



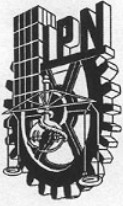
**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y
TECNOLOGÍA AVANZADA.**

**EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA FABRICACIÓN
DE PELLET Y PELÍCULA DE BAJA DENSIDAD (PEBD)
RECICLADO, ASÍ COMO SUS PROPIEDADES REOLÓGICAS Y
MECÁNICAS.**

**Tesis que para obtener el grado de Maestría en Tecnología Avanzada
presenta:**

Ing. Juan Reséndiz Muñoz

**Director de Tesis:
Dr. José Luis Fernández Muñoz.**



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 11:00 horas del día 23 del mes de Octubre del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-LEG para examinar la tesis de titulada: "Efecto del Tamaño de Partícula en la Fabricación de Pellet y Película de Baja Densidad (PEBD) Reciclado así como sus Propiedades Reológicas y Mecánicas"

Presentada por el alumno:

Reséndiz
Apellido paterno

Muñoz
materno

Juan
nombre(s)

Con registro:

A	0	5	0	1	9	5
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. José Luis Fernández Muñoz

Dr. Eduardo San Martín Martínez

Dr. José Antonio Calderón Arenas

Dr. Alfredo Cruz Orea

Dr. Miguel Angel Aguilar Frutis

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. José Antonio Irán Díaz Gongora
CENTRO DE INVESTIGACION EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGIA AVANZADA
DEL IPN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México D. F. el día 3 del mes diciembre del año 2007, el (la) que suscribe Juan Reséndiz Muñoz alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A050195, adscrito a CICATA LEGARIA, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José Luis Fernández Muñoz y cede los derechos del trabajo titulado "Efecto del tamaño de partícula en la Fabricación de Pellet y Película de Baja Densidad (PEBD) Reciclado así como sus Propiedades Reológicas y Mecánicas", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: jresendizm@prodigy.net.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Juan Reséndiz Muñoz
Nombre y firma

ÍNDICE

CAPÍTULO I BASES DE INVESTIGACIÓN		Página
I	Resumen	11
II	Abstract	12
1.1.	Introducción	13
1.2.	Planteamiento del problema	13
1.2.1	Problema de investigación	16
1.3.	Marco Teórico	17
1.3.1.	Polímeros y Polietileno de Baja Densidad	17
1.3.1.1.	Obtención Polietileno de Baja Densidad	17
1.3.1.2.	Polietileno lineal de Baja Densidad	18
1.3.1.3.	Clasificación de polietilenos	18
1.3.1.4.	Análisis por tipo de plástico	20
1.3.1.5.	Propiedades del Polietileno de Baja Densidad	21
1.3.1.6.	Grados	23
1.3.1.7.	Aplicaciones del PEBD	24
1.3.2.	Tecnología de polvos	24
1.4.	Antecedentes del Tema	26
1.4.1.	Propiedades del PEBD reciclado	26
1.4.2.	Aditivos	26
1.4.3.	Aplicaciones recomendadas	26
1.4.4.	Técnicas de reciclaje	26
1.4.4.1.	Molienda	27
1.4.4.2.	Características de los polímeros a reciclar	29
1.5.	Justificación	30
1.6.	Hipótesis	32
1.7.	Objetivos	32
1.7.1.	Objetivo general	32
1.7.2.	Objetivos específicos	32
CAPITULO II PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN, PRUEBAS, MATERIALES, Y MÉTODOS		
2.1.	Proceso de Compactado	33
2.1.1.	Características de la maquinaria (compactadora)	33
2.1.2.	Materiales	34
2.1.3.	Condiciones de Operación	34
2.1.4.	Método	34
2.2.	Proceso de Tamizado	34
2.2.1.	Descripción del proceso y toma de decisiones	35
2.3.	Proceso de Extrusión de Pellet	37
2.3.1	Geometría y Consideraciones generales	38
2.3.2.	Características de la maquinaria	40
2.3.3.	Producción de pellet sin tamizar, con tamaños de partícula de 10 y 20 de L1-PEBD2	41
2.3.3.1.	Condiciones de Operación, preparación de mezcla	41

	de L1-PEBD2 sin tamizar y producción	
2.3.3.2.	Preparación y producción de pellet con tamaños de partícula mallas 10 y 20 de L1-PEBD2	42
2.3.4.	Producción de pellet con tamaños de partícula de 4, 5, 10, 16 y 20 de L2-PEBD3	43
2.3.4.1.	Condiciones de operación para producción	43
2.3.4.2.	Condiciones de entrada y salida de producción	43
2.5.	Proceso de Extrusión de película	45
2.5.1.	Características de la maquinaria	49
2.5.2.	Condiciones de Operación de la Maquinaria	49
2.5.3.	Producción de Película para Lotes 1 y 2 de PEBD2 Y PEBD3 respectivamente	49
2.5.3.1.	Formulación y producción para corridas L1-SMPEBD2, L1-M10PEBD2 Y L1-M20PEBD2 se muestra en la Tabla No. 11	49
2.5.3.2.	Formulación y producción para corridas L2-STPEBD3, L2-M4PEBD3, L2-M5PEBD3 y L2-M10PEBD3, L2-M16PEBD3, L2-M20PEBD3.	52
2.6.	Pruebas Reológicas del Pellet	54
2.6.1.	Determinación del índice de Fluidez	55
2.6.1.1.	Materiales y equipo	56
2.6.1.2.	Condiciones de prueba	57
2.6.1.3.	Método	57
2.6.1.4.	Resultados preliminares	58
2.6.2.	Determinación del Esfuerzo de Corte (Velocidad de flujo) y de la Viscosidad del pellet de con resultados satisfactorios en producción de película extraída.	58
2.6.2.1.	Aplicaciones	63
2.6.2.2.	Materiales y equipo	68
2.6.2.3.	Condiciones de prueba	69
2.6.2.4.	Método	69
2.6.2.5.	Resultados preliminares	70
2.7.	Pruebas Mecánicas de la Película	71
2.7.1.	Determinación de la Tensión-Elongación de películas L1-PEBD2 y L2-PEBD3 en sus diferentes formulaciones.	71
2.7.1.1.	Materiales y equipo	72
2.7.1.2.	Condiciones de prueba	72
2.7.1.3.	Método	72
2.7.1.4.	Resultados preliminares	73
2.7.2.	Determinación la resistencia al rasgado de películas L1-PEBD2 y L2-PEBD3 en sus diferentes formulaciones.	75
2.7.2.1.	Materiales y equipo	75
2.7.2.2.	Condiciones de prueba	75
2.7.2.3.	Método	75
	CAPITULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS	
3.1.	Resultados de pruebas Reológicas y Mecánicas	77

3.1.1.	Resultados de índice de Fluidéz	.....	77
3.1.2.	Cálculos y resultados de las pruebas de viscosidad y velocidad de corte	.....	77
3.1.4.	Resultados de las pruebas de la Resistencia a la Tensión y % de Elongación.	.....	83
3.1.5.	Resultados de la prueba de resistencia al rasgado.	.....	84
3.2.	Análisis de costos en Mano de Obra directa	.....	84
3.3.	Interpretación de Resultados y Conclusiones	.....	85
3.4.	Otros proyectos	.....	86
3.5	BIBLIOGRAFÍA	.....	87

INDICE DE TABLAS

		Página
Tabla No.1	Principales propiedades del Polietileno de Baja Densidad	22
Tabla No.2	Valores recomendados de tamaño de partícula para diferentes plásticos reciclables.	29
Tabla No.3	Distribución del tamaño de partícula L1-PEBD2	35
Tabla No.4	Características de las mallas para tamizado	36
Tabla No.5	Distribución del tamaño de partícula L1-PEBD2	36
Tabla No.6	Distribución del tamaño de partícula L2-PEBD3	37
Tabla No.7	Datos de corriente consumida en diferentes zonas del extrusor en función de la temperatura.	42
Tabla No.8	Temperaturas TP y TR para producción de pellet con tamaños de partícula 4, 5, 10, 16 y 20	43
Tabla No.9	Producción de pellet por número de malla y sin tamizar	44
Tabla No.10	Temperaturas en las 5 zonas del cañón de extrusión de película	49
Tabla No.11	Formulación y condiciones de producción de la película con L1-PEBD2	49
Tabla No.12	Resultado de producción	50
Tabla No.13	Relación de mezclas para PEBD3	53
Tabla No.14	Resultados de extrusión de película con mezcla PEBD3	53
Tabla No.15	Resultados y cálculo de Índice de Fluidéz	58
Tabla No.16	Resultados de un reómetro capilar	63
Tabla No.17	Datos de la velocidad de corte y viscosidad	64
Tabla No.18	Resultados de caída de presión total	66
Tabla No.19	Resultados del esfuerzo de corte y de la viscosidad para un fluido newtoniano	67
Tabla No.20	Resultados del esfuerzo de corte y de la viscosidad para un fluido no newtoniano	68
Tabla No.21	Resultados preliminares de esfuerzo de corte resultante	70
Tabla No.22	Probetas elegidas en sentido longitudinal de la película	73
Tabla No.23	Probetas elegidas en sentido transversal de la película	73
Tabla No.24	Probetas elegidas en sentido longitudinal de la película	74
Tabla No.25	Probetas elegidas en sentido longitudinal de película	74
Tabla No.26	Resultados preliminares de pruebas de resistencia al rasgado en el sentido longitudinal de la película	76
Tabla No.27	Resultados de Índice de Fluidéz	77
Tabla No.28	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L1-STPEBD2	77
Tabla No.29	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L1-M10PEBD2	78
Tabla No.30	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L1-M20PEBD2	78

Tabla No.31	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-STPEBD3	79
Tabla No.32	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M4PEBD3	79
Tabla No.33	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M10PEBD3	80
Tabla No.34	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M10PEBD3	80
Tabla No.35	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M16PEBD3	81
Tabla No.36	Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M20PEBD3	81
Tabla No.37	Modelado de curvas de esfuerzo de corte y viscosidad para el logaritmo de velocidad de corte a 3.5 s^{-1}	83
Tabla No.38	Resultado de pruebas de tensión-elongación de películas de PEBD2 y PEBD3	83
Tabla No.39	Resultados de resistencia al rasgado de películas de PEBD2 y PEBD3	84
Tabla No.40	Costo de Mano de Obra Directa de pelletización y extrusión de película	84

INDICE DE FIGURAS

	Página	
Figura No. 1	Curva de distribución de pesos moleculares	19
Figura No. 2	Cadena polimérica.	20
Figura No. 3	Distintas representaciones de una cadena de Polietileno	20
Figura No. 4	Estructura molecular del Polietileno de Baja Densidad	21
Figura No. 5	Molienda Criogénica	28
Figura No. 6	Partes principales de un extrusor de Filamento o pellet.	38
Figura No. 7	Diseño de husillo con zonas de alimentación, compresión y dosificación de tamaño y formas diferentes	39
Figura No. 8	Diseño de un plato rompedor	40
Figura No. 9	Muestra un extrusor de película visto de forma lateral.	47
Figura No. 10	Diseño del dado de un extrusor de película	48
Figura No. 11	Muestra el barril de un reómetro capilar	61
Figura No. 12	Gráficas de esfuerzo de corte y Viscosidad	64
Figura No. 13	Gráfica de velocidades de corte obtenidas de relaciones ΔP_T y L/R para obtener y ΔP_T "e"	66
Figura No. 14	El cálculo de la pendiente representa el índice de la Ley de potencia	67
Figura No. 15	Gráfico del Esfuerzo de Corte vs Velocidad de Corte	82
Figura No. 16	Gráfico de la Viscosidad vs Velocidad de Corte	82

INDICE DE FOTOS

		Página
Foto No.1	Material compactado con impurezas de cinta canela	33
Foto No.2	Máquina compactadora	33
Foto No.3	Material de consumo post-industrial	34
Foto No.4	Tamizado del compactado	35
Foto No.5	Aspecto lateral de la máquina extrusora de pellet	41
Foto No. 6	Producción de pellet	41
Foto No.7	Aspecto del Pellet L2-M16PEBD3	44
Foto No.8	Aspecto del Pellet L2-STPEBD3	45
Foto No.9	Aspecto del Pellet L1-STPEBD2	45
Foto No.10	Aspecto del Pellet L2-M5PEBD3	45
Foto No.11	Mezclado de la formulación para producción de película	50
Foto No.12	Comienzo de producción entre películas	51
Foto No.13	Producción de película con PEBD2 Al comienzo de estabilizar la burbuja	51
Foto No.14	Enrollado de película	52
Foto No.15	Producción de película con PEBD3 Al momento de comenzar a estabilizar la burbuja	54
Foto No.16	Aspecto de las muestras para Medir el peso y encontrar el índice de fluidez	58
Foto No.17	Aspecto del filamento obtenido en Reómetro capilar para el análisis de viscosidad y esfuerzo de corte de pellet, muestra de L1-M20PEBD2	70
Foto No.18	Aspecto del filamento obtenido en Reómetro capilar para el análisis de viscosidad y esfuerzo de corte de pellet, muestra de L1-STPEBD2	71

CAPITULO I BASES DE INVESTIGACIÓN

I. Resumen

El presente trabajo de investigación, nos muestra el efecto del tamaño de partícula del Polietileno de Baja Densidad (PEBD) después de ser utilizado como empaque y/o embalaje y compactado o molido; en su reciclamiento como materia prima para producción de película plástica.

Se efectúa su producción separando sus diferentes tamaños de partícula y se analizan las propiedades reológicas del polímero y las propiedades mecánicas de la película. Esta investigación está enfocada a la contribución de la disminución de la contaminación y generación de basura, así como aumento de los ciclos de utilización del (PEBD) como película.

La investigación tiene como objeto comprobar que las propiedades mecánicas del producto final pueden ser mejoradas como la homogenización y reducción del tamaño de partícula.

Los problemas posteriores a resolver son: la limpieza del material, la producción constante del tamaño de partícula y el diseño de la maquinaria y el proceso para la producción.

II. Abstract

The present research shows us an effect about the Low Density Polyethylene (LDPE) particle size after being used as to parking, and compact or milled it's recycling as raw material for plastic production.

The production takes place to removing it's different particles sizes and analyzing the rheologic properties of the film.

The principal investigation's focus is to contribute in decrease the pollution and the trash or Garbage as well as the increasing of use of LDPE cycles like film.

The principal purpose of this research is to prove the mechanic properties of the final product that can be make better with the Homogenizing and reducing the particles size:

The subsequent problems to solve are material cleaning, constant production of particles size, design Machine, and the production's process.

1.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se responde a las preguntas de ¿porqué?, ¿para qué? ¿cómo?, ¿Con qué? realizar un estudio de los efectos del tamaño de partícula a partir de material compactado (molido) que es reciclable, como el Polietileno de Baja Densidad (PEBD) en la producción y manufactura de pellet y película del mismo.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción de polímeros en México y a nivel mundial, está influenciada por el crecimiento de la población y el desarrollo acelerado de ciencia y la tecnología, así como de la explotación y transformación de los recursos naturales. En las últimas décadas, el hombre se ha visto en la necesidad de cubrir la demanda de una cantidad de productos necesarios para su existencia y comodidad, esto lo hace mediante la aplicación de técnicas de síntesis; así por ejemplo, se ha cubierto de cantidad de fibras que se requieren para su vestimenta, que de otra manera y mediante fibras naturales no se podría satisfacer. El interés de las primeras síntesis fue la obtención de sustitutos de las macromoléculas naturales, caucho y seda: sin embargo se ha desarrollado una basta tecnología que ahora produce cientos de compuestos que no tienen semejantes naturales y comprenden compuestos poliméricos tales como elastómeros, fibras y plásticos. Actualmente nos vestimos con estos materiales, comemos y tomamos de ellos, dormimos entre ellos, nos sentamos y paramos sobre ellos, giramos perillas, conducimos líquidos y aislamos flujos de corriente eléctrica. Con su ayuda escuchamos sonidos, nos comunicamos y conocemos lugares lejos de nosotros en tiempo y espacio. Los hogares y medios de transporte cada vez más contienen mayor porcentaje de ellos.

