 100 a 500  $\mu\text{m}$ :

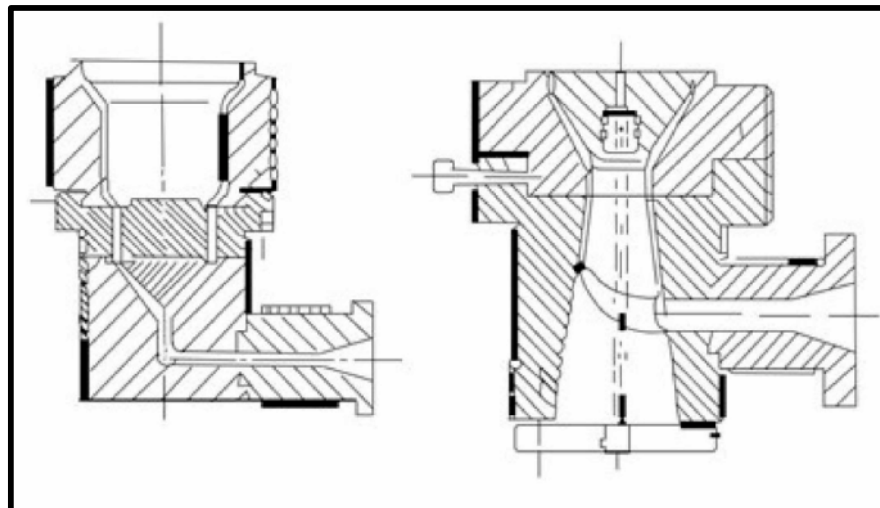
Diámetro del tornillo: 120 a 200 mm Gasto

de Producción: entre 200 y 700 kg/h

La longitud del tornillo es en promedio de 25D, con una relación de compresión de 3:1.

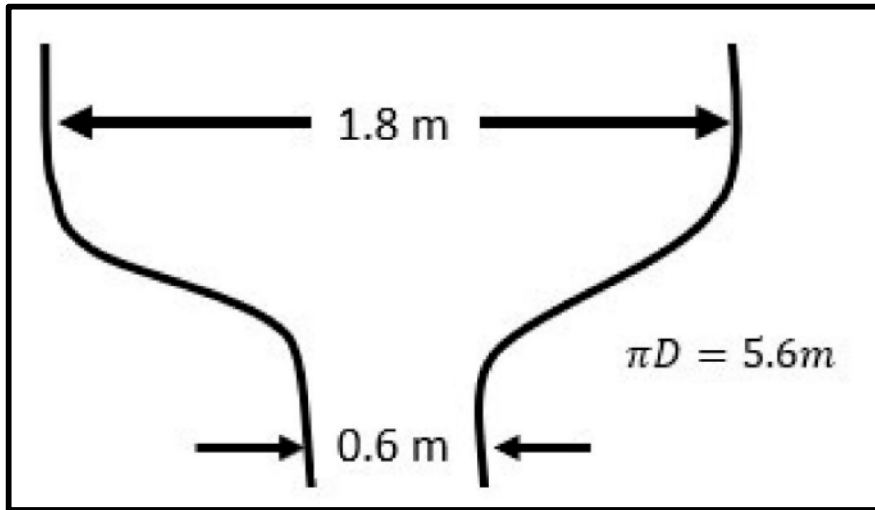
### 6.3.2 Cabezal de soplado

El cabezal de soplado tiene como objetivo desviar verticalmente la masa fundida que sale del tornillo y distribuirla uniformemente sobre la ranura anular de salida (dado). El punzón del equipo está atravesado por un tubo que permite la introducción de una cantidad controlada de aire, inflando así el tubo en una burbuja grande.



**Figura 6.3** Cabezal de soplado (Lafleur y Vergnes, 2024).

La tasa de soplado puede alcanzar una relación de 1 a 3, lo que significa que, para un dado de 600 mm soplado a una relación de 3, el ancho de la película en forma plana sería de casi 6 metros.

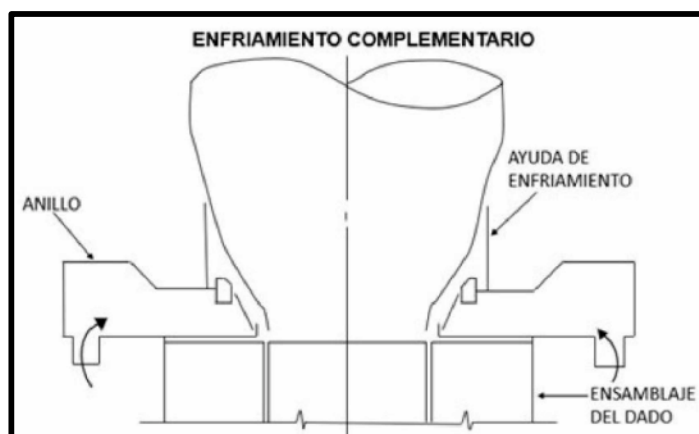


**Figura 6.4** Diagrama de la relación de soplado (Lafleur y Vergnes, 2024).

### 6.3.3 Enfriamiento

El enfriamiento efectivo de la burbuja es de suma importancia, ya que no solo influye en la velocidad de producción, sino también en la calidad de la película. En general, se utilizan series de anillos de enfriamiento con reducciones intercambiables, esto para evitar utilizar un anillo por diámetro de la burbuja. La regularidad del enfriamiento es muy delicada de asegurar. De ella dependen estrechamente la estabilidad de la burbuja, la variación del espesor y la uniformidad del aspecto de la película obtenida.

El sistema de enfriamiento exterior puede complementarse con un sistema de enfriamiento interior, con entrada y salida de aire. El aire llega a través de la tubería que atraviesa el punzón y es dirigido por boquillas laterales hacia la pared interior de la burbuja. Este aire luego se evacua desde la parte superior de la burbuja hacia el exterior del dado mediante un conducto de evacuación que atraviesa el punzón.



**Figura 6.5** Sistemas de enfriamiento de la burbuja (Lafleur y Vergnes, 2014).

#### **6.3.4 Estiramiento**

Después del enfriamiento, la burbuja es aplanada entre dos cilindros, que aseguran al mismo tiempo el estiramiento de la película. La principal dificultad del estiramiento radica en el aplanamiento regular y apretamiento de los rodillos sin formación de pliegues de la burbuja cilíndrica. Para evitar esta formación de pliegues, se procede con una reducción progresiva del cilindro que forma la burbuja. Este aplanamiento se logra mediante superficies de estrechamiento lisas, colocadas justo debajo de los cilindros de estiramiento (Figura 6.1).

El sistema de accionamiento está compuesto por un cilindro de arrastre fijo que puede ser controlado a distancia y un cilindro libre que se puede cerrar o liberar neumáticamente.

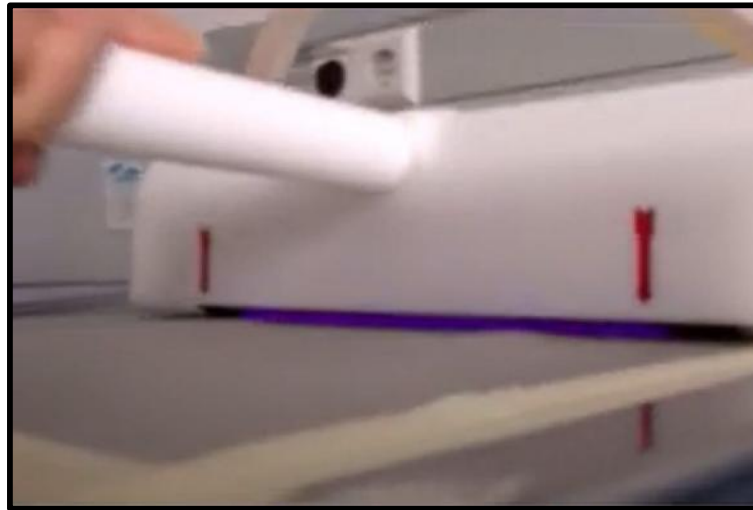
#### **6.3.5 Enrollado/enbobinado**

Después de pasar entre los rodillos de estiramiento, la película doble obtenida se desliza sobre una serie de rodillos de acero y llega al enrollador (enbobinador). Los enrolladores están diseñados para obtener rollos de película sin pliegues y con bordes rectilíneos.

#### **6.3.6 Tratamiento de superficie**

Una de las principales aplicaciones de las películas tubulares de PE es su transformación, después de la soldadura y el corte, en bolsas para el embalaje. Antes de esto, generalmente, las

películas reciben una impresión decorativa. La adherencia de las tintas es deficiente en este material de naturaleza parafínica. Para mejorar la adhesión, la burbuja se somete a un tratamiento superficial eléctrico, cuyo objetivo es mejorar la capacidad adhesiva de la superficie.



**Figura 6.5** Unidad de tratamiento corona para hacer imprimible la película soplada

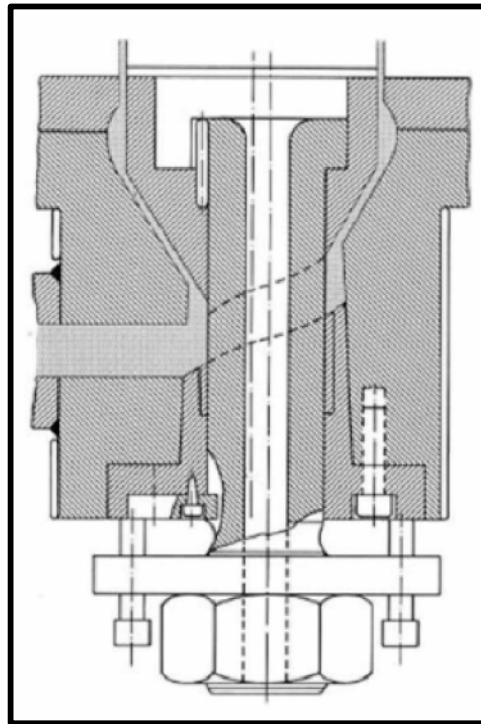
#### **6.4 Tipo de dados**

El soplado de películas requiere que un polímero fundido pase a través de un dado, en este caso un dado anular. Existen cuatro tipos de dados utilizados en el soplado de películas: dados tipo araña, dados con canal de distribución, dados apilados y dados helicoidales. Estos últimos, por su diseño, pueden ser estacionarias, oscilantes o giratorios. Los dados helicoidales y apilados se pueden utilizar en extrusión simple o en coextrusión.

El uso de dados tipo araña era muy común hace algunos años. Hoy en día, se utilizan principalmente para dar forma a materiales sensibles al calor para evitar el riesgo de degradación, como el PVC o el PVDC [Vergnes and Lafleur, 2014]. El polímero se alimenta a través del centro de la pared del dado y fluye a lo largo del mandril interno, que está compuesto por un cono invertido soportado por patas de araña, similar al descrito para la fabricación de tuberías (sección 4.4.1). El flujo se ve perturbado por estas patas de araña, lo que provoca líneas de soldadura, que, a su vez, pueden dar lugar a defectos. Este tipo de dado está limitado por la

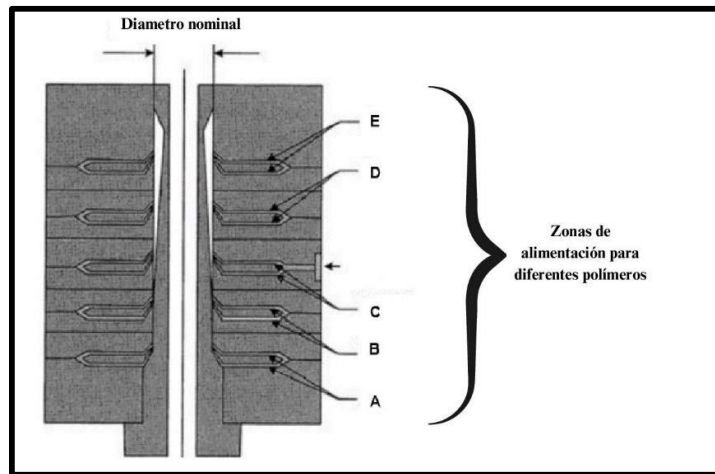
fuerza que las patas de araña son capaces de soportar. Por lo general, se puede alcanzar un diámetro de hasta 750 mm.

En dados con canal de distribución (Figura 6.7), el canal reparte el material que sale del extrusor alrededor del mandril central, como una especie de dado tipo gancho para ropa plano.