También el hombre buscó que estos materiales fueran resistentes y durables por lo largo del tiempo, lo cual propició, en cierto grado, la acumulación de ellos. Actualmente se teme que la civilización quede sepultada bajo una montaña de desechos plásticos; también sabemos que los orígenes de estos materiales son no renovables y que un día se agotarán por la gran demanda de estos materiales sintéticos.

El ingenio que ha sido capaz de sintetizar estos materiales, actualmente se enfrenta con la problemática de grandes cantidades de plásticos en basureros y fuera de ellos que contaminan a todo el planeta y que tiene que resolver de alguna manera. <<De acuerdo al avance cultural, científico y tecnológico que tenga cada pueblo o nación, será la forma de cómo procese sus desechos sólidos plásticos>>.

De varios estudios realizados, los constituyentes de un basurero expresados en tanto por ciento en volumen son los siguientes:

Materia orgánica	62%
Papel cartón	11%
Material de construcción	1%
Plásticos	9%
Metal	3%
Vidrio	2%
Madera	1%
Otros materiales	11%

De los desechos sólidos municipales, el 46% del empaque es de papel, 27% es plástico, 15% es metal y 7% de vidrio. Así, el empaque de papeles 16% del volumen total de los desechos sólidos y empaque de plástico es de 9% con un error de $\pm 20\%$. El empaque de plástico puede estar en un rango desde 7 al 11% del volumen y todo el plástico está en un rango de 14-22% del residuo total. En el transcurso de la investigación se cuantificó el poliestireno expandible utilizado en empaque de alimentos rápidos, en promedio de 0.25% del volumen total del basurero, que a pesar de las demandas, se ha acumulado hasta el 10%.

Por otra parte, el periódico ocupa de 10 a 18% del volumen del basurero. Otro volumen también grande lo ocupa la guía telefónica que se ha dejado de reciclar por tener pegamento plástico en el dorso del libro.

Considerando los anteriores datos y los porcentajes expresados en volumen de los desechos sólidos, que en general, son iguales para cada basurero. México se encuentra en las mismas circunstancias que otros países del mundo, en el procesamiento de la basura. Que de acuerdo a la capacidad y recursos con que cuenta el país podrá reciclar sus diferentes plásticos que hoy en día se encuentran diseminados por donde quiera. En las grandes ciudades en donde el consumo de alimentos se hace a prisa en centros de comidas preparadas al minuto, utilizando empaque de poliestireno expandido, es de esperarse que nuestros basureros estén llenos de este material, con tendencias cada vez mayores en la década del 90.

Las empresas reprocesadoras de plástico con que cuenta México, en la mayoría reciclan el plástico que tienen de desperdicio de sus propios procesos y en menor escala el plástico proviene de los basureros. En el caso de que todo material termoplástico se requiera procesar, es necesario que el pueblo mexicano se eduque para que su basura que produce diariamente, la seleccione de acuerdo a su origen, y que el gobierno por su parte recoja en cada día de la semana un solo tipo de material de desecho. De ésta forma el material podría llegar más limpio a las industrias procesadoras, que ocasionaría un procesamiento de menor costo.

Por otra parte, se debe de crear una tecnología apropiada para procesar los materiales plásticos del país, debido a que la tecnología creada por otros países que ya tienen un programa bien establecido y como consecuencias sus tecnologías, para este fin, se encuentran protegidas por cada nación y no son del dominio público en la actualidad.

Tratamiento de la basura. En la actualidad, la basura está constituida por desperdicios, que mezclados pueden ser focos de contaminación para el entorno

y para los seres vivos, debido a que la descomposición de algunos componentes de la basura producen enfermedades, olores desagradables. Sin embargo, los métodos aplicados para controlar la basura en todos sus ámbitos no han sido posible en su totalidad. En México como en el mundo entero se padecen enfermedades y contaminación de las aguas y suelo debido a un control inadecuado que se da a los desechos que diariamente producen. Para resolver estos problemas se están aplicando diversas tecnologías para aprovechar al máximo los residuos sólidos con las ventajas y desventajas que presentan cada una. En los países desarrollados se aplican las técnicas que a continuación se enlistan:

- Relleno sanitario
- Popena
- Compactación
- Incineración
- Composteo
- Químico
- Degradabilidad
- Reciclado

Los métodos que se han investigado y sus respectivas tecnologías sobre el tratamiento de los desechos municipales (Msw) indican solamente dos cosas para el pueblo mexicano.

- Legislación
- Mejor educación del pueblo mexicano.

Esto es con la finalidad de tener una recolección diferenciada y separación de los materiales desde el lugar de origen para transformarlos en nuevos productos, que sean más limpios y con menos costos de operación.

La recuperación de los plásticos en México requiere de: La actualización de las normas y las leyes existentes sobre la recolección, aprovechamiento de estos materiales.

Informar y motivar a la población mediante todos los medios educativos, de comunicación y publicitarios, para conseguir la comprensión y colaboración del pueblo para aprender a clasificar y separa los diferentes tipos de plásticos, instalando centros de acopio y recolección diferenciada de los hogares.

Crear empresas especializadas en el reciclado de plásticos.

Controlar el plástico esperando por tierra y mar o bien instalar plantas incineradoras para los materiales muy maltratados y sucios.

Para que el reciclado de los plásticos sea rentable se requiere:

- Abasto
- Liquidez
- Tecnología de vanguardia
- Mercado [2]

1.2.1 Problema de investigación

Se necesita investigar cual es el efecto en las propiedades reológicas del pellet y en las propiedades mecánicas de la película para cada tamaño de partícula, originada durante el proceso de compactación (que es similar a una molienda del tipo mecánico) de película de Polietileno de Baja Densidad, (PEBD) que sirve como materia prima para la manufactura de bolsa tipo camiseta.

La investigación nos puede dar fundamentos para generar soluciones en el proceso actual de producción de bolsa camiseta, puesto que se generan diversos tamaños de partícula del proceso de compactado, y muy probablemente algunos de los mismos no sean los más adecuados para generar homogeneidad en el material y que inclusive contengan los niveles más elevados de contaminantes, y partículas extrañas que dificultan el proceso y su eliminación, y que sean independientes del lavado.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1 Polímeros y Polietileno de Baja Densidad

El sufijo mero significa “unidad”. En este contexto el término mero se refiere a un grupo unitario de átomos o moléculas que define un arreglo característico para un polímero. Un polímero es un material constituido al combinar varios meros o unidades. Los polímeros son materiales que consisten en moléculas gigantes o macromoleculares promedio de 10,000 a más de 1,000,000 g/mol y que se forman al unir muchos meros o unidades mediante enlaces químicos. Se define el peso molecular como la suma de las masas atómicas en cada molécula.

La polimerización es el proceso mediante el cual pequeñas moléculas de una sola unidad (conocidas como monómeros) o de unas cuantas unidades (oligómeros) se unen químicamente para crear moléculas gigantes.

Por lo común, la polimerización comienza con la producción de largas cadenas en las cuales los átomos están fuertemente unidos mediante un enlace covalente. [5]

El Polietileno de Baja Densidad pertenece al grupo de polímeros denominados Poliolefinas. Estas provienen de hidrocarburos simples, compuestos por átomos de carbono e hidrogeno y con dobles enlaces C=C.

Las poliolefinas consideradas de baja densidad son: Polietileno de Baja Densidad, Polietileno Lineal de Baja Densidad y Polietileno de Muy baja Densidad.

El Polietileno de Baja Densidad fue obtenido accidentalmente por los estudios a alta presión del etileno que Michaels realizó en Ámsterdam.

Este fue un hallazgo afortunado que aprovechó Gibson para producir Polietileno, a partir de una mezcla de etileno y benzaldehído. Para 1935, en Inglaterra, los químicos e ingenieros W. Faucett, G. Paton, W. Perrin y G. Williams, polimerizaron etileno utilizando altas presiones y temperaturas. Este descubrimiento permitió a la empresa ICI la fabricación del Polietileno en 1983. [4]

1.3.1.1. Obtención Polietileno de Baja Densidad

El etileno gaseoso, muy puro, se polimeriza en presencia de un iniciador (peróxido de Benzilo, Azodi-Isobutironitrilo u oxígeno), a presiones de 1,000 a 3,000 atmósferas y temperaturas de 100 a 300 °C [4]

1.3.1.2. Polietileno lineal de baja densidad

El Polietileno Lineal de Baja Densidad se obtiene por un proceso en baja presión de solución.

Este proceso está basado en la polimerización continua de etileno, con 1-octeno en ciclooctano, con una temperatura de 250 °C y presión de 77 Kg/cm².

Existe otro método que es la polimerización en fase gaseosa de etileno con los comonómeros, que pueden ser propeno, 1-buteno, 1-hexeno o 1-octeno.

Esta reacción es a 100 °C y una presión entre 0.7 y 2.1 megapascales. El comonómero es la forma para controlar las ramificaciones en la molécula.

Existen otros dos métodos: el método de emulsión, básicamente empleado para obtener Polietileno de media densidad y el método de alta presión [4]

1.3.1.3. Clasificación de polietilenos

Los polietilenos se clasifican por:

- Densidad
- Contenido de Monómeros
- Peso Molecular
- Distribución del Peso Molecular
- Índice de Fluidez
- Modificación

El criterio de clasificación más empleado es la densidad; por éste los polímeros de etileno están agrupados en dos clases: alta y baja densidad.

- Polímeros de Etileno Baja Densidad
 - Polietileno de Baja Densidad
 - Polietileno Lineal de Baja Densidad
 - Polietileno de muy Baja Densidad
 - Etil Vinil-Acetato
- Polímeros de Etileno de Alta Densidad
 - Polietileno de Alta Densidad
 - Polietileno de Alta Densidad Alto Peso Molecular
 - Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

El contenido de monómeros determina muchas de las cualidades del plástico, en este aspecto los plásticos pueden ser:

- Homopolímeros
- Copolímeros

A éstas también se les conocen como propiedades de caracterización de Poliolefinas, porque conjuntándolas proporcionan todas las características del material y cuidados para transformarlos.(4)

El peso molecular es la medida de la longitud de las moléculas. Este parámetro determina varias características y en general, mientras más largas son las moléculas, mejores son las cualidades mecánicas del material, pero también es más difícil de transformar pues tiene mayor resistencia al flujo o, mayor viscosidad.

Si se grafica el número de cadenas (n) contra el peso molecular (M), se obtendrá una curva conocida con el nombre de curva de distribución de pesos moleculares (DPM o MWD). En la figura 1 se muestra un ejemplo con dos tipos de distribución: una angosta, con un grado de homogeneidad alto, y otra ancha, en la cual se encuentran moléculas (cadenas) muy alejadas del valor medio [9]

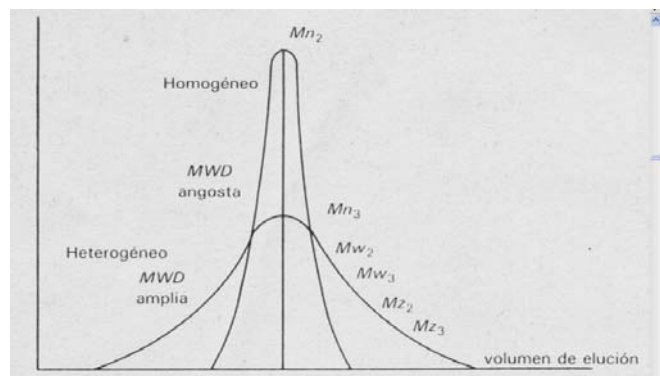


Figura No. 1
Curva de distribución de pesos moleculares

Algunos efectos del grado de amplitud de la DPM sobre las propiedades de un polímero se indican a continuación.

Parámetro	Determina fundamentalmente
Distribución de pesos moleculares (más ancha)	Mayor facilidad de proceso
	Menor tenacidad mecánica
	Menor resistencia a los agentes activos (detergentes y disolventes)

Los diferentes estudios acerca de los polímeros han demostrado, que su estructura es en forma de cadena, integrada por unidades estructurales repetitivas entre sí por medio de enlaces covalentes¹

La representación esquemática de un segmento de una cadena polimérica sería la siguiente:

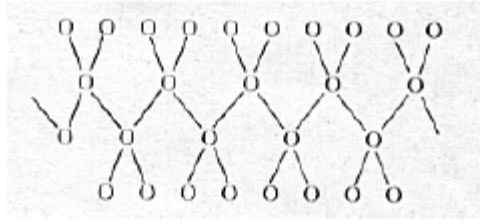


Figura No. 2
Cadena polimérica.

¹El primer trabajo relacionado con la formulación de esta teoría fue el de Staudingeren 1920 [9]

1.3.1.4. Análisis por tipo de plástico

El Polietileno de Baja Densidad es un homopolímero muy ramificado que tiene por unidad monomérica al etileno.

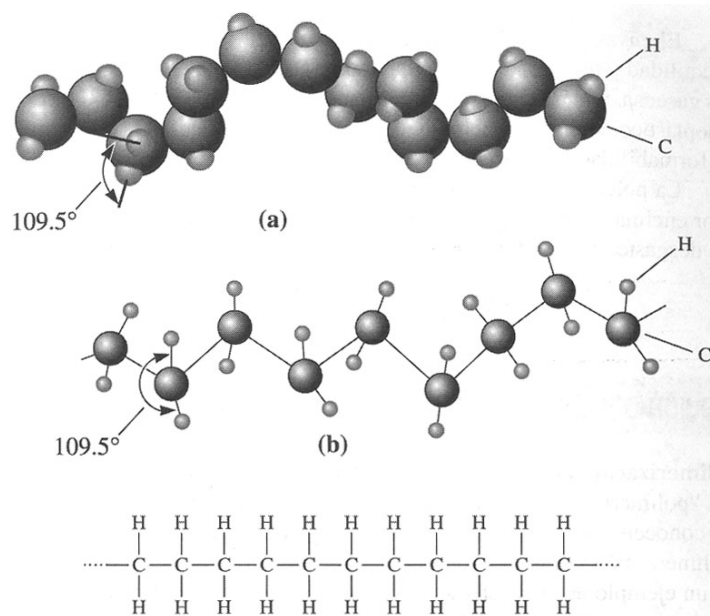


Figura No. 3
Distintas representaciones de una cadena de Polietileno

Las cadenas moleculares de este polímero son muy ramificadas que son cadenas de Carbono-Hidrógeno que provienen de un cuerpo principal y, de cada una surgen más ramas

Esta estructura causa la baja densidad de este plástico. Como se muestra en la figura No. 4.

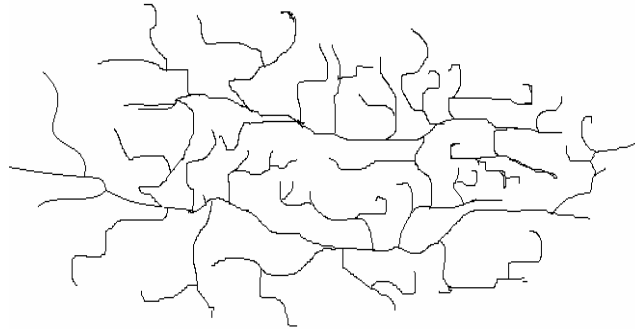


Figura No. 4
Estructura molecular del Polietileno de Baja Densidad

La densidad tiene relación con la cristalinidad del material: las moléculas se doblan sobre sí mismas en un plano formando estructuras planas llamadas “cristalitas”, entre éstas existen ciertas zonas con menor acomodo molecular, que forman “amorfos”; las cristalitas posteriormente forman infraestructuras conocidas como “esferulitas” y de estas últimas provienen los cristales[4]

La cristalinidad es importante en los polímeros, ya que afecta sus propiedades mecánicas y ópticas. La cristalinidad se presenta durante el procesamiento de los polímeros como resultado de cambios en la temperatura y de esfuerzos aplicados. Alentar la cristalización del polímero ayuda a incrementar su densidad, resistencia al ataque químico y propiedades mecánicas [5]

1.3.1.5. Propiedades del Polietileno de Baja Densidad

a) Físicas

El Polietileno de Baja Densidad es un polímero termoplástico con una densidad en el rango de $0.910-0.925 \text{ g/cm}^3$, en función de la estructura molecular del polímero.

Este material aunque es considerado semicristalino, posee una estructura en su mayor parte amorfa; por esta razón su apariencia es translúcida.

b) Mecánicas

Las propiedades mecánicas del Polietileno de Baja Densidad, dependen del grado de polimerización y la configuración molecular, es decir, cuanto más elevado sea el peso molecular mejores serán las propiedades, sin embargo, el índice de fluidez disminuye también, significando mayor dificultad de procesamiento.

PROPIEDADES	UNIDADES	VALOR
Densidad	g /cm ³	≤ 0.920
Absorción al agua	mg @96 h	< 0.5
Contracción	%	1.5 – 3
Resistencia a la Tensión al Cede	N/mm ²	5 -13
Elongación Punto de Ruptura	%	100 – 700
Resistencia al impacto Ranurado ¹	K/m ²	NO ROMPE
@ 20°C	K/m ²	NO ROMPE
@ -20°C		NO ROMPE
Temperatura de Deflexión		
186 N/mm ²	°C	32 – 41
0.45 N/mm ²	°C	38 – 49
Resistencia Dieléctrica	KV/cm	> 700

Tabla No. 1
Principales propiedades del Polietileno de Baja Densidad

Es un material que presenta buena elongación ante la aplicación de fuerzas de tensión: el valor de este parámetro en la ruptura es de 350 a 700% en pruebas normalizadas. La densidad del polímero es un parámetro muy importante en este comportamiento, pues la presencia de los cristales disminuye la ductilidad del plástico, por esta razón el Polietileno de Baja Densidad tiene mayor elongación que el de Alta densidad ante la misma magnitud de la fuerza aplicada.

La resistencia al impacto del Polietileno de Baja Densidad es muy buena, reflejado en pruebas Charp e Izod, en que las probetas no muestran fracturas.

La determinación de esta característica en película es por medio del Impacto Dardo, donde este material tiene valores entre 70 y 220 gramos.

c) Eléctricas

El Polietileno de Baja Densidad es un excelente aislante eléctrico: la constante dieléctrica es una de las bajas (valor de 2.1-2.5 a 60 hertz) y varía ligeramente a altas frecuencias (2.2-2.4 a un megahertz).

d) Térmicas

La fusión de los cristales en la estructura del Polietileno de Baja Densidad sucede entre 105 a 110 °C la temperatura de servicio en lapsos cortos es de 80 a 90 °C y en periodos continuos de 60 a 75; estos intervalos guardan una estrecha relación con la temperatura de reblandecimiento, que es de 8 a 100°C.

La capacidad calorífica del Polietileno de Baja Densidad aumenta considerablemente conforme a su temperatura se acerca a la de fusión de sus cristales. Esto implica que para los Polietilenos en general, son de los materiales con mayor capacidad calorífica, en el caso particular del Polietileno de Baja Densidad, el valor para este parámetro es de 0.53 a 0.57 calorías/°C-gramo.

La temperatura de flexión bajo carga, en la prueba con 0.45 N/mm² es de 38 a 48°C y a 1.86 es de 12 a 41°C. Estos valores son de los más bajos entre los plásticos, reflejo de la alta flexibilidad de este material y en especial del bajo punto de fusión; su temperatura de transición vítrea es de -90 a -25 °C.

e) Químicas

La naturaleza no polar del Polietileno, le confiere gran resistencia a los ataques de sustancias químicas. A temperaturas menores de 60°C, resiste a la mayoría de los solventes inorgánicos, ácidos débiles, bases y sales en cualquier concentración.

Este material es totalmente atóxico y puede estar en contacto directo con alimentos sin presentar riesgo para los consumidores, cumpliendo con las normas requeridas por la industria de alimentos y organismos oficiales.

Las sustancias oxidantes tienen un efecto degradante en el Polietileno de Baja Densidad, produciendo una ruptura en las cadenas moleculares.

Estas sustancias son por ejemplo el ácido crómico y el ácido sulfúrico. Sin embargo, la modificación con agentes antioxidantes mantiene alta estabilidad de este plástico para las aplicaciones convencionales [4]

1.3.1.6. Grados

Los diversos grados de Polietileno de Baja Densidad están constituidos por tres aspectos: índice de fluidez, densidad y los aditivos que contiene. De esta manera en primer instancia, en el mercado existen grados para extrusión de película, inyección, recubrimiento por extrusión, moldeo por soplado y extrusión de tubería.

El grado para extrusión de película tienen mayor presencia en el mercado debido a su mayor consumo; en general presenta índice de fluidez entre 0.25 y 4.5 g/10 minutos, y los compuestos contienen aditivos como agentes deslizantes y antibloqueantes; para algunas aplicaciones específicas los compuestos contienen antioxidantes y retardantes a la flama.

Los menores índices de fluidez están dirigidos a la fabricación de película para alto desempeño físico y película agrícola; aquellos de mayor fluidez en general se emplea para laminaciones y envase con mayor claridad o para congelar [4]

1.3.1.7. Aplicaciones del PEBD

Obtenido a partir de gas natural. Es el plástico más utilizado en envase. Su número de código es cuatro "4". El Polietileno de Baja Densidad se utiliza en aplicaciones donde se requiere, flexibilidad, barrera a la humedad y fácil procesamiento. Además, cumple con aprobación FDA y resistencia química.

La mayor aplicación está dirigida a película para bolsas de diversa índole, por ejemplo, para transporte de productos de supermercado, basura, pan, acolchado agrícola y base para pañales desechables, además de tubería para riego, tapas, juguetes y recubrimiento de alambre.

1.3.2 Tecnología de polvos

La Tecnología de polvos (también llamada Metalurgia de polvos) es una técnica para fabricación de piezas de forma compleja, de alta calidad (características físico-mecánicas mejoradas y elevadas con respecto a procesos tradicionales) con tolerancias ajustadas.

La tecnología de polvos se basa en un enfoque radicalmente distinto al de las técnicas habituales de conformado de metales:

-Son variables: La composición química, el tratamiento térmico y la microestructura. Se puede modificar la distribución de las fases y microconstituyentes en las piezas, incluyendo la porosidad y las fases de refuerzo.

Los pasos fundamentales después de la producción de los polvos, son el conformado de la pieza a partir de la compactación del polvo y la unión térmica de las partículas de polvo a elevada temperatura mediante sinterizado (que es parte del proceso de consolidación de la pieza)

Algunas de las características del proceso que lo hacen altamente atractivo para la producción de piezas y productos basados en materiales hechos polvo en primera instancia son:

- El proceso es altamente automatizado (Mayor productividad)
- Bajo consumo energético (tiene un impacto Medio Ambiental)
- Elevada utilización del material base
- Bajos costos por pieza

El proceso además es muy flexible incorporando un amplio rango de nuevos materiales, microestructuras y propiedades.

La calidad del producto se asegura mediante un estudio de las propiedades finales y su relación con la microestructura.

Otra característica de la tecnología de polvos es que se obtiene mayor control de proceso, mayor homogeneidad del material y menor costo.

Los procesos fundamentales entonces son:

1. **Producción del polvo** (molienda, atomización, electrólisis, etc.)
2. **Caracterización del mismo.** Tamaño, forma, distribución de tamaños, composición, homogeneidad, contaminación, área superficial, fluidez, densidad de llenado, estructura interna o cristalina, proceso de obtención.
3. **Mezclado.** Consistente en la minimización de la segregación y la distribución de los componentes en un estado en el que un individuo está rodeado de la otra especie, por ejemplo, con aditivos para favorecer la minimización de la fricción.
4. **Conformado.** Otorga una forma definida al material pulverizado. Este proceso se logra en algunos casos mediante prensado en frío (compactado) a elevada densidad; algunos procesos que definen que se utilizan para esta función son: moldeo por inyección, colado en banda, vaciado de suspensiones, filtración a presión, extrusión.
En algunos casos se utilizan algunos aditivos para mantener cohesión entre partículas, es decir aglomerantes, y lubricantes para evitar la fricción.
5. **Consolidado.** Consiste en la disminución de la porosidad y el otorgamiento de propiedades específicas a la pieza en verde, el sinterizado es una forma de realizar este proceso y que tiene como finalidad la unión de partículas químicamente elevando la temperatura en donde la temperatura es menor a la temperatura de fusión del material.

La consideración de la teoría general de la tecnología de polvos en la hipótesis para el presente trabajo de tesis, se basa en que el proceso para la producción de pellet es similar a los procesos de la misma. La producción del compactado (que puede decirse que es una molienda mecánica) de PEBD contiene producción de polvos de tamaño burdo o grueso del orden de los milímetros.

La mezcla de aditivos es una práctica común antes de la alimentación en la tolva del equipo extrusor, podríamos decir que es una premezcla puesto que la mezcla final se realiza dentro del husillo extrusor contenido en el barril o cañón del extrusor; la compresión y la dosificación dentro del mismo es el proceso (ver figura 6), que transformado a tecnología de polvos es el conformado y consolidado de la pieza, en este caso del pellet de PEBD [10]

1.4 ANTECEDENTES DEL TEMA

1.4.1 Propiedades del PEBD reciclado

Sufre una sensible pérdida de densidad por el rompimiento de cadenas moleculares, reduce la resistencia a la tensión y elongación y no es recomendable para la fabricación de película "stretch" ó estirable.

Cuando el PEBD se procesa para realizar película es común encontrar geles y dificultad de procesamiento, por el incremento en el índice de fluidez.

Generalmente se encuentra mezclado con otros plásticos, como LPEBD, PA, EVOH, PVDC y Ionómeros, así como residuos de alimentos y tintas de impresión [4]

1.4.2 Aditivos

El PEBD tiene la ventaja de resistir elevadas temperaturas, sin llegar fácilmente a la degradación por la acción del calor; sin embargo, los fabricantes de aditivos han desarrollado antioxidantes que conservan mejor las propiedades mecánicas del plástico, así como de agentes absorbedores de luz ultravioleta, para aplicaciones a la intemperie.

1.4.3 Aplicaciones recomendadas

El PEBD reciclado, es utilizado para fabricar películas para bolsas de basura, manguera, tubo conduit, perfiles, tarimas y estacas agrícolas.

1.4.4 Técnicas de reciclaje

Las técnicas de manejo y reciclaje del Polietileno de Baja Densidad están dirigidas principalmente a reprocesar películas, resaltando los siguientes sistemas:

- Físico:
 - Separación con Hidrociclón
 - Densificación
 - Molido
 - Filtración
 - Pelletizado

- Térmico
 - Incineración [4]

Los desperdicios obtenidos de la recolección diferenciada también requieren estar libres de contaminación por ejemplo, aceites, detergentes y azúcar. Estos

generalmente requieren de un proceso de lavado posterior a la molienda para lograr un granulado de buenas características.

El proceso de granulado consiste básicamente en las siguientes etapas:

- Molienda.
- Lavado/separación.
- Compactación
- Pelletizado.
- Modificación con aditivos.

1.4.4.1. Molienda.

Las piezas de gran tamaño, tortas de material fundido, cuerpos huecos, madejas de hilo, exige según el tipo de material y la forma, la utilización de instalaciones de corte y moliendas especiales. Las fábricas de maquinaria de este sector, ofrecen instalaciones adecuadas para cada caso y existen diversos factores que se deben tomar en cuenta para la elección de un molino, tales como:

- ✓ Tipo de plástico.
- ✓ Estado del material.
- ✓ Piezas de inyección.
- ✓ Cuerpos huecos.
 - Piezas impactadas.
 - Rebabas.
 - Coladas.
 - Masas fundidas.
 - Dimensiones de material a triturar.
 - Humedad media.
 - Granulometría final requerida.
 - Densidad del plástico.
 - Contaminación por cuerpos extraños.
 - Tipo de alimentación.
 - Producción.

a) Molienda Criogénica.

Recientemente se ha desarrollado la molienda criogénica para alcanzar tamaños de partículas ideales para una posterior pelletización y mejor incorporación de aditivos de la formulación.

El propósito principal de la molienda criogénica es el obtener polvos con tamaño de partícula adaptables a revestimientos, rotomoldeo, mezclas secas, soluciones de polímeros y reciclado de trozos.

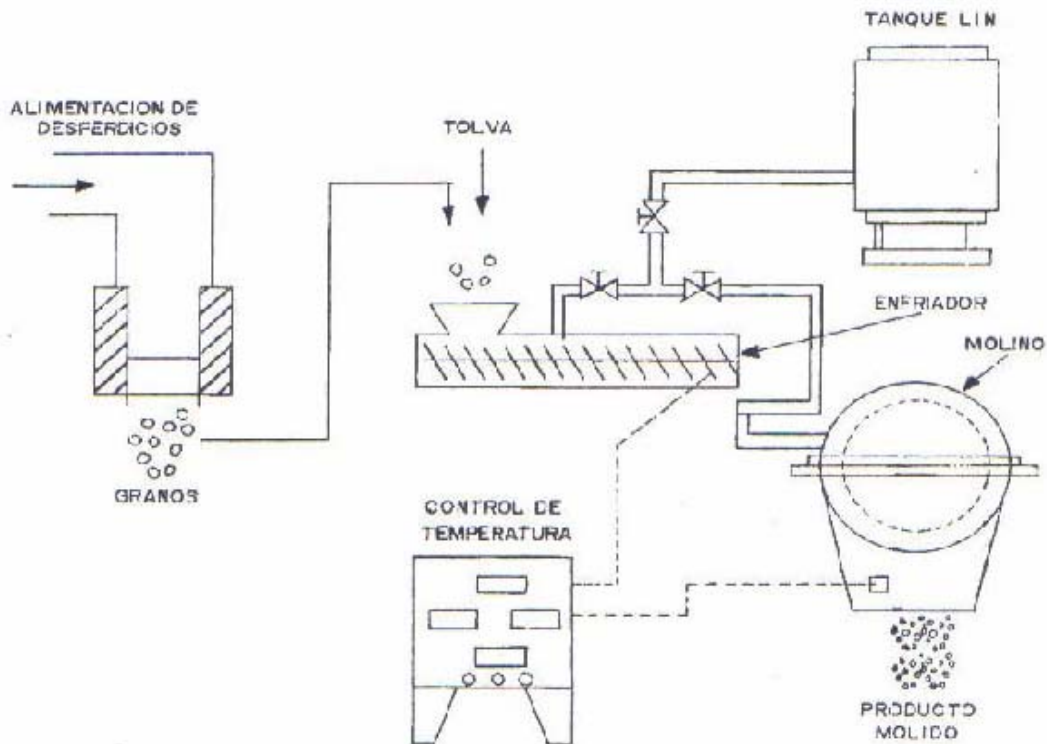


Fig. 5 Molienda Criogénica

Para reducir eficazmente el tamaño de los polímeros, la molienda criogénica empleada un compuesto refrigerante, el cual es un gas licuado que presenta una temperatura de ebullición inferior a $73\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El gas criogénico de más uso es el nitrógeno, ya que éste contacta con el material de alimentación inmediatamente y a $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. proporcionan una excelente transferencia de calor. La mayoría de los polímeros más recientes presentan fragilidad por debajo de $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$. y por lo tanto, requieren enfriamiento con nitrógeno líquido. El ciclo de reciclado criogénico involucra una serie de etapas esquematizadas y ordenadas como se ilustra en la (fig. XY). De acuerdo al tipo de material se requiere de diferentes cantidades de nitrógeno o en un caso dado CO_2 y esto proporciona diferentes tamaños de partícula del polvo obtenido.