**Figura 6.6** Dado con canal de distribución (Tadmor y Gogos, 2006).

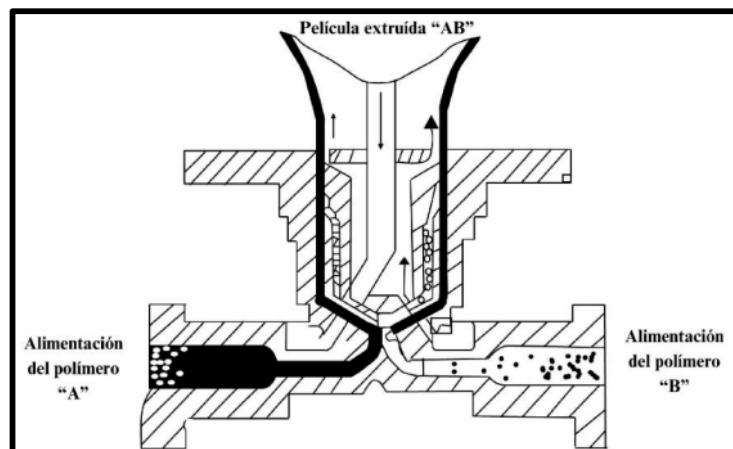
Los dados apilados aparecieron hace relativamente poco tiempo. Se utilizan principalmente para producir películas multicapa de diámetros pequeños. Este tipo de dado está compuesto por una serie de placas alimentadas desde los lados, apiladas una a una sobre otra (Figura 6.7).



**Figura 6.7** Dado apilado para co-extrusión de película soplada (Tadmor y Gogos, 2006).

En un dado de coextrusión, cada capa posee su propia placa. Una ventaja de este tipo de dado es que es posible incluir capas de aislamiento térmico entre las placas, permitiendo así que las placas permanezcan a diferentes temperaturas. Además, el sistema es extremadamente compacto, en comparación con otros tipos de dados. Finalmente, otra ventaja de utilizar este dado es su flexibilidad: de hecho, es posible sustituir, añadir o quitar fácilmente las placas para alterar el número de capas producidas.

La co-extrusión (Figura 6.8) de varios materiales requiere de varios extrusores como de materiales que se deseen incorporar en el producto final extruido. El cabezal es alimentado por los flujos de materiales provenientes de los diferentes extrusores.

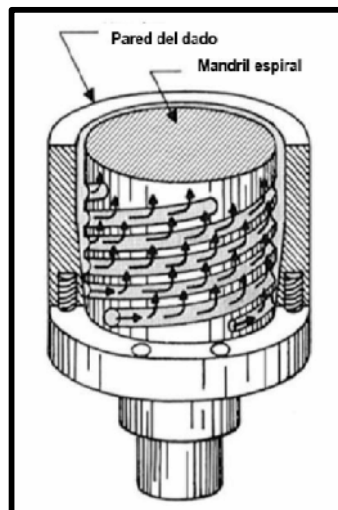


**Figura 6.8** Cabezal para co-extrusión.

Los dados helicoidales son los más utilizados actualmente y permiten obtener caudales elevados, para películas de dimensiones constantes (Figura 6.9). Cabe destacar también que este tipo de dados pueden alojar una gran variedad de materiales.

El polímero fundido se introduce en los canales helicoidales interconectados, que distribuyen circunferencialmente el polímero fundido de la forma más uniforme posible. Los canales helicoidales están seguidos por una zona de relajación que reduce el efecto memoria, lo cual es muy común en polímeros.

Este tipo de dados se pueden utilizar para producir películas multicapa, pero en este caso, cada resina debe tener su propio sistema de canales helicoidales y su propia zona de relajación. Los materiales se agrupan en secciones, situadas encima de las zonas de relajación, justo antes de la salida del dado. Como resultado, los dados son extremadamente voluminosos.



**Figura 6.9.** Dado helicoidal para soplado de películas (Tadmor y Gogos, 2006).

**Tabla 6.1.** Configuración de instalaciones de co-extrusión

| Extrusores | Disposición de los dados | Estructura del Complejo                | Materiales Utilizados                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | A                        | A                                      | LDPE<br>HDP<br>E<br>HM<br>EVA<br>PP                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|            | AB                       | AB<br>AA A                             | LDPE 1/LDPE 2<br>LDPE/ EVA<br>LDPE/ HOPE<br>Modificado                                                                                                                                                                                                                                                                |
|            | ABA (ABC)                | ABA<br>AAA A                           | LDPE 1/LDPE 2/ LDPE 3<br>LDPE/HDPE/LDPE<br>Ionómero/ LDPE/Ionómero<br>Ionómero/ HDPE/ Ionómero<br>EVA/LDPE/EVA                                                                                                                                                                                                        |
|            | AbC                      | AbC<br>AaA A<br>AaB AB                 | LDPE/ Ionómero/ PA-Copolímero<br>LDPW/ EVA Modificado/ PA<br>EVA/ Ionómero/ PA<br>EVA/ EVA Modificado/PA                                                                                                                                                                                                              |
|            | ABC                      | ABC<br>AAA A<br>AAB AB<br>ABA<br>AbC   | LDPE 1/ LDPE 2/ LDPE 3<br>LDPE/ HDPE/ EVA<br>Ionómero<br>LDPE/ EVA/ PP<br>LDPE/ Ionómero/ PA                                                                                                                                                                                                                          |
|            | ABCBA                    | ABCBA<br>ADAaA A<br>AaBaA ABA          | LDPE/ Ionómero/ PA/ Ionómero/ LDPE<br>LDPE/ EVA Modificado/ PA/ EVA Modificado/ LDPE<br>EVA/ Ionómero/ PA/ Ionómero/ EVA<br>EVA/EVA Modificado/ PA/ EVA Modificado/ EVA<br>LDPE/ Polímero/ EVA/ Polímero/ LDPE<br>EVA/ Polímero/ EVA/ Polímero/ EVA<br>LDPE/ EVA/ PP/ EVA/ LDPE<br>LDPE/Polímero/ PETP/ Polímero/LDPE |
|            | ABCBA                    | ABCBD<br>AaAaA A<br>AaBaA ABA<br>ABCBA | LDPE/ Ionómero/ PA/ Ionómero/ EVA<br>LDPE/ EVA Modificado/ PA/ EVA Modificado/EVA<br>LDPE/ Ionómero/ PA/ Ionómero/ LDPE<br>LDPE/Compatibilizante/ EVA/Compatibilizante/<br>EVA<br>LDPE/ Compatibilizante / PA/ Compatibilizante<br>/PA                                                                                |

## 6.5 Datos de operación

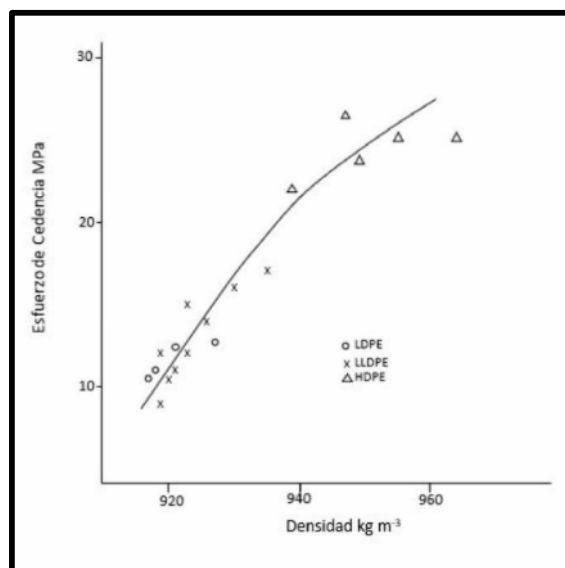
Datos operativos para una línea de extrusión soplado de películas.

**Tabla 6.2.** Flujos de Producción Máximos de Película de LLDPE\*

| ÍNDICE DE FLUIDEZ                                   | 1.6          | 1.6         | 1           |
|-----------------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| Abertura labios/                                    |              |             |             |
| Longitud del Dado                                   | 0.080"X.872" | .110"X.750" | .110"X.750" |
| Temperatura del Fundido (°F)                        | 380          | 370         | 430         |
| Velocidad del Husillo (RPM)                         | 56           | 57          | 42.5        |
| Amperios (Corriente)                                | 134          | 155         | 102         |
| Presión (PSI)                                       | 4200         | 4200        | 3300        |
| Aire de enfriamiento (Pulgadas de H <sub>2</sub> O) | 5.5          | 6.5         | 7           |
| Temperatura del Aire de enfriamiento (°F)           | 42           | 40          | 42          |
| Relación de Soplado                                 | 2.5:1        | 2.5:1       | 2.7:1       |
| Gasto producción (libras/h)                         | 340          | 360         | 284.1       |
| Espesor (milésimas de pulgada)                      | 1            | 1           | 1           |

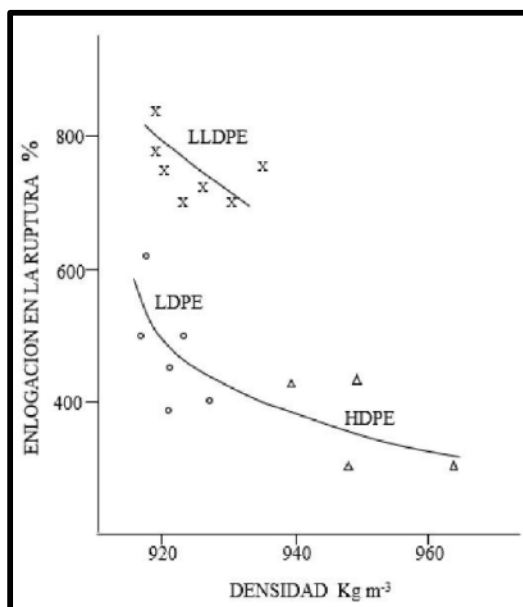
Proporcionados por VASA, S.A de C.V

En la figura 6.10 de propiedades de las películas fabricadas, se observa el polímero “HDPE”, el cual presenta mayores valores de esfuerzo de cedencia. Por otro lado, los polímeros “LLDPE” y “LDPE” presentan valores muy similares.



**Figura 6.10** Esfuerzo de cedencia en función de la densidad de las películas sopladas.

En la figura 6.11 SE observa que los polímeros que presentan mayores valores de elongación a la ruptura son “LLDPE” y “LDPE”.



**Figura 6.11** Elongación a la ruptura (%) en función de la densidad de las películas sopladas

## 6.6 Fabricación industrial

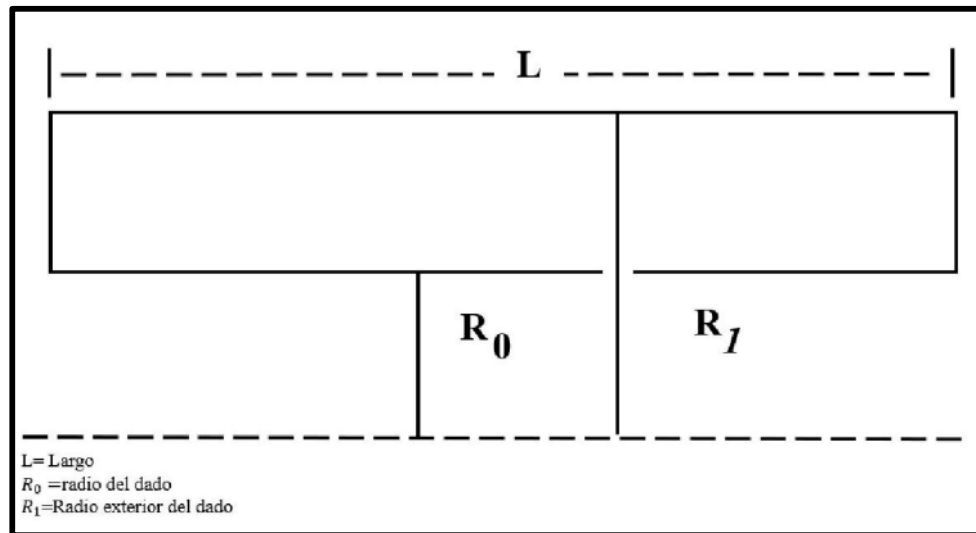
En la Figura 6.13 se presentan los detalles del proceso de una empresa que fabrica bolsas para basura negras (bolsas de polietileno de baja densidad). Se puede observar el dado anular, la burbuja en detalle y el proceso global.



**Figura 6.11** Proceso de fabricación de bolsas para desechos negras: a) dado anular, b) burbuja en detalle y c) proceso global. Fotos proporcionadas por VASA, S.A de C.V.

## 6.7 Flujo en un dado anular

El dado puede dividirse en secciones anulares que poseen las siguientes características.



**Figura 6.12 Secciones del dado anular para fabricación de película soplada**

Flujo Volumétrico en una sección anular para fluido Newtoniano, está dado por [Bird y Col, 1992]:

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot R^4}{8 \cdot \mu \cdot L} \cdot \left[ (1 - k^4) - \frac{(1 - k^2)^2}{\ln(1/k)} \right] \dots \dots \dots (6.4)$$

$$k = R_0/R_i$$

Donde:

Q=Flujo volumétrico a través del dado.

$\Delta P$ =Caída de presión.

R=Radio del dado.