A continuación se muestra una tabla donde se especifican estos valores:

MATERIAL	CONSUMO (kg)		TEMPERATURA DE FRAGILIZACIÓN °C	TAMAÑO DE PARTÍCULA (MESH)
	LIN	CO ₂		
LDPE	2.5-3.5	0.75-1.05	-56	80
HDPE	1.0	0.30	-45	40
PP	1.2	0.36	-51	40
ABS	0.5	0.15	-65	20
PVC	0.7	0.21	-45	40
flexible				
PA	2.0	0.6	-73	80
PC	1.5	0.45	-101	40
PET	1.0	0.30	-60	40

Tabla No. 2
Valores recomendados de tamaño de partícula
para diferentes plásticos reciclables.

b) Molienda en frío.

Existen además de la molienda criogénica, la molienda en frío, la cual difiere de la primera en que no se desarrollan temperaturas tan bajas con un menor consumo de nitrógeno con la finalidad de aumentar la cantidad del material con partículas uniformes a menor costo y mayor producción que cuando se trabaja a temperatura ambiente o molienda normal.

La diferencia del producto obtenido por molienda criogénica contra el de molienda normal está en que:

- El tamaño de partícula es pequeño y homogéneo aún cuando se alimenten materiales diferentes.
- En que no existe calor que los pueda degradar.
- Para hules es el único proceso que existe para su micropulverización.

1.4.4.2. Características de los polímeros a reciclar.

Los desperdicios de material plástico, que se producen de una forma continua y clasificada, pueden producir, por medio de un procedimiento de limpieza, una materia secundaria, que desde el punto de vista de las propiedades de la pieza acabada sea comparable con la materia prima virgen. Sin embargo, se requiere que la limpieza se realice en dos fases: en la primera fase se separe la suciedad poco adherida, por ejemplo, arena o piedras, en tinas llenas de agua y por medio de agitadores mecánicos, esto, después de la molienda de material. La suciedad fuertemente adherida, como tintas, etiquetas de papel, incluidos adhesivos, no se eliminan en el proceso de lavado y por ello que generalmente se tienen que eliminar en forma manual antes de la trituración.

El material molido, lavado y seco se filtra en estado fundido en la segunda fase de limpieza, la cual se lleva a cabo dentro del extrusor granulador por medio de

sistemas de mallas o tamices intercambiables colocadas dentro del cilindro del extrusor. Existen diversas formas de tratar el material de acuerdo a sus características:

a) Compactado.- Se aplica a los desperdicios de película, fibras y materiales espumados, los cuales por su baja densidad aparente requieren equipos especiales que funcionan a velocidades elevadas dando como consecuencia un aumento en la temperatura de molienda ocasionando a su vez aglomeración de material. Los compresores se ofrecen generalmente formando parte de una instalación combinada por un molino antepuesto al compactador.

b) Extrusión de Pellet.- La pelletización consiste básicamente en un proceso de extrusión con un dado especial a base de un plato perforado con orificios de 2 ó 3mm., por ellos fluye el plástico fundido y homogenizado para posteriormente ser cortado. Cuando el corte se realiza por medio de cuchillas a la cabeza del dado se denomina pelletizado en caliente y cuando se forman tiras que se enfrían en tinas de agua y posteriormente se cortan se denominan pelletizado en frío. La tecnología de pelletizado difiere principalmente en el tipo de diseño de husillos de extrusión y particularmente todas las firmas que fabrican extrusores ofrecen líneas para pelletizado.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La investigación en materiales es considerada primera en orden de importancia internacionalmente y dirigida a lo siguiente:

- ✓ La obtención de nuevos materiales y la caracterización de los mismos.
- ✓ La mejora de los métodos de procesamiento tradicionales y
- ✓ El desarrollo de nuevos procesos industriales

En el ámbito Nacional es prioridad el desarrollo de nuevos materiales y de sus procesos de producción de acuerdo al Plan Nacional de Desarrollo y al estudio "Prospectiva Tecnológica Industrial de México 2002-20015" del Sector 10 (Materiales) realizado por la ADIAT, por pedimento del CONACyT.

Los resultados de la prospectiva son derivados de la opinión de expertos en la investigación en materiales en nuestro país y reflejan porcentajes de opinión sobre algunos aspectos que hacen viable o no la realización de proyectos de investigación. Los aspectos a que se refieren son los siguientes:

- ✓ Nivel de conocimientos con categorías: Alto, Mediano y Bajo
- ✓ Grado de importancia: Alto, Mediano, Bajo, Irrelevante
- ✓ Limitaciones: Socioculturales, Tecnológicas, Económicas, Legales, Medioambientales
- ✓ Impacto: Empleo, Calidad de Vida, Desarrollo Industrial.

- ✓ Mejoramiento de la Competitividad con América Latina, Corea y China en: Ciencia y Tecnología, Producción, Comercialización, Innovación cada una a su vez clasificada en Pésima, Mala, Buena, Excelente.

Los resultados de opinión para proyectos denominados como **“Nuevos procesos para el reciclado de polímeros”** son en general los siguientes:

- ✓ Nivel de conocimientos: Medio en 60.32%
- ✓ Grado de importancia: Alto en 71.43%
- ✓ Limitaciones: Tecnológicas en 41.18%
- ✓ Impacto: Calidad de Vida en 46.67%, Desarrollo Industrial en 42.22%
- ✓ En mejoramiento de la competitividad con América Latina:
 - Ciencia y Tecnología: Bueno en 75%
 - Innovación: Bueno en 75%
 - Producción: Bueno en 73.91%
 - Comercialización: Bueno en 69.57%
- ✓ En mejoramiento de la competitividad con China y Corea:
 - Ciencia y Tecnología: Bueno en 57.14%
 - Innovación: Bueno en 57.14%
 - Producción: Malo en 60%
 - Comercialización: Malo en 65%

Los procesos de reciclado de polímeros ocupan un lugar importante para cumplir con objetivos tales como:

- Conservación o ahorro de energía.
- Conservación o ahorro de recursos naturales.
- Disminución del volumen de residuos que hay que eliminar.
- Protección del medio ambiente.

El reciclaje en general permite:

- Ahorrar recursos.
- Disminuir la contaminación.
- Alargar la vida de los materiales con los mismos usos o con diferentes.
- Ahorra energía.
- Evitar la deforestación.
- Ayudar a que sea más fácil la recolección de basura.
- Vivir en un mundo más limpio,

Por otro lado sabemos mediante la teoría y la experiencia de otros países en la producción de materiales con mejores propiedades, que gran parte de su éxito se debe a la aplicación de la tecnología de polvos.

Por tanto si pudiéramos emular los procesos de producción de polvos, su manejo, alimentación, compactación, sinterización y consolidación en la extrusión de plásticos con ello podríamos alargar los ciclos de reciclaje del polietileno de Baja o Alta Densidad que es utilizado en la producción de película para bolsa tipo camiseta. El primer paso por tanto es investigar si las propiedades y la producción por tamaño de partícula generado en el proceso de compactación de película del PEBD generan las condiciones de la Hipótesis planteada en esta tesis, independientemente de otras razones por las cuales se puedan obtener mejores propiedades mecánicas y reológicas.

1.6 HIPÓTESIS

Es posible incrementar y/o mejorar las propiedades mecánicas de película hecha con pellet de Polietileno de Baja Densidad reciclado previamente compactado, mediante la homogeneización del tamaño de partícula, principalmente del tamaño más pequeño (cercano o igual al polvo) y/o con la combinación de diferentes tamaños, para las condiciones actuales de diseño y producción de la maquinaria utilizada comúnmente para este propósito.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo General: Establecer las bases de investigación para mejorar el proceso de reciclado de Polietileno de Baja Densidad, en la manufactura de bolsa tipo camiseta, a través de la teoría general de la tecnología de polvos en los materiales.

1.7.2 Objetivos específicos:

1.7.2.1 Conocer y evaluar el comportamiento de los diferentes tamaños de partícula en la producción y extrusión de pellet, en relación a sus propiedades reológicas y en su costo en la mano de obra directa.

1.7.2.2 Conocer y evaluar el comportamiento del pellet fabricado con cada tamaño de partícula en producción y la extrusión de la película y su relación con las propiedades mecánicas finales de la misma y en su costo en la mano de obra directa.

CAPÍTULO II PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN, PRUEBAS, MATERIALES, Y MÉTODOS

2.1 PROCESO DE COMPACTADO

El proceso de compactado básicamente consiste en disminuir el volumen ocupado por el desperdicio de la película de consumo post-industrial, es decir, de convertirla en un grumo capaz de ser alimentado en un extrusor. Por experiencia se sabe que este tipo de película es utilizada para el empaque y embalaje de productos de consumo industrial y que es de PEBD.



Foto No. 1
Material compactado
con impurezas de cinta canela

2.1.1 Características de la maquinaria (compactadora)

- ✓ Motor 40 HP Corriente Directa
- ✓ Cuchillas radiales
- ✓ 1750 RPM



Foto No. 2
Máquina compactadora

2.1.2 Materiales

- ✓ Película de PEBD seca y clasificada y con limpieza superficial
- ✓ Agua corriente del suministro municipal a temperatura ambiente



Foto No. 3
Material de consumo
post-industrial

2.1.3 Condiciones de operación

- ✓ Temperatura Molienda hojuela= 112.33 °C
- ✓ Temperatura compactado al agregar agua=118°C
- ✓ Revoluciones por minuto: 1750
- ✓ Producción estándar: 100 kg/hr

2.1.4 Método

1. Se introduce por vía aérea de forma manual la película hacia dentro de la olla compactadora.
2. Se acciona el motor
3. Salida y almacenaje de la película en costales
4. Introducción de película reducida en forma de hojuela, en olla compactadora
5. Compactado de hojuelas de película a temperatura por debajo de 110°C
6. Adición de agua para separación de compactado general a una temperatura menor a 120°C.
7. Obtención de partículas de diferente tamaño

2.2 PROCESO DE TAMIZADO

El proceso de tamizado consiste básicamente en la separación de los tamaños de partícula generados en la compactación de la película de PEBD, mediante un sistema de mallas con diferentes aberturas para contener material y dejar pasar aquel más pequeño, hasta llegar al tamaño mínimo.



Foto No. 4 Tamizado del compactado

2.2.1 Descripción del proceso y toma de decisiones

Material utilizado: 200 kg. L1-PEBD2 (Lote número 1 de Polietileno de Baja Densidad #2), y 300 kg. L2-PEBD3 (Lote número 2 de Polietileno de Baja Densidad #3)

Se realizan tamizados en tamiz circular de acero inoxidable con números de tamiz 10, 20, 40, 60 y 80 con tamaño de la abertura (en micrones) de 2000, 841, 420, 260, 177, respectivamente, con el fin de obtener la distribución del tamaño de partícula y decidir que tipo de mallas se utilizarían para la separación, con un tiempo de tamizado de 4 minutos.

La distribución del tamaño de partícula para una muestra de 2 kg. (2000 gr.) se puede ver en la Tabla No. 3

Tamizado en pequeño		
#Malla	Gramos	%participación
10	1110	55.5%
20	720	36%
40	100	5%
60	50	2.5%
80	20	1%

Tabla No. 3
Distribución del tamaño de partícula
L1-PEBD2

Se decide por tanto que se hará una separación de las mallas 10, 20, 40 y menor a malla 40 del mismo lote de material compactado, para realizar una primera comparación de los resultados de productividad y condiciones de operación prevaecientes en el proceso de peletización y de extrusión de película y del efecto del tamaño de partícula en la producción de ambos procesos.

Se realizaron mediciones con vernier (5 de cada malla y tratando de obtener más tamaños de partícula pues eso era posible) de los tamaños de partículas contenidas en el lote número 1 y se obtuvieron los siguientes promedios: 5.1 mm, 4.21 mm, 2.5 mm, 2.16 mm. Por tanto se decide separar los tamaños de partículas con las mallas 4, 5, 10,16 y 20, dejando lo restante como partículas menores a malla 20.

Nomenclatura #X# = Número de malla X número de aberturas en una pulgada

El tamizado se realizó con mallas de mayor capacidad y de las siguientes características, según se muestra en la Tabla No. 4

Malla	Diámetro del alambre		Abertura	
	mm.	plg.	mm.	plg.
4X4	1.2450	0.0490	5.1050	0.2010
5X5	0.8890	0.0350	4.1910	0.1650
10X10	0.6340	0.02500	1.9050	0.0750
16X16	0.5590	0.0220	1.0280	0.0405
20X20	0.4060	0.0160	0.8640	0.0340

Tabla No. 4
Características de las mallas para tamizado

Los resultados del tamizado del L1 en una muestra de 100 kg. se muestran en la Tabla No. 5

#Malla	Kg.	%Participación
10	54.6	56%
20	36.9525	37.9%
40	5.3625	5.5%
<40	0.585	0.6%

Tabla No. 5
Distribución del tamaño de partícula
L1-PEBD2

Nota: con este primer lote de tamizado se realiza la primera prueba de peletizado, que se analizará más adelante.

Nota: Se conservan 100 kg. más del **L1-PEBD2** para realización de pruebas con el **L2- PEBD3**

Con estos datos se calcula que para cubrir una producción de 20 kg (necesaria para realizar una prueba representativa en el extrusor de pellet) del tamaño de partícula más fino se necesitarán aproximadamente 300 kg. de material compactado.

Los resultados de la distribución de partícula para el L2-PEBD3 (Lote número 2 de Polietileno de Baja Densidad #3) son los mostrados en la Tabla No. 6

# Malla	Kg.	%participación
4	11	5%
5	28.96	14%
10	105.36	51%
16	41.43	20%
20	14.76	7%
40	5.65	3%
Totales	207.16	100%

Tabla No. 6
Distribución del tamaño de partícula
L2-PEBD3

Se dejan sin tamizar 70 kg. de material compactado L2-PEBD3 para realizar fabricación bajo las mismas condiciones de operación de fabricación normal.

2.3 PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PELLET

La extrusión es un proceso por el cual un material termoplástico se fuerza a través de una boquilla (hilera, dado) a fluir continuamente en estado fundido, al aplicarle presión y calor, para formar perfiles de longitud infinita; a su salida, el material ya conformado es recogido por un sistema de arrastre de velocidad variable, que le proporciona las dimensiones finales mientras se enfría en tinas de agua para adquirir la forma deseada.

El proceso de extrusión se emplea normalmente para producir varillas, láminas, tubos, recubrimientos de cables, películas, en forma continua. El material de partida puede ser granulado o en polvo.

La extrusora consta de un cilindro o cañón en cuyo interior se aloja un husillo o tornillo de arquímedes, que accionado por un motor y transmisión, gira y recoge el material de la tolva de alimentación, avanzando a lo largo del cilindro y sometiéndose a esfuerzos de cizalla (corte) a la vez que se comprime en la zona de compresión, generando calor por efectos de fricción, que se mantiene mediante resistencias blindadas; el material se mezcla íntimamente y a medida que es conducido a la zona de dosificación, se plastifica totalmente (es decir adquiere las propiedades de un plástico), de esta manera se ejerce una presión mayor a la entrada del dado y que le da forma al extruido.

El paquete de rejilla y la placa de rompimiento, colocados en el cabezal de la máquina, tiene como objeto filtrar material extraño y agregados de plástico sin fundir, dejando pasar el extruido debajo de su T_m o T_g para obtener estabilidad dimensional. El enfriamiento del plástico puede hacerse por aire o agua, por el simple paso del material por tinas de agua o bien por sopladores de aire [2]

El proceso de extrusión se utiliza, además, para “compounding”, es decir, para mezclar y formular compuestos de plástico y producir materia prima, como, por ejemplo, gránulos de concentrado o de compuesto.

Los materiales utilizados en el proceso de extrusión son, por lo general, termoplásticos. Estos materiales se suavizan cuando se calientan y se transforman en fluidos, que posteriormente se endurecen cuando se enfrían y se transforman en sólidos.

Cuando un material termoplástico se alimenta al extrusor, el husillo lo empuja hacia adelante a lo largo del barril, donde se calienta y se transforma en fluido. Este flujo continúa y al final se le hace pasar a través de un dado que proporciona el perfil o la forma deseada. Una vez que sale del dado, el fluido debe ser enfriado rápidamente para mantener la forma que se obtiene en el dado. Este dado puede considerarse como una resistencia al flujo. Entre más largo y pequeño sea el orificio de paso, mayor será la resistencia y, a su vez, mayor será la potencia necesaria para empujar el material fundido a través del dado [2]

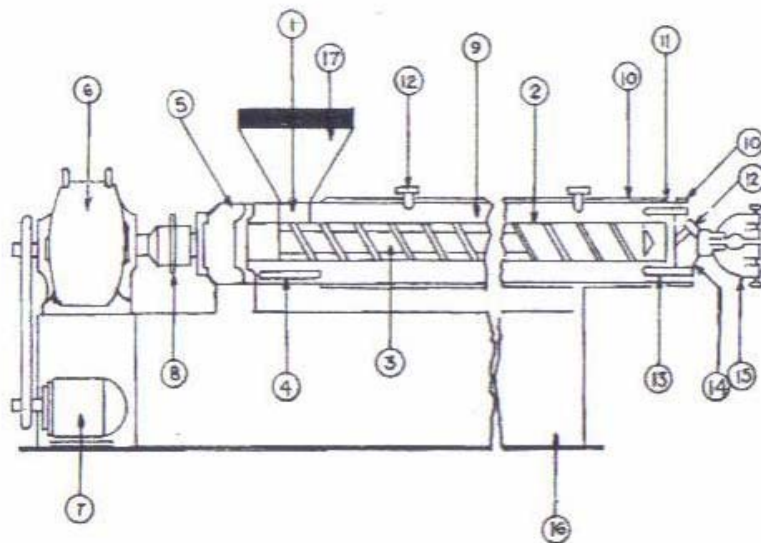


Figura No. 6 Partes principales de un extrusor de Filamento o pellet

La figura No. 6 muestra un diagrama típico de un extrusor, donde se señalan las partes principales. Tales como: 1. Garganta de alimentación, 2. Superficie tratada ó barril, 3. Tornillo ó husillo, 4. Camisa de refrigeración de la tolva de alimentación, 5. Cojinete de empuje, 6. Engranaje reductor, 7. Motor, 8. Acoplamiento ajustable, 9. Pared cilíndrica, 10. Elemento de calefacción, 11. Mallas, 12. Termopar, 13. Plato rompedor, 14. Cabezal, 15. Boquilla, 16. Soporte, 17. Tolva.

2.3.1 Geometría y consideraciones generales

La función de la zona de alimentación es coleccionar los gránulos de la tolva y transportarlos hacia delante en el canal del husillo. Al mismo tiempo, los gránulos empiezan a calentarse y a comprimirse a medida que avanzan por el canal del husillo. Para un transporte (bombeo) eficiente, los gránulos deben adherirse a la pared del barril y mostrar un alto grado de deslizamiento en la pared del canal del husillo. Para alcanzar un mayor transporte de gránulos en la zona de alimentación se recomienda.

- Canal profundo (en comparación con el resto del husillo).
- Bajo grado de fricción entre gránulos y husillo
- Alto grado de fricción entre gránulos y barril.
- Óptimo ángulo de la hélice (muchos husillos tienen paso cuadrado, estos es, longitud de campo P igual al diámetro D . Esto da como resultado un ángulo de la hélice igual a 17.7 grados).

La sección de husillo y barril de un extrusor tiene cuatro funciones principales (presurizar, calentar, mezclar y bombear). Para hacer cada función más eficiente es práctica normal dividir esta parte del extrusor en tres zonas: alimentación, compresión y dosificación. La zona de dosificación va seguida por el cabezal y el dado.

Con muchos plásticos, por ejemplo PE (Polietileno), la fricción entre plástico y metal aumenta con la temperatura (desde 30 hasta 110 °C). Por lo tanto, para un transporte óptimo en la zona de alimentación se recomienda tener enfriamiento en el husillo y calentamiento en el barril. Sin embargo, en la práctica el enfriamiento en el husillo reduce la salida, debido posiblemente a otros efectos que ocurren más adelante en el husillo [1]

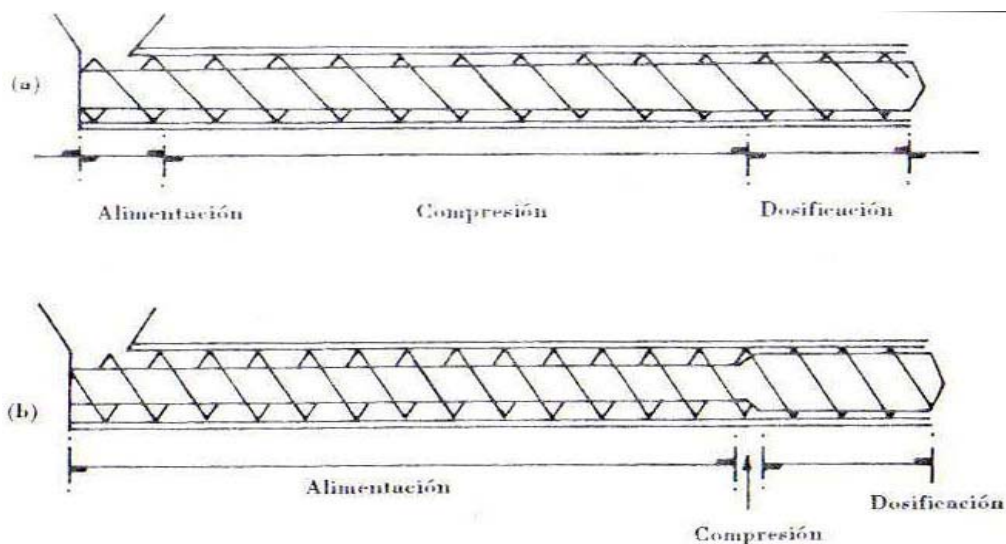


Figura No. 7 Diseño de husillo con zonas de alimentación, compresión y dosificación de tamaño y formas diferentes

En el husillo (b) de la figura 7, la zona de compresión es más corta que en el husillo (a), pero en cada caso se observa que a medida que se avanza en el husillo hay una disminución en la profundidad del canal; esto causa una compresión de los gránulos, forzando el aire contenido entre los gránulos hacia atrás (en dirección de la tolva). La fusión de los gránulos debe ocurrir en la zona de compresión para consolidar el plástico [1]

Los husillos comerciales para extractores de un solo paso, que se especifican por el diámetro interior del cañón o cilindro, puede ser de: 1, 1 $\frac{1}{2}$ ", 2", 2 $\frac{1}{2}$ ", 3 $\frac{1}{4}$ ", 3 $\frac{1}{2}$ ", 4 $\frac{1}{2}$ ", 6", 8".

En la zona de dosificación se proporciona al polímero la presión necesaria para que el gasto deseado pase el plato rompedor, la hilera y mallas u otra resistencia que se oponga al flujo, además proporciona la homogenización del material plastificado [2]. La figura 8 muestra el diseño de un plato rompedor de la máquina extrusora.

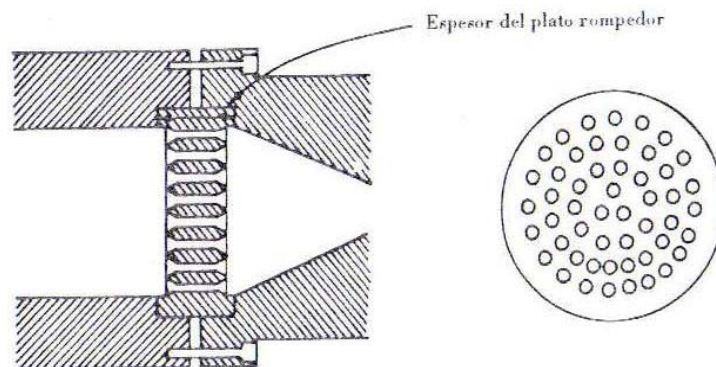


Figura No. 8
Diseño de un plato rompedor

2.3.2 Características de la maquinaria

- ✓ Motor principal : 40 HP a 1750 rpm CD
- ✓ Reductor de velocidad con relación 1:14 (caja de engranes)
- ✓ Revoluciones del husillo 125
- ✓ Sistema de tracción con cadena-catarina.
- ✓ Husillo c/diámetro 70 mm. relación 1:24
- ✓ Sistema de cambia mallas de bastón.
- ✓ Corte en frío con sistema de tina y cortadora a base de rodillos y cuchillas.
- ✓ Sistema de enfriamiento c/ 5 Zonas en el barril o cañón
- ✓ Producción estándar 72 kg/hr



Foto No. 5
Aspecto lateral de la máquina extrusora de pellet



Foto No. 6
Producción de pellet

2.3.3 Producción de pellet sin tamizar, con tamaños de partícula de 10 Y 20 De L1-PEBD2

2.3.3.1 Condiciones de operación, preparación de mezcla de L1-PEBD2 sin tamizar y producción

El tiempo de calentamiento de la máquina es de aproximadamente de 1 hora. Se tenía conocimiento de que en la operación se trabajaba con las siguientes temperaturas promedio en cada una de las 5 zonas: zona 1=180 °C, zona 2=180 °C, zona 3=180°C, zona 4=190°C, zona 5=210°C.

Se introdujeron 30 kg. de material compactado con 2% de masterbach verde oscuro (600 gr.), en la tolva de alimentación sin separar los tamaños de partícula, y con las condiciones de operación descritas anteriormente, hasta que se estabilizó la producción, se midió el tiempo de la misma de 25.8 kg. de pellet, medidos desde el momento de la estabilización hasta el corte del espagueti en la cortadora de la máquina, obteniéndose en 21.7 minutos. El método descrito aquí se reprodujo en las siguientes producciones de L1-PEBD2.

2.3.3.2 Preparación y producción de pellet con tamaños de partícula mallas 10 Y 20 de L1-PEBD2

Para la corrida **L1-M10PEBD2** (Lote 1- Malla #10 de Polietileno de Baja Densidad #2) se tienen los siguientes datos:

- ✓ Masa antes de la extrusión = 30.600 kg. con 2% master rojo (30 kilogramos de material base y 600 gr. de masterbach)
- ✓ Masa total después de la extrusión pellet = 25.55 kg.
- ✓ Grumo (material desperdiciado a la salida del dado) = 2.50 kg.
- ✓ Tiempo de producción = 21.8 min.

Para la corrida **L1-M20PEBD2** (Lote 1- Malla 20 de Polietileno de Baja Densidad #2) se tienen los siguientes datos:

- ✓ Masa antes de la extrusión = 30.600 kg. con 2% master rojo (30 kilogramos de material base y 600 gr. de masterbach)
- ✓ Masa total después de la extrusión pellet = 27 kg.
- ✓ Grumo (material desperdiciado a la salida del dado) = 1.38 kg.
- ✓ Tiempo de extrusión = 24.2 min.

Las temperaturas establecidas para la extrusión consumieron en intervalos aproximados de 2 min. las siguientes corrientes en aproximadamente 5 seg. de alimentación.

Zona	Temperatura (°C)	Corriente Consumida (A)
1	180	17
2	180	16
3	180	5
4	190	5
5	210	6.5

Tabla No. 7
Datos de corriente consumida en diferentes zonas del extrusor en función de la temperatura.

Notas:

- La limpieza del extrusor se realizó con 10 kg. de material sin tamizar PEBD1 (Polietileno de Baja Densidad #1)
- El dado tiene 22 salidas, sólo trabajaron 20, debido a que hizo falta una resistencia.
- Para la corrida de la malla 10, se llevó a cabo todo el tiempo con los parámetros con que finalizó la corrida de la malla 20 y el material sin tamizar.
- Se produjeron 50 kg. más de material sin tamizar de L1-PEBD2 sin masterbach para completar fórmulas del L2-PEBD3 debido a que por experiencia, este último solamente corre con una mezcla del primero.

2.3.4 Producción de pellet con tamaños de partícula de 4, 5, 10, 16 Y 20 DE L2-PEBD3**2.3.4.1 Condiciones de operación para producción.**

El tiempo de calentamiento de la máquina es de aproximadamente 1 hora. Para efecto de la producción y decidiendo bajar las temperaturas para verificar si las mismas podrían ser menores para la producción, de acuerdo a la teoría, se programa la maquinaria con temperaturas TP=Temperatura programada y se mide la TR=Temperatura Real directamente del tablero. Los resultados se muestran en la Tabla No. 8

No. de Malla	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4		ZONA 5	
	TP	TR	TP	TR	TP	TR	TP	TR	TP	TR
Sin Tamizar	150	170	170	175	170	175	170	175	170	175
4	150	160	170	170	170	170	170	170	170	170
5	150	165	170	170	170	170	170	170	170	175
10	150	165	170	170	170	170	170	170	170	175
16	150	165	170	170	170	170	170	170	170	175
20	150	165	170	165	170	175	170	175	170	175

Tabla No. 8

Temperaturas TP y TR para producción de pellet con tamaños de partícula 4, 5, 10, 16 y 20

2.3.4.2 Condiciones de entrada y salida de producción.

Para las corridas de este material, se introdujeron 10 kg. de material de PEBD1 para limpiar al inicio y entre cada corrida de material PEBD3. Las producciones fueron medidas desde el momento de la estabilización y al comienzo del corte del espagueti en la cortadora de la máquina. Se decide intentar producir el material sin tamizar (ST) y la prueba es positiva. Los resultados se muestran en la Tabla No. 9

No. de malla	Kg. entrantes	Kg. salientes	Tiempo de producción (minutos)	Producción Kg/hr
ST	20	17.8	15.25	70.03
4	12.3	9.2	7.10	77.75
5	16.34	14.3	12.53	68.46
10	28	24.51	21.00	70.03
16	22.1	19.92	18.50	64.61
20	16.1	13.7	13.47	61.04

Tabla No. 9
Producción de pellet por número de malla y sin tamizar

Nota 1: Las cantidades de desperdicio son la diferencia entre los kilogramos entrantes y salientes, para efectos de la experimentación no se toman en cuenta, debido a que se presentan múltiples factores para que se establezca la producción.