L=Longitud del dado.

k= Relacion de radio externo/radio interno del dado

Para un fluido que obedece la ley de potencia de viscosidad, el flujo volumétrico es tal como sigue [Lafleur y Vergnes, 2014]:

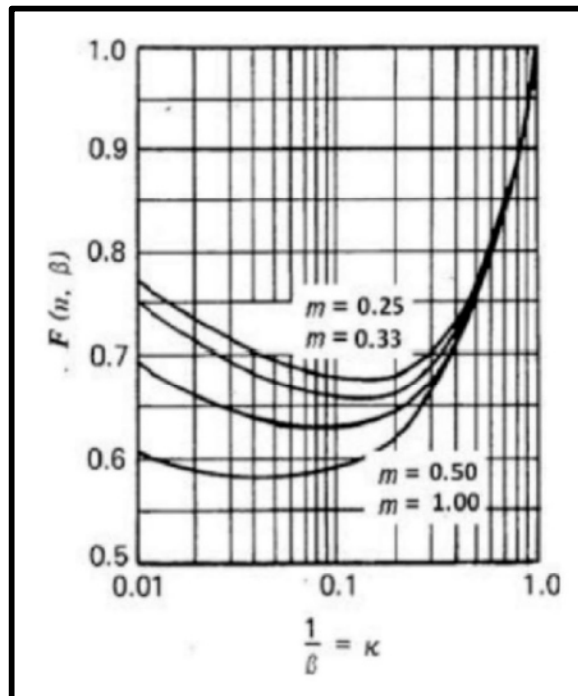
$$Q = \left( \frac{\pi \cdot R_1}{s+2} \right)^3 \cdot \left[ \frac{R_1 \cdot \Delta P}{2 \cdot m \cdot L} \right]^s \cdot \left[ \frac{\beta-1}{\beta} \right]^{2+s} \cdot F(\eta, \beta) \dots \dots \dots (6.3)$$

Donde:

$s$  =inverso del parámetro de ley de potencia de viscosidad =  $1/n$

$\beta$  =Relación de los radios =  $R_i/R_0$

$m$ = Parámetro de ley de potencia.



**Figura 6.13** Función  $F(m, \beta)$  para flujo volumétrico de fluidos ley de potencia en la región anular (Fredrickson y Bird, 2020).

El término  $F(\eta, \beta)$  depende de la pseudoplasticidad del polímero y de la geometría del dado. Para los dados anulares utilizados en extrusión-soplado, el factor geométrico  $k$  se encuentra siempre en el rango de  $0.5 < k < 1.0$ .

Ejemplo: diámetro interior: 8.0"

$$k = \frac{8.0}{8.1} = 0.988$$

diámetro exterior: 8.1"

Para valores de  $k$  en el rango de 0.5 a 1.0, el término  $F(\eta, \beta)$  depende únicamente de la geometría de dado (Figura 6.13). Al reemplazar  $F(\eta, \beta)$  por una función en la expresión del flujo volumétrico, se obtiene (Lafleur y Vergnes, 2014):

$$Q = \left( \frac{\pi R_1^3}{s+2} \right) \left[ \frac{R_1 \Delta P}{2 \cdot m \cdot L} \right]^s \left[ \frac{\beta-1}{\beta} \right]^{2-s} \left( \frac{1+\beta}{2\beta} \right) \dots \dots \dots (6.4)$$

## 6.8 Ejemplos prácticos (casos de estudio)

**Problema 1.** Se utiliza un proceso de extrusión soplado para fabricar dos películas delgadas. La película (1) se produce a una velocidad de 120 pies por minuto y tiene un ancho aplanado (aplanado con 2 capas) de 25 pulgadas. La película (2) se produce a una velocidad de 15 pies por minuto y tiene un ancho aplanado de 50 pulgadas. Usando las siguientes definiciones:

$$BUR = \frac{\text{Diametro de la burbuja}}{\text{diametro del dado}}$$

$$TUR = \frac{\text{Velocidad de la película sólida}}{\text{Velocidad del polímero fundido a la salida del dado}}$$

$$\rho_{fundido} = \rho_{sólido}$$

### Datos:

Diámetro del dado: 8 pulgadas

Apertura de los labios: 0.024 pulgadas

Velocidad del polímero fundido: 15 pies/minuto

Película (1)

$$V_1 = 120 \text{ pies/min}$$

$$2W_1 = 25'' \times 2 = 50''$$

Película (2)

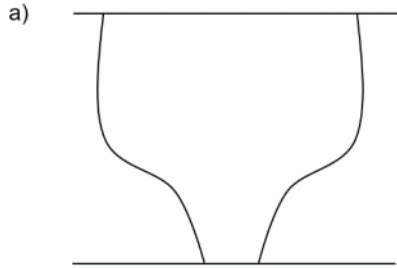
$$V_2 = 15 \text{ pies/min}$$

$$2W_1 = 50 \times 2 = 100''$$

**Responda a lo siguiente:**

A) Desarrolle una expresión que permita calcular el espesor de la película en función de la apertura de los labios ( $\delta$ ) del dado de la relación BUR y de la relación TUR.

B) Calcule el espesor de las películas (1) y (2).



Sólido

Balance de materia entre “1” y “2”

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

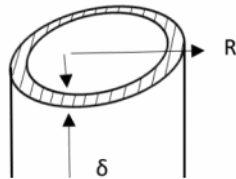
$$2\pi R_f \delta_f \times \rho_f \times V_f = 2W_S \times e \times \rho_s \times V_S$$

$$e = \frac{\pi R_f \delta_f V_f}{W_S V_S}$$

$$e = \frac{V_f}{V_S} \cdot \frac{\pi R_f \delta_f}{W_S}$$

$$W_S = \frac{\pi D_B}{2}$$

$$e = \frac{V_f}{V_S} \cdot \frac{\pi D_f \delta_f / 2}{\frac{\pi D_S}{2}} = \frac{V_f}{V_S} \cdot \frac{D_f}{D_S} \cdot \delta_f = e$$



Película (1)

$$V_S = 120 \text{ pies/min}$$

$$2W_S = 50''$$

$$V_f = 15 \text{ pies/min}$$

$$D_f = 8''$$

$$\delta_f = 0.024''$$

$$2W_S = \pi D_S, \quad D_S = \frac{2W_S}{\pi} = \frac{50}{\pi}$$

$$BUR = \frac{D_S}{D_f} = \frac{50/\pi}{8} = 1.989$$

$$TUR = \frac{V_S}{V_f} = \frac{120}{15} = 8$$

$$e_1 = \frac{0.024}{1.989 \times 8} = 1.508 \times 10^{-3} \text{ plg}$$

Película (2)

$$V_S = 15 \text{ pies/min}$$

$$2W_S = 100''$$

$$D_S = \frac{100}{\pi}$$

$$BUR = \frac{100/\pi}{8} = 3.979$$

$$TUR = \frac{V_S}{V_f} = \frac{15}{15} = 1$$

$$e_2 = \frac{0.024}{1 \times 3.977} = 6.032 \times 10^{-3} \text{ plg}$$

**Problema 2.** Una línea de extrusión soplado de películas funciona con un dado perfectamente circular. Calcule para un fluido obedeciendo una ley de potencia de viscosidad, la pérdida de presión en el dado.

**Datos:**

Geometría del dado

$$R_{interior} = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$R_{exterior} = 5.3 \text{ cm} = 5.3 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$L = 10 \text{ cm} = 1 \times 10^{-1} \text{ m}$$

Viscosidad

$$m = 9128.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$$

$$n = 0.386$$

**Solución:**

$$k = \frac{R_{int}}{R_{ext}} = \frac{5}{5.3} = 0.9434 \quad k \rightarrow ] \quad F(\eta, B) \rightarrow 1$$

$$Q = \left( \frac{\pi R_{ext}^3}{\frac{1}{n} + 2} \right) \left[ \frac{R_{ext} \Delta P}{2mL} \right]^{\frac{1}{n}} [1 - k]^{\frac{1}{n} + 2}$$

$$Q = \left( \frac{\pi (5.3 \times 10^{-2})^3}{\frac{1}{0.386} + 2} \right) \left[ \frac{5.3 \times 10^{-2} \Delta P}{(2)(9128.4)(1 \times 10^{-1})} \right]^{\frac{1}{0.386}} [1 - 0.9434]^{(1/0.386) + 2}$$

$$\Delta P = 2.98 \text{ MPa}$$

**REFERENCIAS**

1. Bird R.B, Stewart W.E, Lightfoot E.N. (2020), Fenómenos de Transporte, Editorial Reverté, Barcelona.
2. Fredrickson A.G., Bird R.B. (1958), "Non-Newtonian flow in annuli", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 50, pp. 347–352.
3. Lafleur P. and Vergnes B. (2014), Polymer Extrusion, Editorial Wiley.
4. Tadmor Z., Gogos C.G (2006). Principles of Polymer Processing, 2nd ed., Wiley, New York.

## **CAPÍTULO VII**

### **EXTRUSIÓN DE CINTAS Y PELÍCULA PLANA**

#### **7.1 Introducción**

Las películas planas no superan los 0.2 mm de espesor. Su espesor más común se encuentra entre 50 y 100 micrones. Las cintas normalmente tienen un espesor entre 0.4 mm y 2 mm

Películas: ancho: de 25 cm a 3 metros

Cintas: ancho: de 2 cm a 20 cm

#### **7.2 Componentes en la fabricación**

##### **7.2.1 Extrusores**

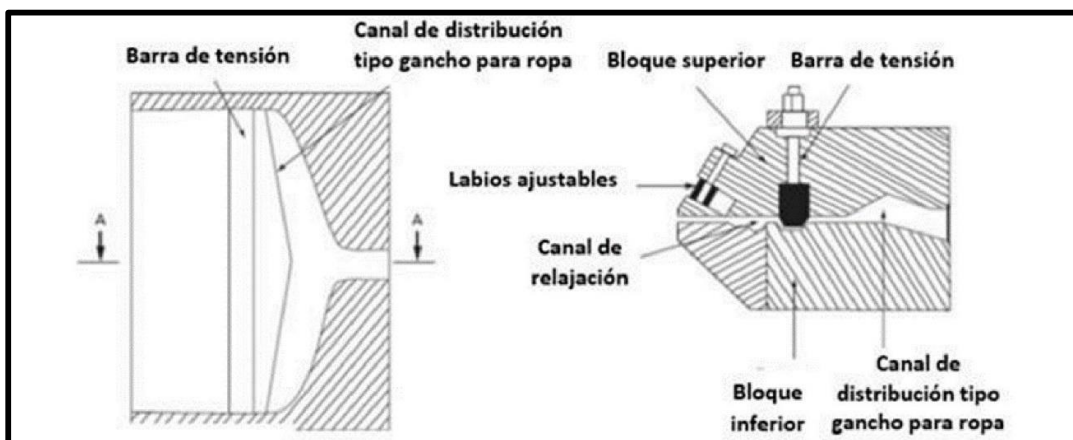
Se utilizan extrusores monohusillo para la transformación de materiales plásticos en forma de gránulos y extrusores de doble husillo para la elaboración de productos en polvo (PVC en mezcla seca). Antes de ingresar al dado, el material generalmente se filtra mediante una malla que retienen las impurezas eventuales, perjudiciales para las cualidades técnicas o de presentación de las películas y cintas. El cambiador de mallas suele ser de accionamiento hidráulico y la operación del cajón porta-mallas es casi instantánea y no requiere detener la línea de producción. Un transductor de presión permite verificar el valor de la presión sobre la malla, cuyo aumento indica el grado de obstrucción de las mallas en servicio.

##### **7.2.2 Recepción del extruido**

A la salida del dado, el extruido se introduce entre los cilindros de la calandra, se enfría antes de ser estirado y cortado. Las películas y cintas, se almacenan embobinándolos en rollos.

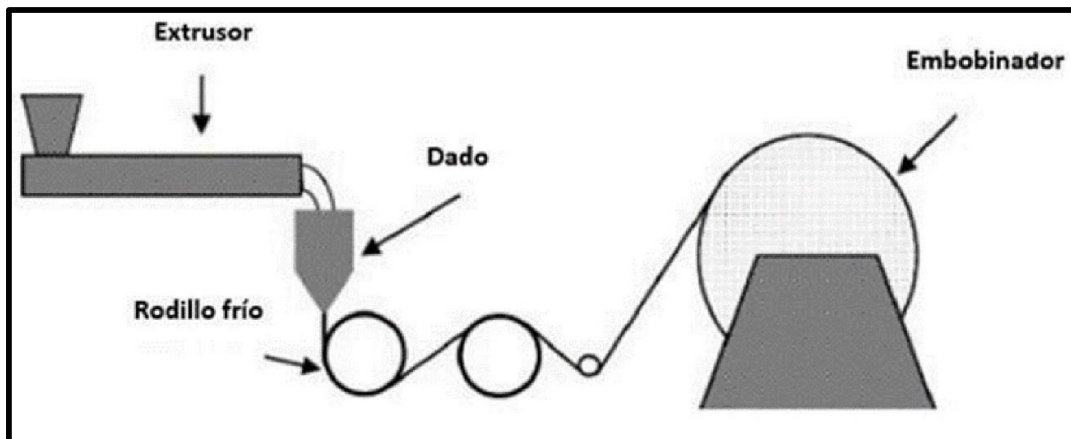
### 7.2.3 Cabezal- dado plano

Es el elemento principal del equipamiento en una línea de producción de películas. El cabezal y el dado con una sección transversal final rectangular forman en este caso un conjunto diferente al utilizado para la extrusión de tubos o perfiles de todo tipo. El tamaño de estos dados está en el rango de algunos centímetros (normalmente mayor a 25) a varios metros en ancho y con una abertura de 0.2 a 25 mm. El material proveniente del husillo entra y se distribuye en el canal distribuidor situado transversalmente al eje de la extrusor. El canal que alimenta el dado tiene forma de cola de pez o gancho de ropa (Figura 7.1). Esta forma asegura una distribución uniforme del polímero y, por lo tanto, garantiza un espesor de película uniforme a la salida del dado. De hecho, debido a que el dado es muy ancho y el polímero se alimenta en el centro, el polímero que fluye a través del centro del dado está sujeto a un gradiente de presión diferente al de las paredes laterales, lo que provoca variaciones en los caudales locales. El uso de la geometría de "tipo gancho para ropa" puede reducir este efecto. También es necesario mencionar que el control de la temperatura es extremadamente importante para mantener un caudal constante, a través de todo el ancho del dado. Los sistemas modernos están equipados con labios metálicos flexibles, ubicados a la salida del dado. Estos labios se pueden ajustar utilizando servomotores, para aumentar o disminuir con precisión la abertura del dado, controlando así el espesor del polímero fundido (alrededor de 1mm).



**Figura 7.1** Dado tipo gancho para ropa para película plana (Vergnes y Agassant, 2008).

A la salida del dado, la película se estira axialmente y luego se pone en contacto con un rodillo de enfriamiento. Normalmente, la distancia entre la salida del dado y el rodillo de enfriamiento es de aproximadamente 10 cm. Se requiere un enfriamiento rápido para evitar la formación de cristales que pueden hacer que la película se vuelva translúcida. Después, la película se enrolla utilizando una bobinadora. Para minimizar los defectos de la superficie, los rodillos involucrados en el enfriamiento y el estiramiento se pulen. Un diagrama del proceso se muestra en la Figura 7.2. La principal ventaja de esta técnica es que es posible producir películas transparentes y resistentes al desgaste con baja turbidez, a tasas de producción muy altas. Sin embargo, solo se enfría la superficie de la película. Para maximizar este enfriamiento, es posible utilizar un segundo rodillo. Para algunas aplicaciones específicas, que requieren una película completamente transparente, es posible enfriar la película en un baño de agua. Sin embargo, esto reduce en gran medida la tasa de producción.

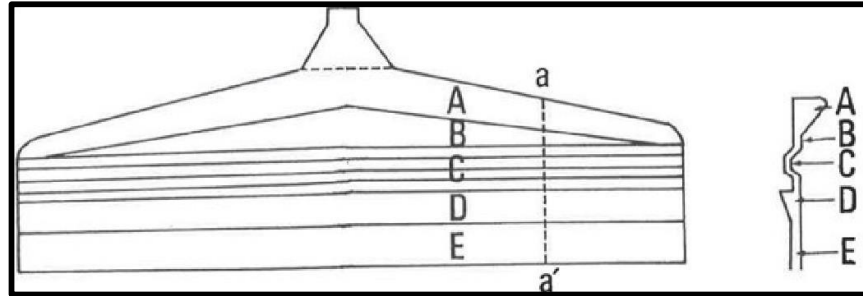


**Figura 7.2.** Línea de extrusión de película plana (Lafleur y Vergnes, 2014).

También es necesario cortar los bordes de la película, ya que pueden diferir mucho en grosor del resto de la película. Normalmente, para un dado con un ancho de 2,6 m, es necesario quitar 5 cm de cada lado de la película. El grosor varía aproximadamente un 3% a lo largo del ancho de la película. Las dimensiones y propiedades de la película están controladas por las dimensiones del dado, la eficiencia de enfriamiento y las velocidades de estiramiento y extrusión.

### 7.3 Flujo en un dado plano

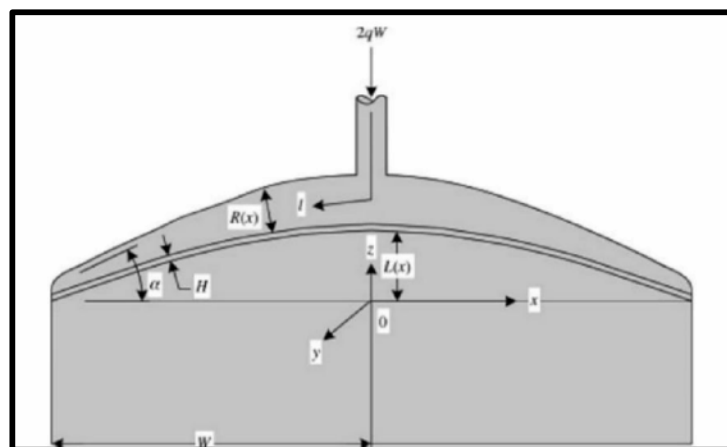
Se va a estudiar el flujo en un dado plano que se utiliza para la fabricación continua de películas.



**Figura 7.4** Distribución en el dado tipo gancho para ropa.

De acuerdo a la Figura 7.4 se describe el flujo del polímero en el dado de películas: el material que sale del extrusor fluye en un canal de distribución A con una sección que disminuye, de donde escapa entre los labios B. Una barra de estrangulamiento C y luego un canal de relajación D, permiten mejorar la distribución del polímero entre los labios E.

El diseño del dado debe asegurarnos que, para una apertura de dado constante, el polímero fundido debe fluir a temperatura y caudal constantes. Se va a presentar un modelo isotérmico que permitirá cumplir con estos objetivos para un fluido que sigue una ley de potencia de viscosidad. La geometría utilizada es la siguiente (Tadmor and Gogos, 1979):



**Figura 7.5** Diagrama mostrando las zonas de un dado tipo gancho para ropa (Tadmor y Gogos, 1979).

El canal de distribución es tubular y su radio varía con la posición  $l$ . La curvatura del canal de alimentación es pequeña y forma un ángulo  $\alpha$  con la horizontal. La abertura de los labios ( $H$ ) es constante y  $q$  es el flujo volumétrico por unidad de anchura a la salida del dado.

Si la presión a la entrada del canal de alimentación es constante, tendremos un flujo constante en la entrada. El objetivo es distribuir este flujo de manera uniforme sobre la sección del dado. Considerando que la abertura de los labios es constante, se puede escribir:

$$\frac{dP}{ds} = a = \text{constante} \dots\dots\dots (7.1)$$

Al integrar la ecuación 1, obtenemos:

$$[L(0)-L(x)] \cdot a = P_0 - P'(l) \dots\dots\dots (7.2)$$

$P'(l)$  es la presión en el canal de distribución en la posición  $l$ .  $P_0$  es la presión en la entrada del canal de distribución. La relación entre  $x$  y  $l$  es proporcionada por la geometría del dado.

Al derivar la ecuación 2 con respecto a  $l$ , se obtiene una relación entre el gradiente de presión en el canal de distribución, el gradiente de presión en la sección plana y la forma del canal de distribución.

$$\frac{dP'}{dl} = a \frac{dL}{dl} \dots\dots\dots (7.3)$$

Esta ecuación representa los objetivos que se han establecido para el diseño del dado y se aplica a todos los tipos de fluidos. Se va a derivar las ecuaciones para un fluido que sigue una ley de potencia. Si se considera la región plana del dado un flujo entre placas paralelas, la ecuación de equilibrio dinámico se escribe:

$$-\frac{dP}{dz} - \frac{d\tau_{yz}}{dy} = 0 \dots\dots\dots (7.4)$$

Para un fluido que obedece a una ley de potencia:

$$\tau_{yz} = -m \left[ \frac{dv_z}{dy} \right]^{n-1} \frac{dv_z}{dy} \dots \dots \dots (7.5)$$

Donde "m" es el parámetro de consistencia y "n" es el índice de pseudoplasticidad

La ecuación de equilibrio dinámico puede integrarse utilizando las siguientes condiciones frontera:

$$\begin{aligned} \text{en } y &= 0, dv_z/dy = 0 \\ \text{en } y &= \pm H/2, \quad v_z = 0 \end{aligned}$$

Se obtiene:

$$v_z(y) = \frac{n}{n+1} \left( \frac{1}{m} \frac{dP}{dz} \right)^{1/n} \left( \frac{H}{2} \right)^{(n+1)/n} \left[ \frac{2|y|^{(n+1)/n}}{H} - 1 \right] \dots \dots \dots (7.6)$$

reemplazando  $s = 1/n$  y  $\xi = 2y/H$ , la ecuación se convierte en:

$$v_z(y) = \left( \frac{1}{1+s} \right) \left( \frac{1}{m} \frac{dP}{dz} \right)^s \left( \frac{H}{2} \right)^{1+s} [|\xi|^{1+s} - 1] \dots \dots \dots (7.7)$$

Esta expresión para la velocidad en función de la posición y, puede integrarse sobre la sección para obtener la relación entre el caudal por unidad de ancho y la caída de presión.

$$a = \frac{dP}{dz} = 2^{n+1} (2+s)^n m \frac{q^n}{H^{2N+1}} \dots \dots \dots (7.8)$$

Para tratar el flujo dentro del canal de distribución, se considera que localmente se tiene un flujo desarrollado dentro de un tubo. Esta suposición prescinde de la curvatura del canal, así como del flujo dentro de los labios del dado.

Para el flujo dentro de un tubo [Tadmor y Gogos, 2006]:

$$Q = \left( \frac{\pi R^3}{S+3} \right)^n \left( \frac{R \Delta P}{2mL} \right)^S \dots \dots \dots (7.9)$$

Después de reorganizar:

$$-\frac{dP'}{dl} = \left(\frac{3+s}{\pi}\right)^n 2m \frac{Q^n(l)}{R(x)^{3n+1}} \dots\dots\dots(7.10)$$

El flujo volumétrico en el canal de distribución  $Q(l)$  alimenta el dado plano:

$$Q(l) = Q(x) = q(W - x) \dots\dots\dots(7.11)$$

Combinando las ecuaciones 8 y 9 se obtiene:

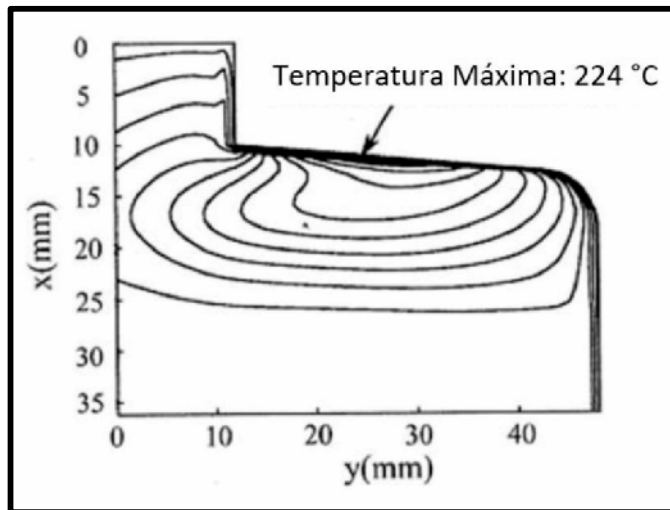
$$-\frac{dP'}{dl} = \left(\frac{3+s}{\pi}\right)^n 2m \frac{[q(W-x)]^n}{R(x)^{3n+1}} \dots\dots\dots(7.12)$$

Con la ayuda de las ecuaciones 7.8 y 7.10, la ecuación 7.3 toma la siguiente forma:

$$\frac{2^n(2+s)^n}{H^{2n+1}} \left(\frac{dL}{dl}\right) + \left(\frac{3s}{\pi}\right)^n \frac{(W-x)^n}{R(x)^{3n+1}} = 0 \dots\dots\dots(7.13)$$

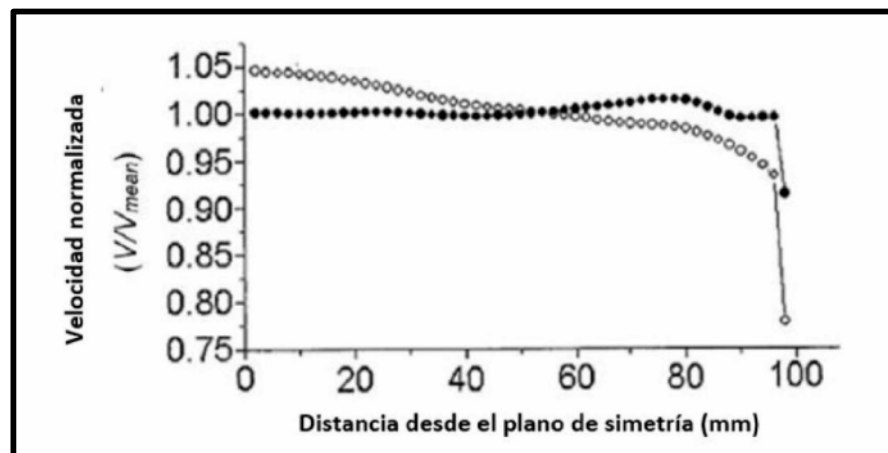
La ecuación 7.13 nos permite calcular, para un ancho de dado determinado y un fluido que sigue una ley de potencia, la geometría del canal de distribución ( $dL/dl$  o  $R(x)$ ). En la práctica, el factor  $dL/dl$  es constante y el radio del canal de distribución se calcula para asegurar un flujo uniforme

También se han desarrollado modelos de flujo 3D que utilizan los métodos de volumen finito o de elementos finitos [WU y Col., 2006]. Su objetivo principal es establecer condiciones frontera correctas en las paredes del dado (condición de frontera sin deslizamiento) y proporcionar información sobre los perfiles de temperatura. La figura 7.6 muestra que la temperatura máxima no se alcanza en los labios del dado sino en el canal de distribución. Este resultado es particularmente importante para materiales sensibles al calor.