Nota 2: Las temperaturas mostradas en la Tabla No. 6 en las zonas del cañón se mantuvieron constantes durante la corrida para cada uno de los diferentes tamaños de partículas.

En las siguientes fotografías se muestran los aspectos de algunos de los pellets obtenidos con los diferentes tamaños de partícula.



Foto No. 7
Aspecto del Pellet L2-M16PEBD3



Foto No. 8
Aspecto del Pellet L2-STPEBD3



Foto No. 9
Aspecto del Pellet L1-STPEBD2

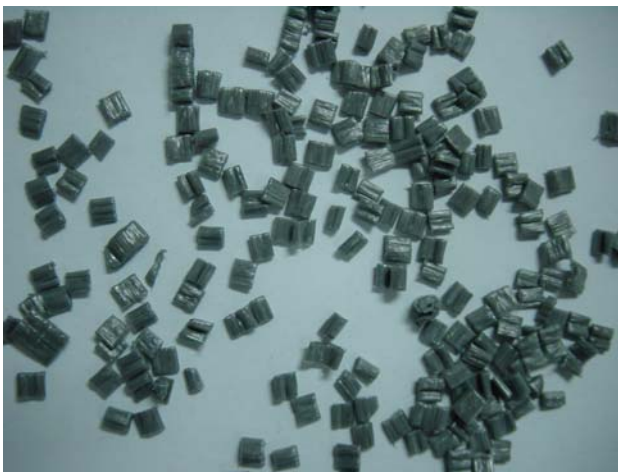


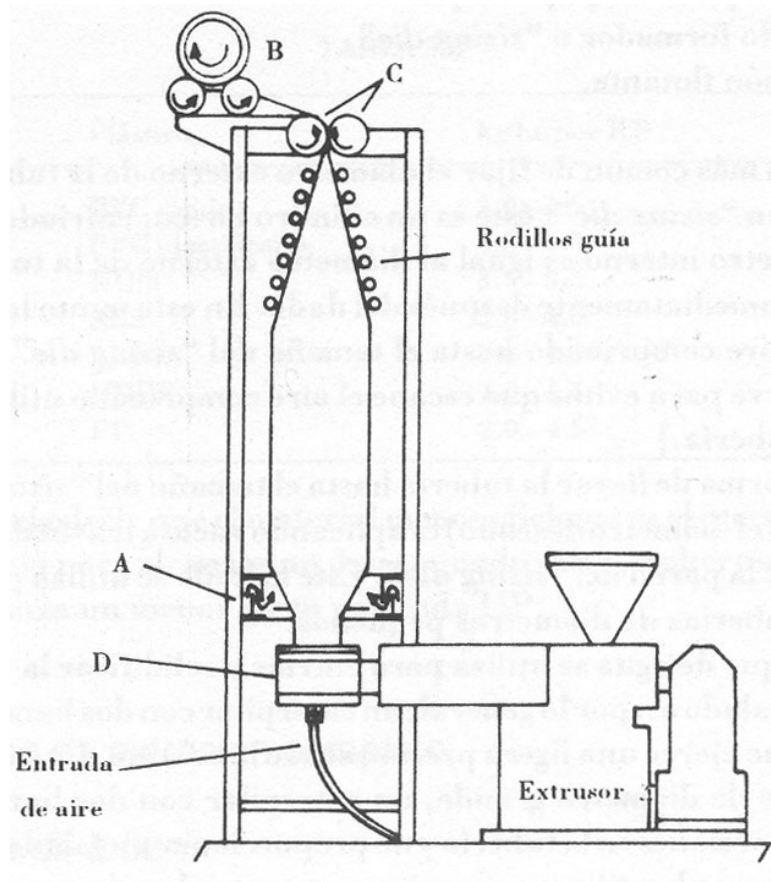
Foto No. 10
Aspecto del Pellet L2-M5PEBD3

2.5 PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PELÍCULA

En términos de consumo de termoplásticos en productos extruidos, la extrusión de película es el área de mayor aplicación. El método más común de producción de película es el proceso de película soplada mostrado en la figura No. 9 el extrusor fuerza el polímero fundido a través de un dado anular para crear un tubo de pared delgada que es jalada continuamente del dado a una velocidad controlada por un par de rodillos de polea, adelgazando la película e induciendo una orientación molecular en la dirección axial o de máquina. En adición, una presión positiva se genera dentro del tubo alimentando aire comprimido a través del centro del dado. El tubo se infla a un diámetro controlado, adelgazando la película e induciendo una orientación en la dirección circunferencial o “transversa”. La mayor ventaja del soplado de película es la facilidad con que esta orientación biaxial (es decir, en la dirección de máquina y la transversal) puede ser inducida en la película, produciendo una película mas balanceada. El nivel de orientación está controlado por medio de la manipulación de la relación del diámetro final del tubo con respecto a la del dado (la relación de soplado), y la relación del espesor de la película a la salida y el espesor de la película arriba del cuello de extrusión (la relación de adelgazamiento o relación de estirado). Conforme el tubo es jalado hacia los rodillos de polea, es enfriado por medio de un anillo de aire de enfriamiento que dirige un flujo de aire frío a la superficie externa de la película.

El punto al cual el polímero solidifica es comúnmente conocido como “nivel de congelación”, un término que surge de la pérdida de transparencia debido a la cristalización en la película de polietileno. El tubo es después aplanado por las guías de aplanamiento y pasa a través de los rodillos de polea para ser posteriormente enrollados y almacenados antes de su posterior procesamiento (por ejemplo en bolsas plásticas), pasar a través de una unidad de ranurado, que separa el tubo en dos placas con extremos precisamente orientados, antes de ser enrollados.

Una línea de película soplada consiste por lo tanto de cinco elementos básicos: el extrusor, dado, unidad de calibración y enfriamiento, unidad de arrastre (guías de aplanamiento y rodillos de polea) y la de enrollado.



La figura No. 9 Muestra un extrusor de película visto de forma lateral. Las partes principales componentes del mismo son: A.-Anillo de Enfriamiento, B.- Enrollado o embobinado de la película, C.-Rodillos de jalado (utilizados además para aplanar el tubo y evitar que escape el aire comprimido que infla el tubo, D.- Dado

En términos de materiales de película soplada el sector es dominado por los polietilenos, llamados Polietileno de Baja Densidad (PEBD), polietilenos de alta densidad (PEAD) y polietileno lineal de baja densidad (PELBD), sin embargo existen técnicas especializadas para otros polímeros, incluyendo el polipropileno, poliamidas y PVC. La variación entre la estructura molecular entre los varios polietilenos afecta significativamente sus propiedades térmicas y reológicas, que de hecho requieren el uso de diferentes diseños del extrusor y el dado bajo diferentes condiciones de procesamiento para optimizar la calidad y la velocidad de producción.

La producción de película delgada con buenas propiedades ópticas requiere una eficiente homogenización del material fundido. La capacidad de mezclado de los husillos estándar de los extrusores es relativamente limitada, por lo tanto los husillos usados para la extrusión, comúnmente incorporan una sección para lograr el mezclado dispersivo (alto mezclado de cizallamiento que plastifica completamente la alimentación y desintegra las aglomeraciones y geles) seguida de una sección diseñada para un mezclado distributivo (bajo mezclado de cizallamiento que elimina las variaciones locales de la temperatura y la viscosidad de la masa fundida) para producir una masa fundida homogénea.

En términos de diseño del dado, el objetivo es producir un extruido anular que sea uniforme en espesor y velocidad alrededor de su circunferencia y que no tenga líneas de unión.

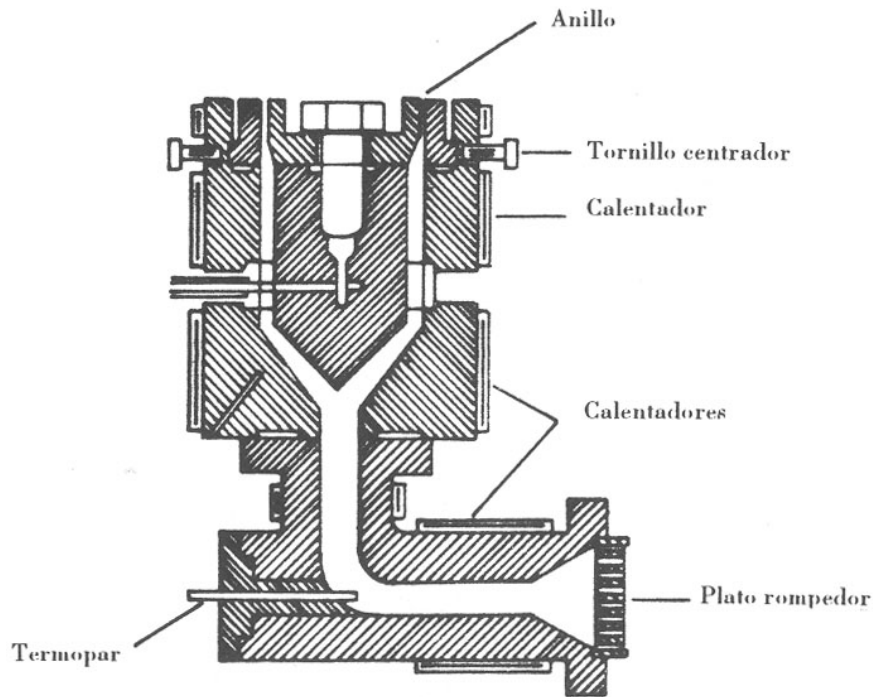


Figura No. 10
Diseño del dado de un extrusor de película

La función determinante de la velocidad en una línea de película soplada es el enfriamiento de la burbuja, esto es, altas velocidades de producción requieren altas velocidades de enfriamiento. Sin embargo, el tratar de incrementar la velocidad de enfriamiento simplemente incrementando el flujo de aire del anillo de enfriamiento puede resultar en vibración de la burbuja e inestabilidad.

El control a través del ancho de la película generalmente es alcanzado usando una "canasta" de calibración ubicada sobre la línea de escarcha. Esta es una construcción parecida a una canasta, que encapsula la burbuja con brazos curvos de soporte hechos de rodillos de movimiento libre individual y dictan el diámetro externo de la burbuja. [6]

2.5.1 Características de la maquinaria

- ✓ Motor principal 20 HP RPM CA c/variador de frecuencia
- ✓ Reductor de velocidad con relación 1:18
- ✓ Sistema de tracción: cadena- catarina
- ✓ Husillo c/diámetro 50mm relación 1:24
- ✓ Sistema de cambia mallas de bastón
- ✓ Cabezal fijo con salida para BD
- ✓ Motores embobinado y jalador 1.0 HP CA c/variador de frecuencia
- ✓ Diámetro del dado 150 mm.
- ✓ Altura de globo 35 cm.
- ✓ Espesor del dado 1 mm.

2.5.2 Condiciones de operación de la maquinaria.

- ✓ Temperatura programada de 155°C para las 5 zonas del cañón.
- ✓ Altura del globo 35 cm.
- ✓ Calibre programado -----

Clave	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4		ZONA 5	
	TP	TR	TP	TR	TP	TR	TP	TR	TP	TR
L1-STPEBD2	155	150	155	160	155	150	155	165	155	170
L1-M10PEBD2	155	150	155	160	155	150	155	165	155	170
L1-M20PEBD2	155	150	155	160	155	150	155	165	155	170
L2-STPEBD3	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R
L2-M4PEBD3	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R
L2-M5PEBD3	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R
L2-M10PEBD3	155	170	155	190	155	185	155	180	155	190
L2-M16PEBD3	155	150	155	160	155	150	155	165	155	170
L2-M20PEBD3.	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R	155	S/R

Tabla No. 10

Temperaturas en las 5 zonas del cañón de extrusión de película

2.5.3 Producción de película para lotes 1 y 2 de pebd2 y pebd3 respectivamente

2.5.3.1 Formulación y producción para corridas L1-SMPEBD2, L1-M10PEBD2 Y L1-M20PEBD2 se muestra en la tabla no. 11

Clave	Peso (kg)	PELBD (kg)	Calibre de estabilización (plg)	Ancho de película (cm)
L1-STPEBD2	25	2.5	0.0150 – 0.0170	45
L1-M10PEBD2	25	2.5	0.0150 – 0.0170	45
L1-M20PEBD2	25	2.5	0.0150 – 0.0170	45

Tabla No. 11

Formulación y condiciones de producción de la película con L1-PEBD2



Foto No.11
Mezclado de la formulación para producción de película

Nota: El peso del PELBD (Poliétileno de Lineal de Baja Densidad) representa un 10 % en la formulación con el objetivo de proporcionar mejores propiedades a la mezcla. Se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla No. 8

Clave	Kg. entrantes	Kg. salientes	Tiempo de producción (minutos)	Producción Kg/hr
L1-STPEBD2	27.5	23.2	55.5	25.08
L1-M10PEBD2	27.5	22.3	65.2	20.53
L1-M20PEBD2	27.5	25.3	52.1	29.13

Tabla No. 12
Resultado de producción

Nota 2: Se decide dejar el proceso de producción iniciar y terminar sin medir el calibre en el tiempo de producción

Nota: Al minuto 20 se rompe la película L1-M10PEBD2 debido a impurezas en el material (grumo) teniéndose que estabilizar nuevamente.



Foto No.12
Comienzo de producción entre películas



Foto No. 13
Producción de película con PEBD2
al comienzo de estabilizar la burbuja



Foto No. 14
Enrollado de película

2.5.3.2 Formulación y producción para corridas L2-STPEBD3, L2-M4PEBD3, L2-M5PEBD3 y L2-M10PEBD3, L2-M16PEBD3, L2-M20PEBD3.

Se realiza una prueba con 5 kg. material L2-STPEBD3 con 20% de PELBD sin resultado satisfactorio, es decir, la burbuja no se estabiliza en calibre 0.0200 plg. ni menor a la misma.

Se decide formular 5 kg. de mezcla, considerando que por experiencia el material STPEBD3 se manufactura con una relación de 70% de material PEBD2 y 30% material PEBD3 con un 15% de PELBD, después de la mezcla de proporción de PEBD. El material se estabiliza y corre sin problemas.

Se decide establecer una mezcla de 8 kg. para cada una de las corridas de material, debido a que la malla 4 solo tiene en existencia 12.3 kg. y se pretenden realizar dos pruebas con mezclas de 45% de PEBD3 + 55% de PEBD2 aproximadamente. Las mezclas se muestran en la Tabla No. 13

Nota: esta decisión obedece a la necesidad de comprobar la hipótesis planteada en este documento.

Clave	PTM (kg)	L2-PEBD3 (kg)	L1-PEBD2 (kg)	PELBD (kg)	Master (kg)	Calibre (pulg)	Ancho de película (cm)
L2-STPEBD3	8	3	3.6	1.2	0.2	200	45
L2-M4PEBD3	8	3	3.6	1.2	0.2	200	45
L2-M5PEBD3	8	3	3.6	1.2	0.2	200	45
L2-M10PEBD3	8	3	3.6	1.2	0.2	200	45
L2-M16PEBD3	8	3	3.6	1.2	0.2	200	45
L2-M20PEBD3.	8	3	3.6	1.2	0.2	200	45

Tabla No. 13
Relación de mezclas para PEBD3

Nomenclatura: PTM=Peso Total de la Mezcla, Master=Masterbach.
Las proporciones en el Total de la mezcla son: para el PEBD2=45%, PEBD3=37.5%, Masterbach=2.5%, PELBD=15%

Los resultados fueron los siguientes:

Clave	Kg. entrantes	Kg. Salientes	Tiempo de producción (minutos)	Producción Kg/hr
L2-STPEBD3	8	S/R	S/R	S/R
L2-M4PEBD3	8	S/R	S/R	S/R
L2-M5PEBD3	8	S/R	S/R	S/R
L2-M10PEBD3	8	5.3	15.8	20.12
L2-M16PEBD3	8	6.5	17.3	22.54
L2-M20PEBD3.	8	S/R	S/R	S/R

Tabla No. 14
Resultados de extrusión de película con mezcla PEBD3



Foto No. 15
Producción de película con PEBD3
Al momento de comenzar a estabilizar la burbuja

Nota: Las mezcla que contienen S/R=Sin Resultado, no se pudieron estabilizar en la burbuja para las medidas y el calibre propuesto, ni en alguno menor.