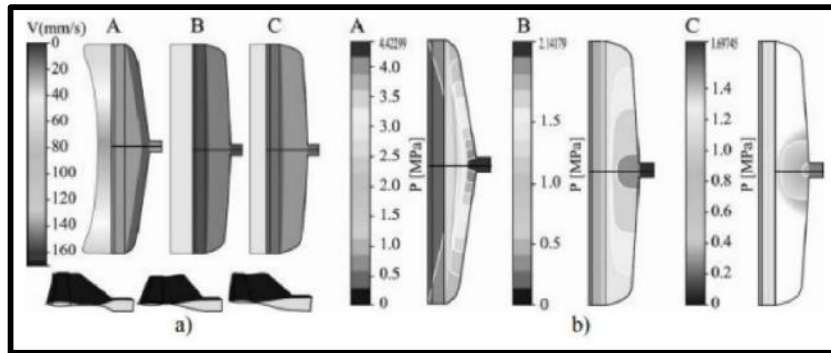
**Figura 7.6** Distribución de temperatura en la superficie x-y de la esquina superior del dado tipo gancho para ropa a 200 °C (en la entrada y en las fronteras) (WU y col., 2006).

Como muestran Meng y col. (2009) y Lebaal y colaboradores (2009), es posible combinar una técnica de optimización con un algoritmo de simulación 3D que emplea elementos finitos para optimizar las dimensiones del dado. Meng y colaboradores (2009) utilizaron algoritmos genéticos basados en dos parámetros: el espacio entre los labios y el ángulo del canal de flujo. La figura 7.7 muestra un resultado óptimo obtenido después de 22 iteraciones.



**Figura 7.7** Distribución de velocidad a la salida del dado tipo gancho de ropa. Comparación entre el resultado inicial ( $\circ$ ) y el resultado optimizado ( $\bullet$ ) (Meng y Col., 2009).

Utilizando un algoritmo de optimización diferente, Lebaal y Colaboradores (2009) optimizaron la distribución del flujo en la salida manteniendo el gradiente de presión al mínimo (Figura 7.8).



**Figura 7.8** Distribución de velocidad a) y presión b) para el dado original (A) y los dados optimizados (B y C) (Lebaal y Colaboradores, 2009).

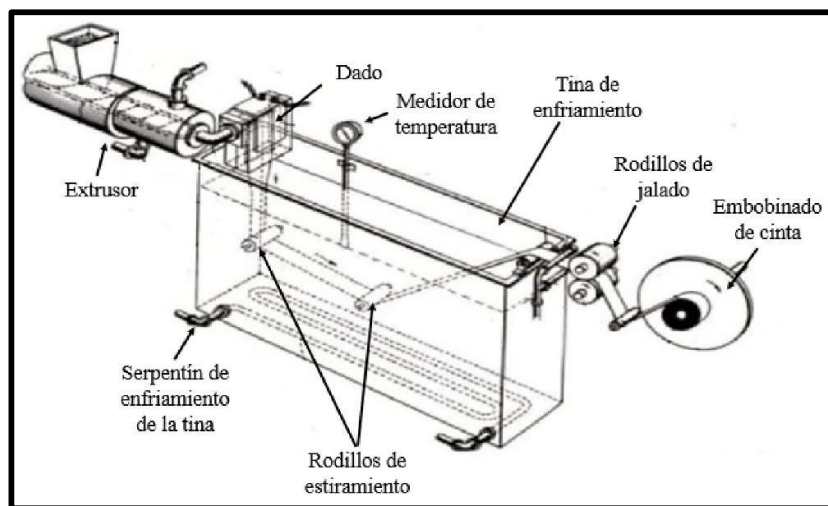
Tal y como se muestra en Figura 7.8a, la velocidad de la película plana oscila mucho formando un perfil parabólico, en cambio para los dados A y B, la velocidad de la película es más constante. De manera similar en la Figura 7.8 b, la presión varía mucho en el dado A, y en los dados B y C la presión es más constante con valores relativamente bajos.

#### 7.4 Extrusión de cintas

Las cintas normalmente tienen un ancho hasta de 20 cm y un espesor máximo de 2 mm [Sampler, 1950]. Estas cintas pueden ser extruidas sobre rodillos fríos (ver sección 7.2.3) o bien introduciendo la cinta en una tina de agua como se muestra en la Figura 7.9. Aquí es muy importante el control de la temperatura a todo lo largo del extrusor, ya que la abertura máxima de los labios (sección transversal rectangular) finales del dado es de alrededor de 1-2.25 mm (abertura muy pequeña). Se debe asegurar el flujo volumétrico constante a través del dado rectangular para la uniformidad de la cinta terminada.

La temperatura debe ser lo suficientemente alta en el dado, para lograr fluir el polímero en la pequeña abertura de los labios del dado de sección rectangular, sin embargo, se debe tener cuidado con la degradación del polímero. Se debe controlar de manera precisa la temperatura en esta última zona del extrusor.

El enfriamiento del agua en la tina de enfriamiento es muy importante, para no introducir agua limpia del suministro municipal ya que aumentan los gastos de operación del proceso o bien, el proceso puede ser afectado por la reciente escasez de agua nivel mundial. El agua debe ser enfriada o bien agua recuperada y reutilizada en la tina.



**Figura 7.9** Línea de producción de cintas plásticas (Sampler, 1950).

#### 7.4.1 Detalles técnicos importantes para la fabricación de cintas plásticas

La longitud del dado plano de extrusión deber ser al menos 25 veces el espesor de la cinta deseada. En el caso de cintas de polietileno utilizan hasta 50 veces el espesor de las cintas como longitud del dado de sección rectangular [Sampler, 1950]. Esta longitud es para poder obtener dimensiones deseadas y prevenir deformaciones de la cinta durante la fabricación.

El ancho y el espesor de las cintas de controla con un jalador tipo oruga. El nivel en la tina de enfriamiento también ayuda a controlar las dimensiones de la cinta, entre más llena esta latina se aumenta el ancho de la cinta.

El control de la temperatura en el agua de la tina también es muy importante, temperaturas muy altas en la tina pueden generar deformaciones en la cinta bajo los esfuerzos del jalado o una mal acabado de la cinta. Temperaturas muy bajas en la tina, pueden generar cintas no uniformes en sus dimensiones. Sampler (1950) para el caso de cintas de polietileno sugiere temperaturas en la tina de enfriamiento entre 46°C y 60°C.

Ejemplos de las aplicaciones de cintas se muestran en la Figura 7.10. Se aplican como zoclo en paredes (Figura 7.10a), como cintas de privacidad en mallas ciclónicas (bardas: Figura 7.10b) y en cuartos de refrigeración (7.10 c) para prevenir aumentos de temperatura. Estas últimas también se utilizan en auto-hoteles.



**Figura 7.10** Aplicaciones de cintas plásticas.

## 7.5 Ejemplos prácticos (casos de estudio)

Problema 1. Para un dado para fabricar película plana (Figura 7.5), el canal distribuidor hace un ángulo ( $\alpha$ ) de  $5^\circ$  con la coordenada x. La abertura del dado (H) es de 0.05cm, el ancho W es de 100cm, el índice de ley de potencia de viscosidad del polímero es de 0.5. Calcule el radio en el centro del dado y en una posición en el extremo de 90cm.

DATOS:

H=0.05 CM

$\alpha=5^\circ$

W= 100 cm

Índice de potencia= 0.5

Solución

De la ecuación 7.13 la expresión para R(x) es obtenida

$$R_{(x)}^{3n+1} = \frac{[(3 + s)/\pi]^n H^{2n+1} (w - x)^n}{2^n (2 + s)^n \left(\frac{dL}{dl}\right)}$$

Donde:

$$\frac{dL}{dl} = \text{sen } \alpha = -0.0872$$

Para n=0.5, la ecuación precedente se reduce a:

$$R(x) = 0.0175(w - x)^{0.2}$$

Para x=0;  $R(0) = (0.175)(2.51) = 0.44 \text{ cm}$

Para x=90;  $R(90) = (0.175)(1.58) = 0.27 \text{ cm}$

Este diseño da como resultado una curvatura poco pronunciada del canal distribuidor, en el extremo del dado el radio del distribuidor es de 0.277 cm ( $2.77 \times 10^{-3}$  m) lo cual es un valor

relativamente bajo. El valor máximo del radio es de 0.44 cm (en  $x=0$ ) lo cual es aproximadamente nueve veces la abertura del dado.

Cabe resaltar que la conicidad en el distribuidor disminuye ligeramente con la disminución de  $n$ , mientras que la dependencia del radio del distribuidor con respecto a  $H$  aumenta con la disminución de  $n$ . El radio del distribuidor tiende a infinito cuando el ángulo  $\alpha$  es igual a 0 y es muy sensible con valores muy pequeños. El radio a lo largo del distribuidor es independiente de  $m$ .

### **PROBLEMA PROPUESTO**

Efecto del índice de la ley de potencia en el diseño de un dado tipo gancho para ropa. Utilizando la ecuación de diseño del dado tipo de gancho para ropa para fluidos de la ley de potencia de viscosidad desarrollada en la Sección 7.3, examine si el diseño obtenido para el polímero hipotético con índice de potencia ( $n$ ) = 0.5 en el Ejemplo 1 producirá una lámina uniforme con los siguientes dos polímeros:

- 1) HIPS LX-2400 (ex-Monsanto) con el parámetro  $m$  ( $T = 443K$ ) = 760000 Pa.s <sup>$n$</sup>  y  $n=0.20$
- 2) Nylon Capron TM 8200 con un parámetro  $m$  ( $T = 503K$ ) = 1950 Pa.s <sup>$n$</sup>  y  $n = 0,66$ .

Si no es así, ¿qué diseño(s) dará(n) una película (lámina) uniforme a partir de una abertura  $H$  del dado = 0,05 cm?

## REFERENCIAS

1. LEBEAL N., SCHMIDT F., PUISSANT S. (2009). "Design and optimization of threedimensional extrusion dies, using constraint optimization algorithm", *Finite Elements Analyse and Design*, vol. 45, pp. 333–340.
2. MEIRA G. Y GUGLIOTTA L. (2019), *Polímeros, Introducción a su Caracterización y a la Ingeniería de la Polimerización*, Ediciones UNL, Argentina.
3. MENG K., WANG X., HUANG X (2009). "Optimal design of the coat-hanger die used for producing melt-blown fabrics by finite element method and evolution strategies", *Polymer Engineering & Science*, vol. 49, pp. 354–358..
4. SAMPLER, L.F (1950), Polyethylene tape extrusion, U.S.A. Patente 2,499,421.
5. TADMOR Z., GOGOS C.G (1979), *Principles of Polymer Processing*, Wiley, New York.
6. VERGNES B., AGASSANT J.F. (2008). "Modélisation des écoulements dans les filières d'extrusion", AM 3655, *Techniques de l'Ingénieur*, Paris.
7. WU T., JIANG B., XU S. (2006). "Nonisothermal comprehensive 3D analysis of polymer melt flow in a coat-hanger die", *Polymer Engineering & Science*, vol. 46, pp. 406-415

## EPILOGO

En el Capítulo 1 se abordó la “Introducción” del Libro abordando los principios generales de los polímeros para poder entender el procesamiento de polímeros, el Capítulo 2 “Tipos de extrusores y otros equipos de mezclado”, fue desarrollado debido a que normalmente los polímeros son formulados o reforzados con varios tipos de partículas y los extrusores también se consideran mezcladores en su última zona, sobre todo los extrusores de doblehusillo para incorporar partículas. En este capítulo 2 se describieron los tipos de mezcladores para incorporar cargas/refuerzos en polímeros.

El Capítulo 3 “Extrusión Monohusillo” tuvo como objetivo general analizar, comprender y calcular el proceso de flujo en un extrusor monohusillo utilizando herramientas analíticas, para mejorar el diseño del tornillo y optimizar en general el proceso de extrusión. En este Capítulo se incluyeron Ejemplos Prácticos (Cálculos).

El Capítulo 4 “Extrusión de perfiles”, donde el sistema de husillo-barril-dado es el corazón del proceso, se estudiaron perfiles huecos y sólidos y el enfoque teórico para el cálculo de los flujos en los correspondientes dados de producción. Igualmente, en este Capítulo se incluyeron Ejemplos Prácticos (Cálculos).

En el Capítulo 5, se estudió el Aislamiento de Cable, el cual es un proceso que es basado principalmente en la Teoría de lubricación, donde el conductor arrastra el polímero fundido para ser recubierto. Con esta simple Teoría de lubricación millones de metros de cable eléctrico son producidos anualmente alrededor del mundo. También se incluyeron Ejemplos Prácticos (Cálculos) en este capítulo. En el Capítulo 6 se estudió el Proceso de Extrusión de Película Soplada, es el único proceso que permite producir películas de gran tamaño con dados relativamente pequeños. Por ejemplo, películas de 2.8 metros de ancho son producidas con dados de 30 cm de diámetro. Al mismo tiempo este proceso de extrusión utiliza menos energía, lo que reduce los costos de producción comparado al de película plana visto en el capítulo 7. Finalmente, en el Capítulo 7 “Extrusión de cintas y película plana”, un cabezal con un dado con sección transversal rectangular son los elementos principales del equipamiento en las líneas de producción. En la producción de película plana, el canal que alimenta el dado tiene forma de un gancho de ropa para asegurar una distribución uniforme del polímero y, por lo tanto, garantiza un espesor de película uniforme a la salida del dado. En la producción de cintas, la longitud del dado plano de extrusión

deber ser al menos 25 veces el espesor de la cinta deseada para prevenir deformaciones de la cinta durante la fabricación. En el caso de cintas de polietileno utilizan hasta 50 veces el espesor de las cintas como longitud del dado.

## ANEXO 1

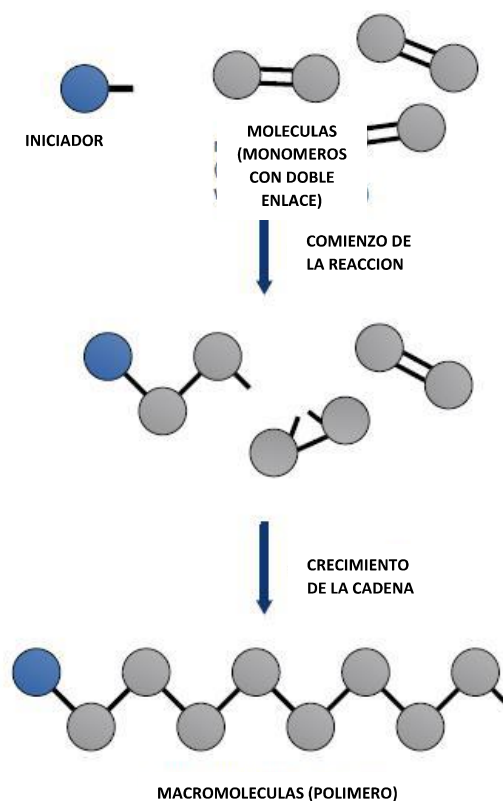
### SÍNTESIS DE POLÍMEROS

Las tres reacciones químicas más importantes (poli-reacciones) que hacen que los monómeros reaccionen para formar polímeros son la polimerización, la policondensación y la poliadición. La polimerización es una reacción de crecimiento en cadena en la que se combinan monómeros insaturados para formar polímeros, mientras que la policondensación y la poliadición son reacciones de crecimiento por etapas en las que diferentes moléculas reaccionan de forma alternada para formar una larga cadena polimérica. Ambas reacciones de crecimiento por etapas son similares, pero mientras que la poliadición no genera ningún subproducto, la policondensación produce subproductos como agua, ácido clorhídrico, amoníaco y alcoholes, que deben eliminarse para continuar la reacción.

#### **Polimerización**

La polimerización se explica aquí utilizando el ejemplo de una polimerización radicalaria (Figura 1). En la polimerización radicalaria, un generador de radicales, el llamado iniciador, proporciona radicales, es decir, moléculas con electrones libres/desapareados, que atacan el doble enlace  $C=C$  en monómeros como el eteno. El iniciador “captura” un electrón de este doble enlace y forma un enlace con el monómero. Este paso se llama inicio de cadena.

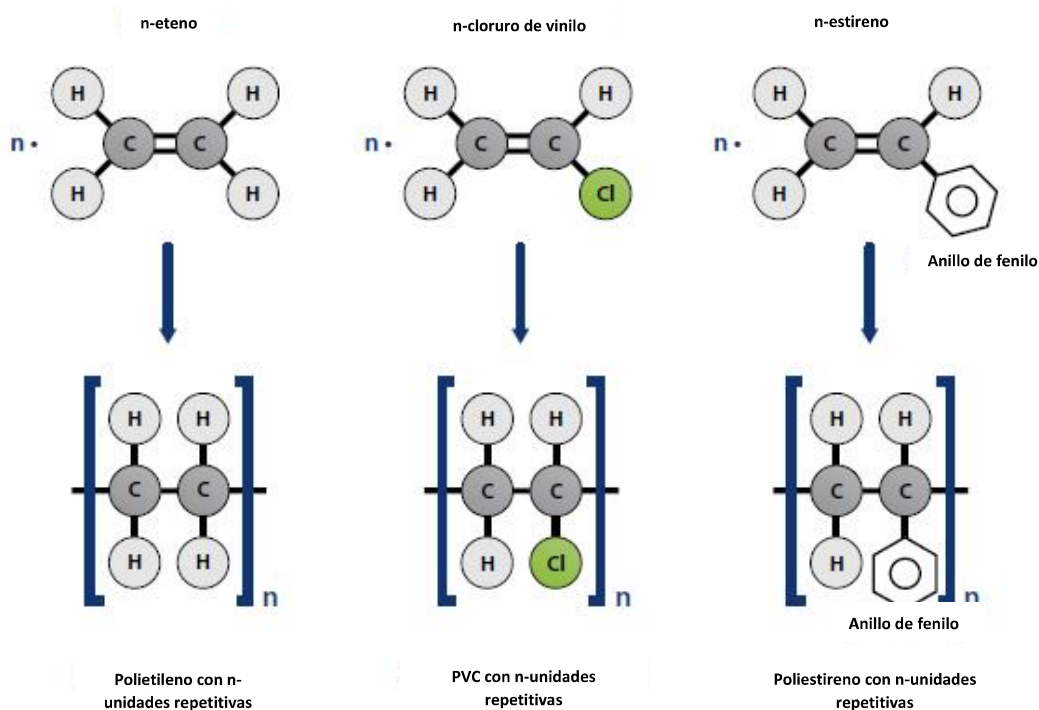
Al unirse al iniciador, el propio monómero se convierte en un radical y por lo tanto, forma un enlace con un monómero adyacente. Este, a su vez, se convierte en un radical y busca un siguiente compañero. La cadena molecular se hace cada vez más larga, lo que se denomina crecimiento en cadena. El crecimiento de las cadenas suele terminar por recombinación, es decir, los radicales de dos cadenas moleculares forman un enlace químico.



**Figura 1. Representación esquemática de la polimerización radicalaria**

La longitud de las cadenas moleculares está determinada por la concentración del iniciador. Cuanto mayor sea la concentración del iniciador, más cadenas se forman al principio de la polimerización y menos monómeros hay disponibles por cadena. Por lo tanto, las cadenas moleculares permanecen más cortas con la adición de más iniciador.

Un polímero con  $n$  unidades repetitivas se forma a partir de  $n$  monómeros (Figura 2). El monómero suele ser un hidrocarburo. El hidrocarburo más sencillo y adecuado es el eteno o etileno.



**Figura 2. Fórmulas estructurales de diferentes monómeros y sus correspondientes polímeros.**

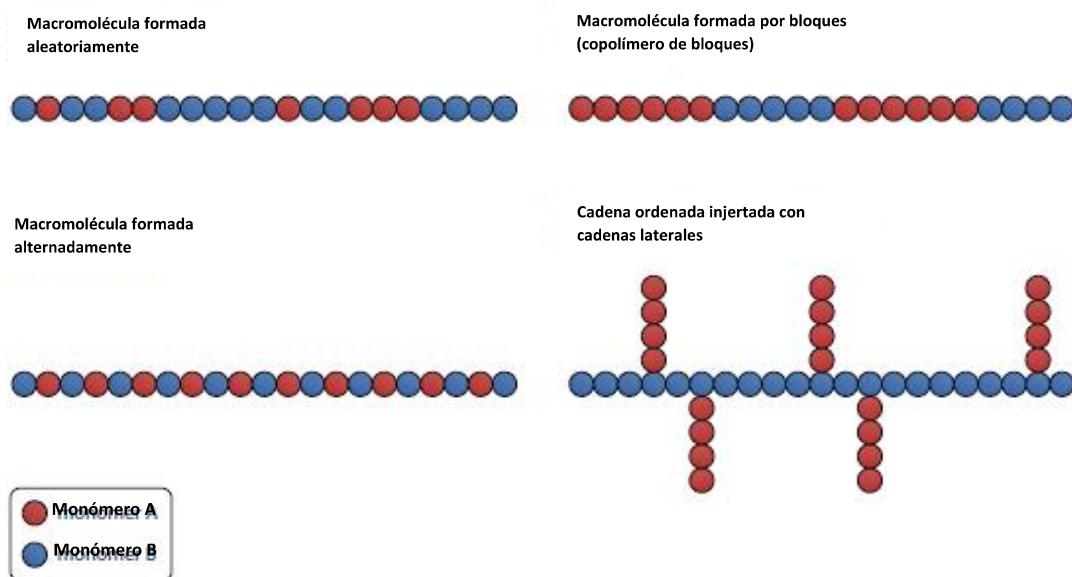
El átomo de hidrógeno suele sustituirse por un átomo o grupo de átomos característicos, el llamado sustituyente, que modifica químicamente al monómero. La sustitución de un átomo de H por un átomo de Cl da lugar al monómero de cloruro de vinilo. La sustitución por un anillo de fenilo da lugar al estireno. A partir de éste, se producen por polimerización radicalaria el polietileno (PE), el policloruro de vinilo (PVC) y el poliestireno (PS).

Para algunas reacciones de polimerización existen catalizadores especiales, los llamados compuestos organometálicos, que producen un polímero con una estructura particularmente regular. El monómero sólo puede unirse a la cadena de una manera muy específica. El tipo de enlace entre el catalizador y la cadena se denomina enlace coordinado y por lo tanto, se denomina polimerización coordinada. Los compuestos organometálicos más importantes son los catalizadores de Ziegler-Natta y los catalizadores de metalloceno. Los científicos Karl

Ziegler y Giulio Natta recibieron el Premio Nobel en 1963 por su trabajo sobre estos catalizadores.

### Copolimerización (Forma especial de Polimerización)

Si los polímeros en su reacción en cadena no están compuestos de un tipo de monómero sino de diferentes monómeros, la reacción se llama copolimerización. Las macromoléculas se llaman copolímeros. La incorporación de dos (raramente tres) monómeros diferentes influye en gran medida en las propiedades del polímero. La secuencia de los bloques de construcción de monómeros en la cadena puede ser estadística, alternada o en bloques (los llamados copolímeros en bloque) (Figura 3). Los copolímeros de injerto son una forma especial de copolímeros. Estos son polímeros con una cadena principal homogénea sobre la que se injertan cadenas laterales más cortas de otro tipo de monómero.



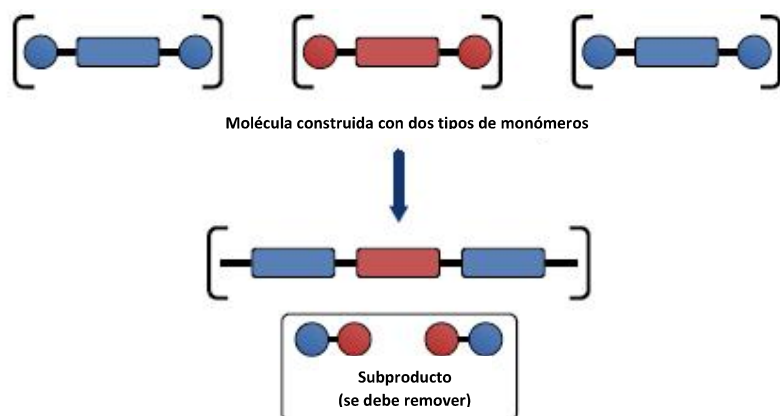
**Figura 3. Tipos de Co-Polímeros**

No se pretende dar la impresión de que se trata de una reacción de crecimiento por etapas de dos monómeros diferentes. La copolimerización también es una reacción de crecimiento en

cadena, sólo que con dos monómeros diferentes. También debe señalarse que la mezcla física de diferentes polímeros no es lo mismo que un copolímero

## Policondensación

La policondensación es una reacción de crecimiento escalonado de bloques de construcción moleculares multifuncionales. En la Figura 4, dos moléculas bifuncionales reaccionan para formar un polímero y forman un subproducto, que debe eliminarse para no ralentizar la reacción. Se forman subproductos de baja masa molar, como agua, amoníaco y ácido clorhídrico. Si los subproductos no se eliminan, el proceso de reacción se interrumpe.