2.6 PRUEBAS REOLÓGICAS DEL PELLET

La reología es una disciplina que trata de la deformación y el flujo de los materiales cuando se ven sometidos a esfuerzos y por este motivo es importante su comportamiento en el estudio de los polímeros, no sólo para comprender mejor su conducta durante la transformación sino también en otras aplicaciones como son: en la dispersión y mezclado de polímeros y aditivos para la fabricación de pinturas, plastisoles y compuestos de moldeo.

Se puede decir que hay dos tipos de deformación de la materia: la deformación reversible (elasticidad) y la deformación irreversible (flujo). De la definición de reología se desprende que hay dos propiedades importantes que deben tomarse en consideración para el estudio de procesamiento de polímeros que son: las propiedades relacionadas con la elasticidad y las relacionadas con la viscosidad. Las propiedades elásticas se manifiestan cuando el sólido se ve sometido a fuerzas normales, el trabajo requerido para deformar el material se almacena como energía potencial que se elimina cuando el cuerpo retorna a su forma original [3]

La predicción del comportamiento de los polímeros en la etapa de transformación no es un asunto simple, requiere de un número importante de pruebas cuya interpretación, basada en la experiencia y con el auxilio de instrumentos y equipos especiales (los reómetros por ejemplo), permiten conocer las propiedades del fluido, especialmente, la viscosidad, para casos específicos la formulación de compuestos y para algunas simulaciones de procesos de transformación.

De la información que se obtiene a partir de los reómetros se pueden resolver ciertos problemas como:

- ✓ Selección de aditivos y sus dosis (estabilizadores, lubricantes, ayudas de proceso, etc),
- ✓ Determinación de las condiciones óptimas de mezclado del polímero y sus aditivos),
- ✓ Deformación del producto a la salida del dado,
- ✓ Prevención del desgaste de la maquinaria ,
- ✓ Aumento de la productividad,
- ✓ Bases de diseño para maquinarias de transformación como es el extrusor (husillo, dado, etc),
- ✓ Reciclado (rehúso de termoplásticos).

Existen diferentes tipos de aparatos que son utilizados para determinar las propiedades reológicas de los materiales poliméricos, como son el reómetro de cono y plato, de cilindros concéntricos, de placas paralelas y el de tipo capilar, de estos el más utilizado es el reómetro capilar. Cabe señalar que la expresión “viscosímetro capilar” a sido introducido en el lenguaje común en lugar de la de reómetro capilar, puesto que este determina la viscosidad de un fluido tomando como base las mediciones de gastos, caídas de presión y temperaturas. [3]

2.6.1 Determinación del índice de fluidez

El **índice de fluidez** es una prueba reológica básica que se realiza a un polímero para conocer su fluidez. El índice de fluidez consiste en tomar una cantidad de polímero a una temperatura conocida arriba de su T_g y obligarlo con la fuerza de gravedad y un peso dado a través de un orificio por un tiempo determinado. [7]

El índice de Fluidez es una medición en condiciones estandarizadas y en laboratorio de la capacidad del flujo de los plásticos en estado fundido. Este parámetro facilita la denominación del grado de un plástico, es decir, saber si el material es para inyección o extrusión. También es un indicativo del peso molecular del plástico, sin embargo, la capacidad del flujo del material fundido es el resultante de varios parámetros además del peso molecular, por ejemplo la distribución del peso molecular, ramificaciones de la cadena molecular, aditivos, entre otros. [4]

El aparato de medición se puede considerar como un viscosímetro (reómetro) capilar que opera a presión (fuerza) constante. Se utiliza para determinar el llamado índice de fluidez (Melt Flow Index), el cual está definido como “la cantidad de material (gramos) que fluye a través de un dado capilar en un tiempo de 10 minutos bajo condiciones estándar de temperatura y presión”. El dado capilar utilizado tiene una longitud (l) de 8.00mm y un radio R de 1.05 mm. [1]

Debido principalmente a lo corto del dado capilar ($L/R \approx 8$), el dato que se obtiene incluye propiedades viscosas y elásticas. Así, la caída de presión a lo largo del capilar ΔP_c (relacionada con las características viscosas del material) pudiera ser de magnitud comparable a la caída de presión ocasionada por el cambio en área de paso a la entrada del capilar ΔP_E (relacionada con las características elásticas del material). Así, dos resinas que tengan el mismo índice de fluidez no necesariamente tendrán la misma viscosidad, ya que pudieran presentar distintos ΔP (caídas de presión a la entrada del capilar). Por lo tanto, los datos obtenidos en el medidor de índice de fluidez deben ser manejados con cautela y no olvidar que estos datos son solamente un índice. [1]

La velocidad de flujo obtenida con el plastómetro de extrusión no es una propiedad fundamental del polímero. Es un parámetro empíricamente definido y críticamente influenciado por las propiedades físicas y estructura molecular del polímero y las condiciones de medición. Las características reológicas de polímeros fundidos depende de un número de variables como la viscosidad. De aquí que los valores de esta variables tomen lugar en esta prueba pueden diferir substancialmente de aquellos en los procesos de gran escala, los resultados de la prueba pueden no correlacionarse directamente con el comportamiento del proceso. [8]

El método de prueba para los fines de este documento está basado en la norma ASTM D1238-94a (Método de prueba estándar para velocidades de flujo de termoplásticos por plastómetro de extrusión)

2.6.1.1 Materiales y equipo

- ✓ Pellet del L1-PEBD2: Sin Tamizar, Malla 10, Malla 20
- ✓ Pellet del L2-PEBD3: Sin Tamizar, Malla 4, Malla 5, Malla 10, Malla 16, Malla 20
- ✓ Plastómetro de extrusión
- ✓ Equipo de limpieza de plastómetro
- ✓ Balanza de precisión con resolución: 0.0001 gr.
- ✓ Pinzas de sujeción

2.6.1.2 Condiciones de prueba

- ✓ Peso de carga= 2160 gr distribuido entre pistón=100 gr. y sobrepeso de 2060,
- ✓ Radio del pistón= 1.05 mm.
- ✓ Presión aproximada = 43.25 kg.
- ✓ Tiempo de estabilización de temperatura para primera prueba =15 min.
- ✓ Temperatura de prueba= 190°C +/- 0.2 °C
- ✓ Tiempo de introducción del pellet al barril <1 min.
- ✓ Melt Time (Preparación de la temperatura y flujo del material)= 240 seg.
- ✓ Tiempo de corte de muestra=30 seg.
- ✓ Número de muestras = 8 +/- 1

2.6.1.3 Método

1. Seleccionar las condiciones de prueba de acuerdo a norma
2. Programar el aparato
3. Verificar limpieza del dado
4. Cargar el cilindro (barril) dentro del lapso de un minuto con una porción de material.
5. Compactar material con el pistón
6. Insertar el pistón y agregar sobrepeso.
7. Dejar que el material se suavice y empiece a fundirse.
8. Purgar algo de material para una posición tal que el viaje subsecuente del pistón se posicionara en la marca más baja en la posición de referencia de arranque. La purga debe ser completada antes del término del Melt time.
9. Espera a que se realice el primer corte y retirar la masa fundida.
10. Colectar las muestras y colocarlas en contenedor
11. Pesar cada muestra en balanza.
12. Anotar sobre la base de 30 seg.
13. Calcular mediante regla de tres la proporción a 600 seg. (10 min.)

Nota: Para cada inter-cambio de material de prueba, se descarga por completo el barril y se realiza limpieza del barril y del dado.

2.6.1.4 Resultados preliminares

Los resultados para cada tipo de pellet se muestran en la Tabla No. 15 a manera de ejemplo, los resultados finales y completos se muestran en la capítulo 3 de este documento.

L2-M16PEBD3	
Muestra	Peso
1	0.0446
2	0.0451
3	0.0452
4	0.0454
5	0.0458
6	0.046
7	0.046
8	0.0459
PROMEDIO	0.0455
MFR	0.9100

L2-M20PEBD3	
Muestra	Peso
1	0.0443
2	0.049
3	0.0495
4	0.0494
5	0.0506
6	0.0497
7	0.05
8	0.0497
PROMEDIO	0.0490
MFR	0.9805

L2-STPEBD3	
Muestra	Peso
1	0.0438
2	0.0483
3	0.0471
4	0.0491
5	0.0495
6	0.0496
7	0.0499
8	0.0503
PROMEDIO	0.0485
MFR	0.9690

Tabla No. 15
Resultados y cálculo de Índice de Fluidez



Foto No. 16
Aspecto de las muestras para
medir el peso y encontrar el índice de fluidez

2.6.2 Determinación del esfuerzo de corte (velocidad de flujo) y de la viscosidad del pellet de con resultados satisfactorios en producción de película extraída.

Los materiales plásticos no exhiben el comportamiento simple de un fluido newtoniano. El comportamiento de estos fluidos no-newtonianos puede ser clasificado en tres diferentes clases:

Fluidos independientes del tiempo. Son fluidos cuya viscosidad es independiente del tiempo, pero depende de la velocidad de corte y de la temperatura.

Fluidos dependientes del tiempo. Son fluidos cuya viscosidad depende del tiempo y además de la velocidad de corte y de la temperatura.

Materiales viscoelásticos. Son fluidos no-newtonianos que muestran un comportamiento predominantemente viscoso, pero que exhiben un comportamiento elástico de manera parcial.

Los plásticos fundidos difieren mucho en su viscosidad. Además la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura y al aumentar la velocidad de corte (es decir, la velocidad de flujo). Por ejemplo, es muy importante mantener un adecuado control de la temperatura y de la velocidad de corte (velocidad de rotación del husillo) para lograr que el plástico fundido salga siempre del extrusor con la misma consistencia.

Por otro lado, entre mayor sea la viscosidad mayor será el consumo de energía.

Algunos plásticos son muy fluidos cuando están fundidos (es decir, tienen muy baja viscosidad). Los extruidos de tales materiales, tienden a distorsionarse, a menos que se solidifiquen rápidamente al salir del extrusor.

Así como la viscosidad depende de la temperatura y de la velocidad de flujo, también depende del peso molecular del plástico. La viscosidad aumenta al aumentar el peso molecular. Así, por ejemplo, se puede encontrar polietileno de bajo, medio y alto peso molecular (alto, medio y bajo índice de fluidez) que será de baja, media y alta viscosidad, respectivamente. Así, en caso de que se tengan problemas por manejar un plástico que sea demasiado fluido, es posible cambiar a un grado de mayor peso molecular y viceversa. [1]

Los coeficientes de viscosidad se utilizan para caracterizar el comportamiento reológico de un material. En la práctica se pueden encontrar varios coeficientes como son:

- Viscosidad dinámica
- Viscosidad cinemática
- Viscosidad relativa

La viscosidad dinámica “ η ” se define como la relación del esfuerzo cortante a la velocidad de corte:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \dots 1$$

A esta también se le conoce como “viscosidad aparente”, sus unidades en el sistema internacional de unidades (SI) son Pascal/segundo.

El valor de “ η ” depende de la temperatura y de la presión. Si el fluido es “newtoniano” (que obedece a la ley de Newton de la viscosidad) a la viscosidad se le designa con la letra “ μ ”

Cuando la viscosidad de un fluido se divide entre su densidad el resultado es:

$$\nu = \mu / \rho \quad \dots 2$$

En la que μ es la viscosidad cinemática y ρ es la densidad.

Cuando se tiene un soluto en solución se define como viscosidad relativa μ_r a:

$$\mu_r = \mu / \mu_s \quad \dots 3$$

Siendo μ_s la viscosidad del solvente puro.

Los equipos utilizados para medir la viscosidad se denominan viscosímetros y principalmente se clasifican en:

- Viscosímetros capilares
- Viscosímetros rotacionales

Los viscosímetros capilares se utilizan preferentemente para mediciones rápidas de la viscosidad absoluta de fluidos newtonianos, siendo el más importante el viscosímetro de Ostwald. La medición de la viscosidad por este, se basa en la ley de Poiseuille:

$$\eta = \pi PR^4 / 8LQ \quad \dots 4$$

Siendo P la presión, Q el gasto volumétrico, R y L el radio y la longitud del capilar respectivamente.

Para un fluido que no sigue la ley de Newton (no newtoniano), se utiliza la ecuación 4, modificada por la corrección de Rabinowitsch y quedaría:

$$\eta = \left(\frac{n}{3n+1} \right) \frac{\pi PR^4}{8LQ} \quad \dots 5$$

En donde “n” es una constante de tipo empírico.

[3]

Nota: en el punto 2.52.1 se explica de manera más precisa el “porque” de la corrección de Rabinowitsch.

El viscosímetro o reómetro capilar es un instrumento de particular interés para la medición de las propiedades de flujo (reológicas) de plásticos fundidos. El viscosímetro capilar opera a velocidades de corte entre 10 y 10 000 seg^{-1} y cubre ampliamente el intervalo de velocidades de corte que se presentan en procesos tales como extrusión e inyección.

El reómetro capilar consiste de un barril con calentamiento eléctrico, en cuyo extremo se coloca un pequeño dado capilar a través del cual se hace pasar emplástico fundido. Existen dos variantes básicas de este diseño:

- a) Instrumentos en los cuales un pistón baja a través del barril, a velocidad constante, forzando al plástico fundido a pasar a través del capilar. Se mide la fuerza que es necesario aplicar al pistón para empujar el material a una velocidad determinada.
- b) Instrumentos en los cuales se aplica una fuerza constante, forzando al plástico fundido a pasar a través del capilar. Se mide el flujo de material que sale del capilar a una fuerza determinada.

En el análisis de flujo a través de un capilar se hacen las siguientes suposiciones:

1. No hay deslizamiento de flujo en la pared del capilar
2. El fluido es independiente del tiempo
3. El patrón de flujo es constante a lo largo del capilar
4. El flujo es isotérmico
5. El fluido es incompresible.