Ejemplo: poliamida 6.6

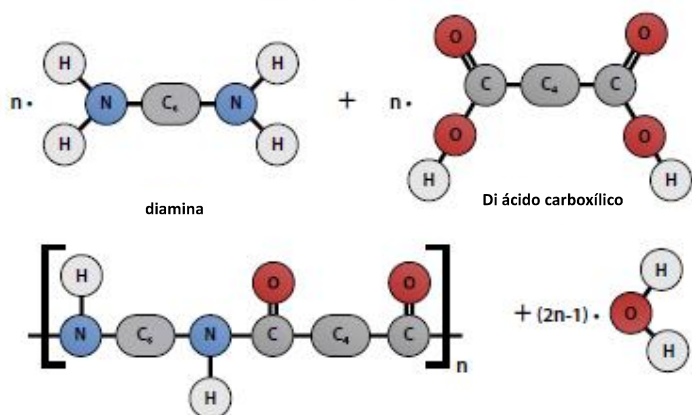


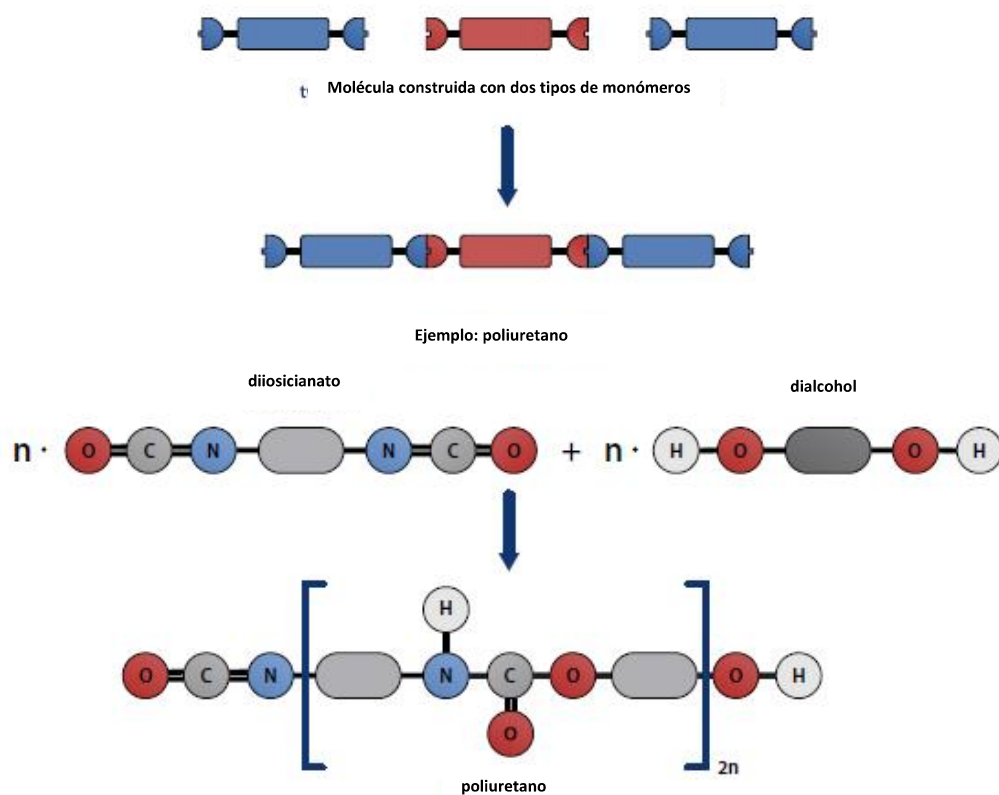
Figura 4. Ejemplo de Policondensación

De esta manera, por ejemplo, se produce poliamida 6.6 (PA66) a partir de una amina bifuncional (1,6-diaminohexano) y un ácido carboxílico bifuncional (p. ej., ácido adípico). Se forma una macromolécula con un grupo amida (CONH) y se elimina agua como subproducto.

Como se ha señalado anteriormente, la policondensación es una reacción de crecimiento por etapas, ya que, además de la reacción de monómeros bifuncionales individuales con una cadena existente, también pueden reaccionar entre sí dos cadenas de cualquier longitud para formar una cadena aún más larga. En comparación con la polimerización radical, esto no conduce a la terminación del crecimiento de la cadena, ya que los extremos de la cadena aún tienen grupos funcionales y, por lo tanto, pueden continuar reaccionando con monómeros, oligómeros y polímeros bifuncionales.

### **Poliadición**

En la reacción de crecimiento por etapas de poliadición, dos bloques de construcción moleculares multifuncionales diferentes (figura 5, aquí bifuncionales) también reaccionan entre sí. Sin embargo, no se forma ningún subproducto. El acoplamiento de los monómeros reactivos resulta del cambio de lugar de uno o más átomos, preferiblemente átomos de hidrógeno, que se desprenden con relativa facilidad de sus respectivos grupos terminales (–OH, –NH<sub>2</sub>, –COOH). Un ejemplo es la poliadición de isocianato bifuncional con un alcohol bifuncional para formar poliuretano.



**Figura 5. Ejemplo de Poliadicción**

## REFERENCIAS

1. Kohlgrüber Klemens, Michael Bierdel, Harald Rust, *Plastics Compounding and Polymer Processing*, Hanser, Munich (2022).
2. Billmeyer Fred W, *Textbook of Polymer Science*, Wiley, Third Edition, New York (1984)

**ANEXO 2.**  
**EQUIPOS DE MEZCLADO TIPO BATCH, MEZCLADORES CONTINUOS,**  
**EXTRUSORES Y ACCESORIOS.**

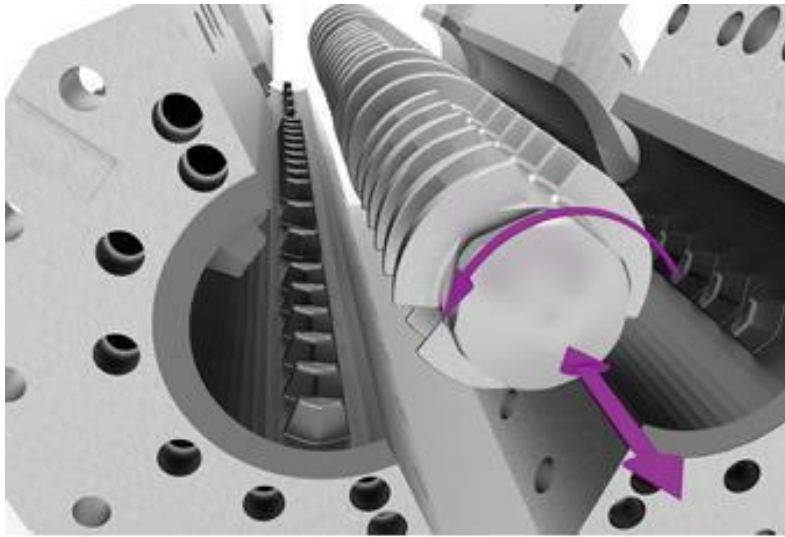
**ESTE APENDICE AYUDA A VISUALIZAR LOS EQUIPOS EXPLICADOS EN  
ESTE LIBRO**



**MEZCLADOR INTENSIVO HENSHELL**



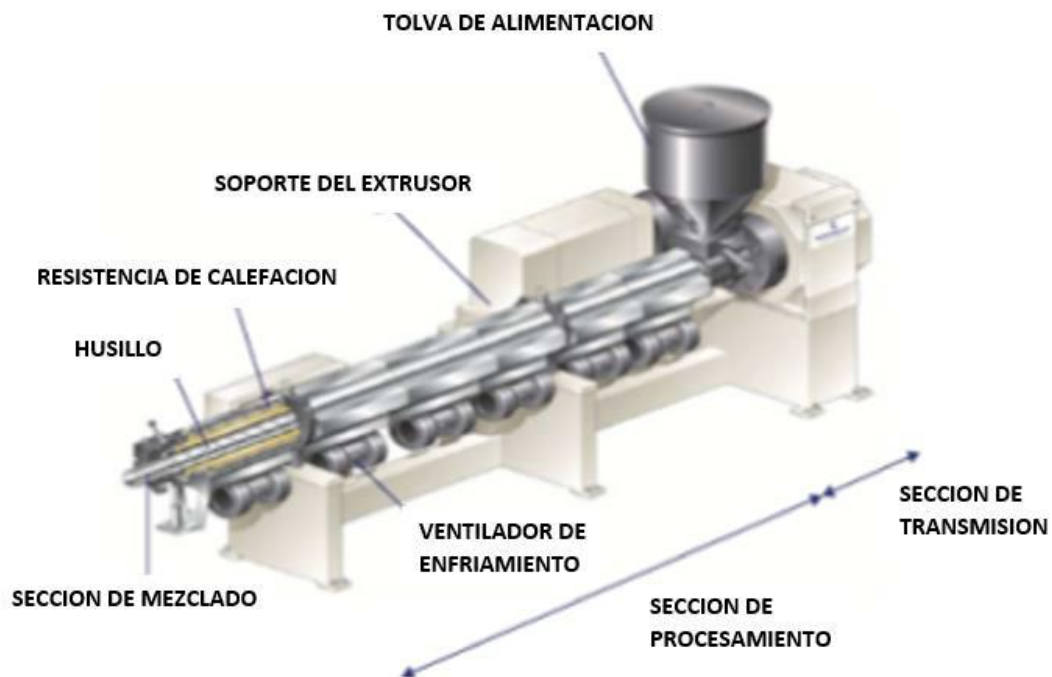
**MEZCLADOR CONTINUO FARREL**



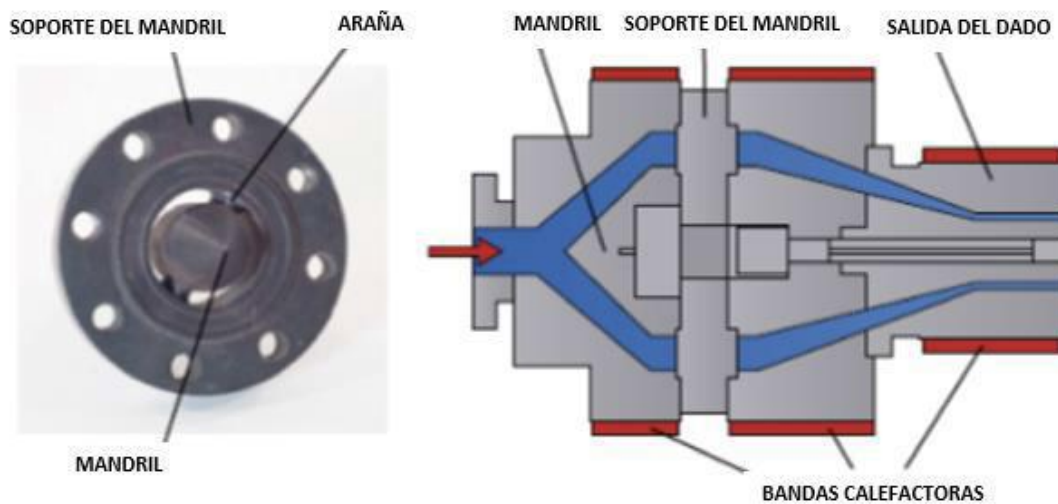
**EXTRUSOR RECIPROCANTE**



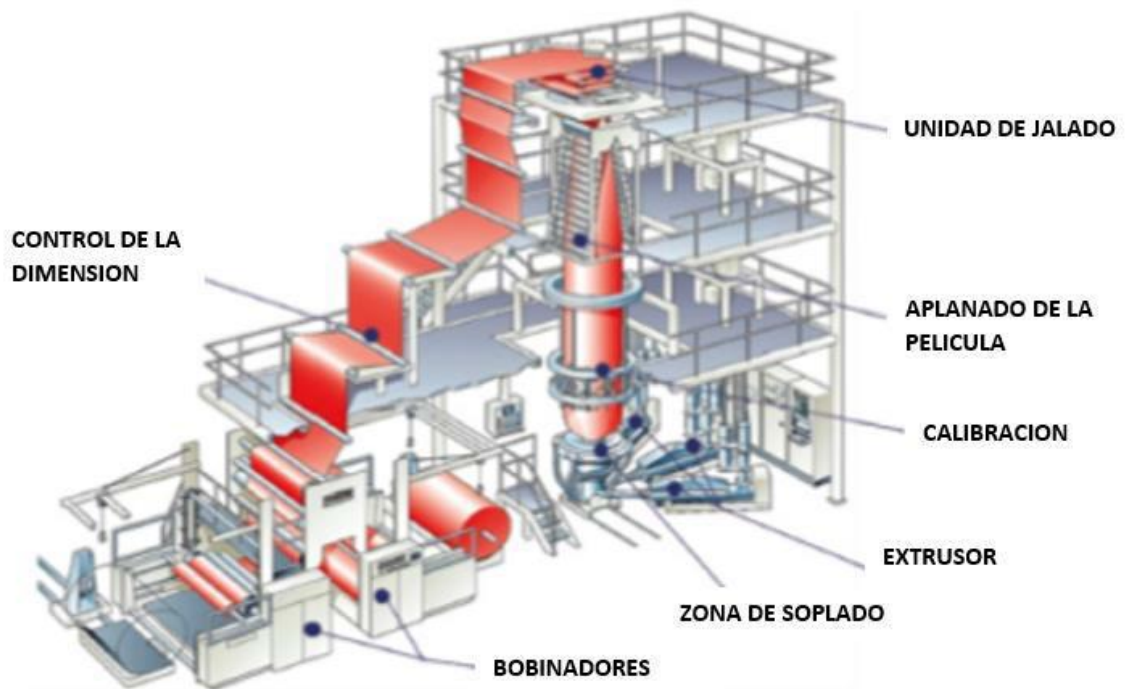
**ELEMENTOS DE UN EXTRUSOR DE DOBLEHUSILLO**



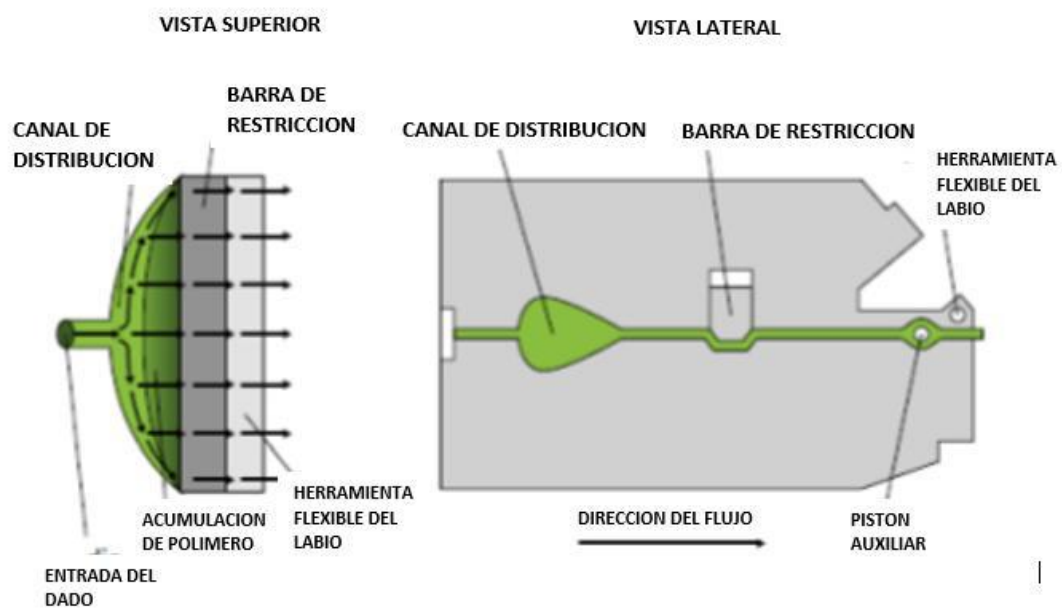
### EXTRUSOR MONOHUSILO



### DADO TIPO ARAÑA PARA FABRICACION DE TUBOS



LINEA DE COEXTRUION (3 EXTRUSORES) DE PELICULA SOPLADA



ESQUEMA DE UN DADO TIPO GANCHO DE ROPA PARA PELICULA PLANA



**FOTOGRAFIA DE UN DADO TIPO GANCHO DE ROPA PARA PELICULA PLANA**

## **REFERENCIAS**

1. Bonten Christian, *Plastics Technology, Introduction and Fundamentals*, Hanser, Munich (2019)
2. Kohlgrüber Klemens, Michael Bierdel, Harald Rust, *Plastics Compounding and Polymer Processing*, , Hanser, Munich (2022).



## **POLÍTICAS ACADÉMICAS GENERALES DEL AÑO SABÁTICO DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

### **CARTA DE RECONOCIMIENTO DEL AUTOR DE LOS DERECHOS A FAVOR DEL TECN**

Ciudad de México, 25/ 10/ 2024

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO.  
PRESENTE

Bajo protesta de decir verdad, Tomás Lozano Ramírez, personal docente adscrito al ITCM del Tecnológico Nacional de México, manifiesto que en cumplimiento de mis actividades relacionadas con el Año Sabático elaboré la obra titulada "Procesamiento y Extrusión de Polímeros".

Con base en lo anterior, y con fundamento en los artículos 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y 46 de su Reglamento, reconozco que el Tecnológico Nacional de México es titular de los derechos patrimoniales sobre la misma y le corresponden las facultades relativas a la divulgación, integridad de la obra y de colección, conservando el derecho a figurar como autor.

Asimismo, respondo por la autoría y originalidad de la citada obra; y relevo de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que considere que con esta obra es afectado en alguno de los derechos protegidos por la Ley en cita, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas.

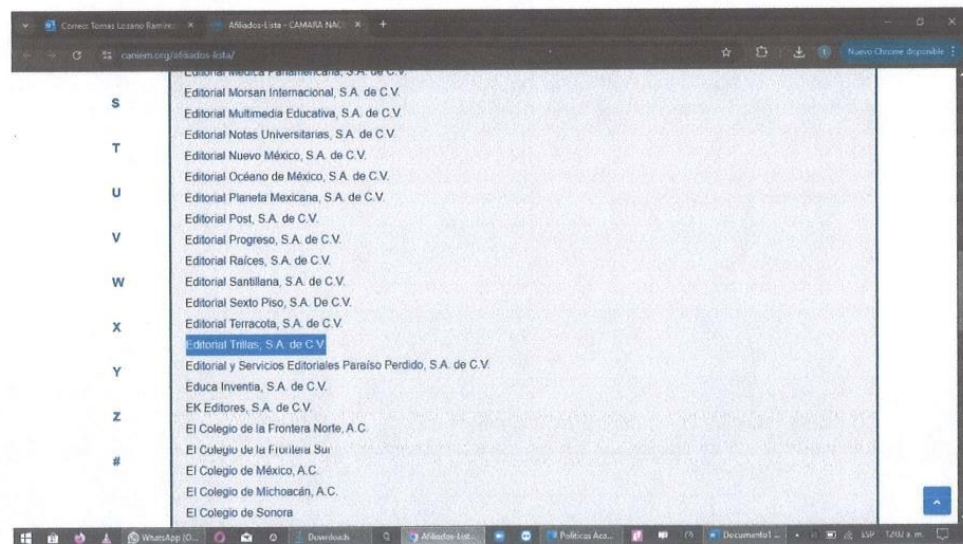
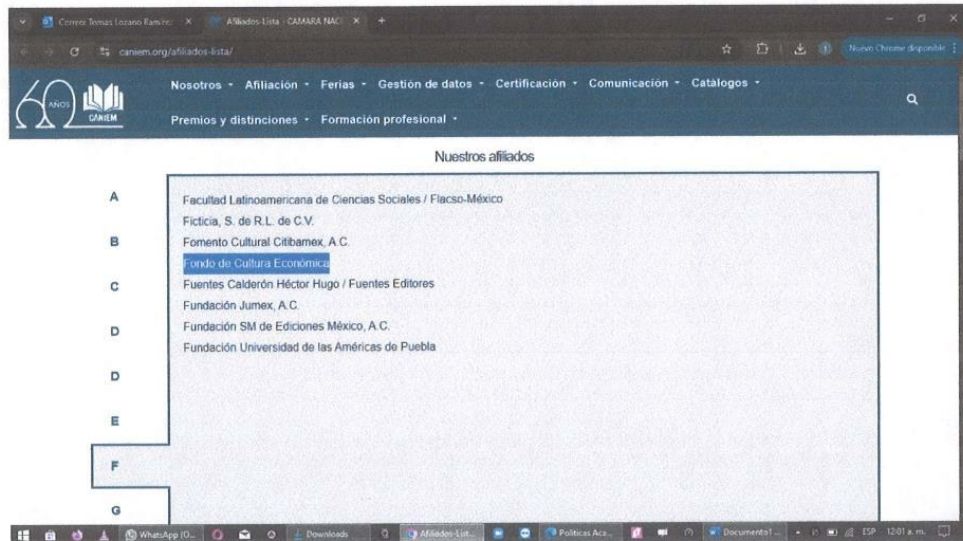
**ATENTAMENTE**

  
AUTOR

Tomás Lozano Ramírez

## CASAS EDITORIALES SELECCIONADAS

De acuerdo a TecNM sobre las POLITICAS ACADEMICAS GENERALES (PAGINAS-56-57) se seleccionaron dos 2 Editoriales que están registradas (afiliadas) a la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana (CANEIM). Se seleccionó la Editorial del Fondo de la Cultura Económica y Editorial Trillas.



Aquí se muestra la evidencia de la comunicación con estas editoriales



---

**RE: Libro para Publicar**

---

Desde secdireccion@trillas.mx <secdireccion@trillas.mx>

Fecha Vie 04/10/2024 11:05

Para Tomas Lozano Ramirez <tomas.lr@cdmadero.tecnm.mx>

Buenos días

Acusamos recibo de su libro,

Agradecemos su paciencia para la respuesta,  
Tan pronto haya una decisión, el Editor que lleve  
Su libro a evaluación se la hará saber.

gracias

---

**De:** Tomas Lozano Ramirez <tomas.lr@cdmadero.tecnm.mx>

**Enviado el:** domingo, 29 de septiembre de 2024 02:51 p. m.

**Para:** secdireccion@trillas.mx

**Asunto:** Libro para Publicar

Estimados Editores,

Estoy interesado en publicar mi libro titulado "Procesamiento y Extrusión de Polímeros".

Me gustaría saber el tiempo de revisión promedio, así como los costos de publicación.

Mi libro consta de 7 Capítulos y contiene 147 páginas. Anexo archivo

Su servidor trabaja como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas. Dpto. de Ing. Química y Bioquímica

Saludos Cordiales

Dr. Tomas Lozano



---

**Re: Publicación de Libro**

---

Desde Alberto Ramírez Torres <aramirezt@fondodeculturaeconomica.com>

Fecha Mié 02/10/2024 10:29

Para Tomas Lozano Ramirez <tomas.lr@cdmadero.tecnm.mx>

Buen día, Dr. Lozano,

el FCE económica no cobra por publicar obras, siempre y cuando pasen nuestro proceso de evaluación, el cual dura aproximadamente entre cuatro y seis meses. Si quisiera consultar más sobre la manera para publicar con nosotros puede visitar la siguiente página web: <https://www.fondodeculturaeconomica.com/ComoPublicar>

Saludos cordiales,

Alberto Ramírez  
Editor de Ciencia y Tecnología



Carretera Picacho Ajusco 227  
Colonia Ampliación Fuentes del Pedregal  
Alcaldía Tlalpan  
14110, Ciudad de México

(52 55) 5227-4672, ext. 4697  
[www.fondodeculturaeconomica.com](http://www.fondodeculturaeconomica.com)

---

De: Tomas Lozano Ramirez <tomas.lr@cdmadero.tecnm.mx>

Fecha: viernes, 27 de septiembre de 2024, 2:09

Para: Alberto Ramírez Torres <aramirezt@fondodeculturaeconomica.com>

Asunto: Publicación de Libro

Estimado Editor Alberto Ramírez,

Antes que nada me permito saludarlo.

Estoy interesado en publicar mi libro titulado "Procesamiento y Extrusión de Polímeros".

Me gustaría saber el tiempo de revisión promedio, así como los costos de publicación.

Mi libro consta de 7 Capítulos y contiene 155 páginas.

Su servidor trabaja como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Tamaulipas. Dpto. de Ing. Química y Bioquímica

Saludos Cordiales

Dr. Tomas Lozano

**LEYENDA DE CONFIDENCIALIDAD.**

De conformidad con el inciso a) del Artículo 57 del "Acuerdo por el que se emiten las políticas y disposiciones para impulsar el uso y aprovechamiento de la informática, el gobierno digital, las tecnologías de la información y comunicación, y la seguridad de la información en la Administración Pública Federal" publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de septiembre del 2021. La información contenida en correos institucionales, es de carácter confidencial y su tratamiento es con estricta observancia a los principios de licitud, finalidad, lealtad, consentimiento, calidad, proporcionalidad, información y responsabilidad establecidos en la Ley General de Protección de Datos Personales de Sujetos Obligados.

**LEYENDA DE CONFIDENCIALIDAD.**

De conformidad con el inciso a) del Artículo 57 del "Acuerdo por el que se emiten las políticas y disposiciones para impulsar el uso y aprovechamiento de la informática, el gobierno digital, las tecnologías de la información y comunicación, y la seguridad de la información en la Administración Pública Federal" publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de septiembre del 2021. La información contenida en correos institucionales, es de carácter confidencial y su tratamiento es con estricta observancia a los principios de licitud, finalidad, lealtad, consentimiento, calidad, proporcionalidad, información y responsabilidad establecidos en la Ley General de Protección de Datos Personales de Sujetos Obligados.