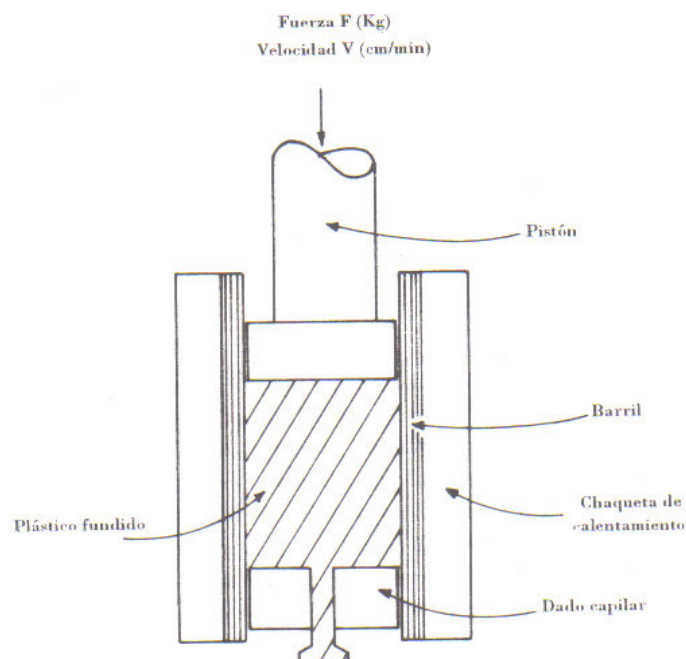


Figura No. 11 Muestra el barril de un reómetro capilar

1. **No deslizamiento.** En caso de ocurrir deslizamiento, el perfil de velocidades deja de ser parabólico (se presenta un perfil chato). Así los datos obtenidos con diferentes capilares producirán resultados de

velocidades de corte diferentes, y las curvas obtenidas con estos datos no se superponen unas sobre otras, como deberían. (cabe hacer mención que esta falta de superposición puede deberse a efectos de dependencia con el tiempo o a efectos de entrada). Sin embargo, para la mayoría de los termoplásticos fundidos no existe evidencia de deslizamiento en la pared del canal, siendo válida la suposición de no deslizamiento.

2. **Independencia del tiempo.** Igualmente, para la mayoría de los plásticos fundidos no existe evidencia de flujos dependientes del tiempo, y la suposición de independencia del tiempo es válida.
3. **Patrón de flujo constante.** En caso de no existir un patrón de flujo constante a lo largo de todo el capilar, el análisis será válido si se restringe a la diferencia de presiones ΔP que existe entre dos puntos separados una distancia L , a lo largo de la cual sí se tendrá un patrón de flujo constante. Sin embargo, observaciones experimentales con plásticos fundidos muestran que casi desde la entrada al capilar alcanza un patrón de flujo constante, es decir, esta suposición se puede tomar también como válida.
4. **Flujo isotérmico.** El flujo de un plástico fundido va siempre acompañado de una disipación de calor, que será proporcional al producto del esfuerzo σ por la velocidad de corte θ . Así, cuando se tienen condiciones de flujo con altos esfuerzos y velocidades de corte – como en los procesos de extrusión e inyección-pueden ocurrir incrementos en la temperatura de hasta 20°C . esto- a su vez- reduce la viscosidad aparente y tiende a exagerar el efecto pseudoplástico del material fundido. Sin embargo, normalmente no se hace ninguna corrección para contrarrestar los efectos del calentamiento, y los datos así obtenidos en un reómetro capilar se consideran aceptables.
5. **Fluido incomprensible.** A presiones de hasta 200 kg/cm^2 (que pudiera considerarse como la presiones de prueba utilizadas en la mayoría de los viscosímetros capilares), la compresibilidad de un plástico fundido puede considerarse despreciable. Sin embargo, a presiones de 1000 kg/cm^2 fáciles de alcanzar, en un viscosímetro capilar la densidad de un plástico fundido aumenta con la presión; a 1000 kg/cm^2 , la viscosidad puede ser de dos a cinco veces mayor. Así pues, considerando que a las presiones de trabajo son inferiores a 200 kg/cm^2 , la suposición se puede tomar como válida.

De lo anterior se resume que las suposiciones 2 y 3 (independencia del tiempo y patrón reflujo constante) son válidas para un amplio intervalo de condiciones de operación, mientras que las suposiciones 1, 4 y 5, dejan de ser válidas en la medida que aumentan los esfuerzos y las velocidades de corte, así como las presiones involucradas. [1]

2.6.2.1 Aplicaciones

En flujo a través de un dado capilar, el esfuerzo de corte para fluidos independientes del tiempo está relacionado con la caída de presión ΔP_c , que ocurre a lo largo del capilar de longitud (L) y radio R, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{R\Delta P_c}{2L} \quad \dots 6$$

Asimismo la velocidad de corte para fluidos newtonianos está relacionada con el flujo volumétrico Q, que sale a través del capilar de radio R, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad \dots 7$$

Ejemplo.

La Tabla No. 16 muestra un típico ejemplo de los datos que se obtienen en un reómetro capilar que opera a velocidad constante.

V (cm/min)	F(kg)
0.03	79
0.1	113
0.3	452
1.0	205
3.0	260

Tabla No. 16
Resultados de un reómetro capilar

V= velocidad del pistón al empujar el material

F=Fuerza aplicada al pistón para empujar el material

La temperatura de la prueba es de 160 °C y el dado capilar utilizado tiene una relación L/R igual a 20, con un diámetro de 1mm. el área transversal del barril del reómetro capilar A_p es igual a 0.7125 cm².

Con los datos de velocidad V se calcula el flujo volumétrico de la siguiente forma:

$$Q = \frac{V(\text{cm/min}) A_p (\text{cm}^2)}{60(\text{seg} / \text{min})} \equiv (\text{cm}^3 / \text{seg}) \quad \dots 8$$

Y con los datos de Q se calcula γ , aplicando la ecuación $\gamma = \frac{4Q}{\pi R^3}$ y con los datos de fuerza F se calcula la caída de presión:

$$\Delta p = \frac{F(\text{kg}) 980\,000 (\text{dinas/kg})}{A_p (\text{cm}^2)} \equiv (\text{dinas/cm}^2)$$

Y con los datos de ΔP_c se calcula σ utilizando la ecuación $\sigma = \frac{R\Delta P_c}{2L}$

γ (seg-1)	σ (dinas/cm ²)	η (poises)
3.6	2.74×10^6	7.61×10^5
12.0	3.92×10^6	3.27×10^5
36.0	5.19×10^6	1.44×10^5
120.0	7.06×10^6	0.59×10^5
360.0	8.92×10^6	0.25×10^5

Tabla No. 17 Datos de la velocidad de corte y viscosidad

1 min= 60 seg

1 kg= 980 000 dinas

Viscosidad= $\eta = \sigma/\gamma$ (dinas seg/cm²=poises)

Con estos datos se obtienen las siguientes figuras:

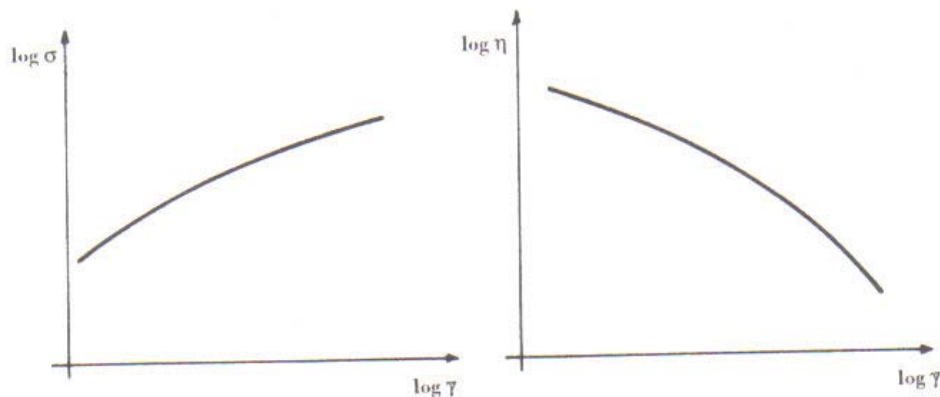


Figura No. 12 Gráficas de esfuerzo de corte y Viscosidad

Además, de la figura No. 12 se obtiene la pendiente (índice de la ley de la potencia), que para este ejemplo es de 0.26.

Este análisis puede considerarse válido para efectos de comparación entre resinas del mismo tipo. Sin embargo, para comparación entre resinas de

diferente tipo, o para diseño, es necesario efectuar algunas correcciones a los datos obtenidos.

La primera corrección, para el esfuerzo de corte (corrección de Bagley) es debida a lo que se conoce como efectos de entrada. Al respecto, la caída de presión registrada por el pistón ΔP_T incluye la caída de presión a lo largo del capilar ΔP_C (debida a las características viscosas del material; y de acuerdo con la ecuación $\sigma = \frac{R\Delta P_C}{2L}$, esta es la caída de presión que debe tomarse en cuenta para calcular el esfuerzo de corte), más la caída de presión a la entrada del capilar ΔP_E (ocasionada por el repentino cambio en el área de paso, del barril al capilar). La magnitud de ΔP_E dependerá de las características elásticas del material.

Esta corrección se puede hacer restando ΔP_E de ΔP_T ($\Delta P_T - \Delta P_E = \Delta P_C$) para considerar a sí, sólo la caída de presión a lo largo del capilar (ΔP_C), que depende principalmente de las características viscosas del material.

$$\sigma = \frac{R(\Delta P_T - \Delta P_E)}{2L} = \frac{R\Delta P_C}{2L} \quad \dots 9$$

Esta corrección se puede hacer también suponiendo que el dado capilar se incrementa por una longitud ficticia adicional ΔL . Esta longitud adicional producirá una caída de presión ΔP_C (debida a las características viscosas del material) igual a la caída de presión que se tiene a la entrada del capilar ΔP_E (debida al cambio en el área de paso); es decir, la longitud del capilar se incrementa artificialmente para suponer así que la caída de presión total ΔP_T es debida enteramente a las características viscosas del material.

$$\sigma = \frac{R(\Delta P_T)}{2(L + \Delta L)} = \frac{\Delta P_T}{2(L/R + \Delta L/R)} = \frac{\Delta P_T}{2(L/R + e)} \quad \dots 10$$

Al graficar (ΔP_T) vs (L/R) se obtiene una línea recta. De la intersección de la recta con el eje de las ordenadas se obtiene (ΔP_E) , y de la intersección de la recta con el eje de las abscisas se obtiene el valor de "e". Figura No. 13

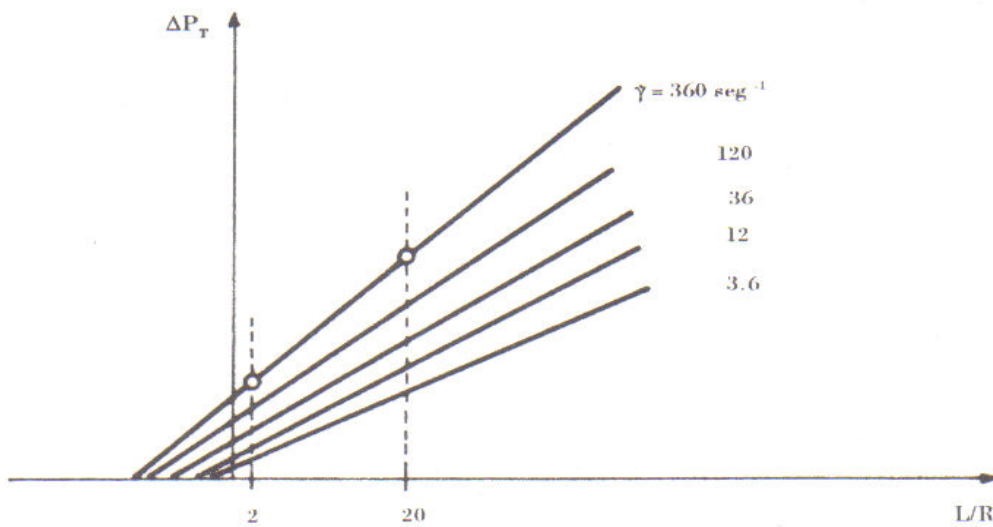


Figura No. 13 Grafica de velocidades de corte obtenidas de relaciones ΔP_T y L/R para obtener y ΔP_T "e"

Además, a partir de la pendiente de la línea recta se obtiene el valor del esfuerzo de corte correspondiente. Cabe mencionar que para esta corrección es necesario hacer la prueba con un mínimo de dos dados capilares, unos de ellos con el menor L/R posible. Por ejemplo, si se hace la prueba con dos dados capilares con $L/R=2$ y con $L/R=20$, se obtiene los datos que se presentan en la tabla No 18:

V (cm/min)	L/R=2		L/R=20	
	F (kg)	ΔP_T (Kg/cm ²)	F (kg)	ΔP_T (Kg/cm ²)
00.03	8.8	12.4	79	111
0	13.0	18.2	113	159
0.3	18.3	25.7	152	213
1.0	25.0	35.1	205	288
3.0	32.0	45.0	260	365

**Tabla No. 18
Resultados de caída de presión total**

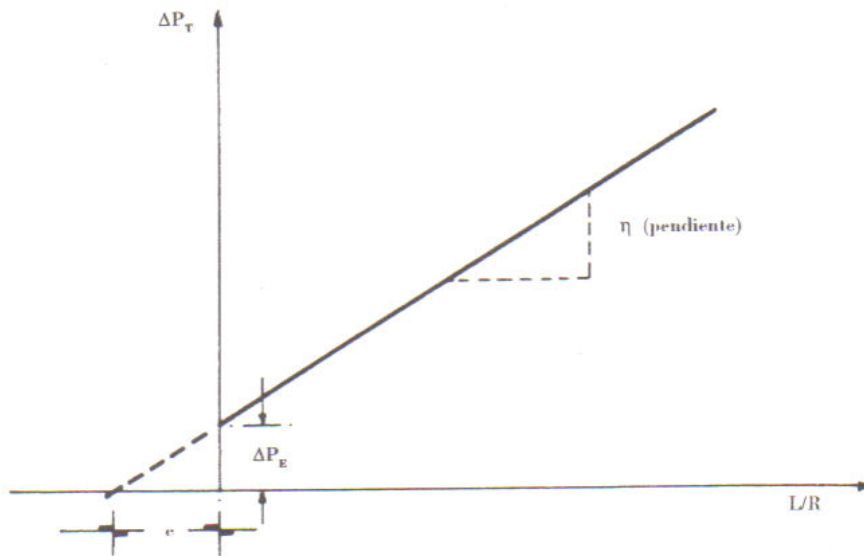


Figura No. 14
El cálculo de la pendiente representa el índice de la Ley de potencia

γ (seg ⁻¹)	σ (dinas/cm ²)	η (poises)	ΔL_E (Kg/cm ²)	$\Delta L/R$
3.6	2.68×10^6	7.46×10^5	1.4	0.2
12.0	3.83×10^6	3.19×10^5	2.5	0.3
36.0	5.10×10^6	1.42×10^5	4.9	0.5
120.0	6.88×10^6	0.57×10^5	7.0	0.5
360.0	8.71×10^6	0.24×10^5	9.4	0.5

Tabla No. 19
Resultados del esfuerzo de corte y de la viscosidad para un fluido newtoniano

Nota: a pesar de ser esta una corrección importante en geometría capilar, puede resultar muy tediosa y consumir mucho tiempo. Una manera de minimizar el error que se presenta al pasar ésta por alto es utilizar un solo dado con L/R alrededor de 40.

De la tabla No. 18 se obtiene los datos de la tabla No. 19 Por ejemplo, el esfuerzo de corte σ , corresponde a una velocidad de corte γ de 360 seg^{-1} , es igual a $\frac{1}{2}$ de la pendiente de la recta que corresponde precisamente a $\gamma=360 \text{ seg}^{-1}$. Esta pendiente es igual a $(\gamma_2 - \gamma_1) / (x_2 - x_1)$, es decir, $(365 - 45) / (20 -$

2)=17.77 **Kg/cm²**. Esto se multiplicado por ½ y luego por 980 000(dinas/cm²) para obtener 8.71x 10⁶ dinas/cm².

La segunda corrección, para la velocidad de corte (corrección de Rabinowitsch) es debida a que se ha utilizado la ecuación #7, que es válida solamente para fluidos newtonianos; sin embargo, los plásticos fundidos son fluidos no – newtonianos. En este caso la velocidad de corte debe calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{3n+1}{4n} \left(\frac{4Q}{\pi R^3} \right) \quad \dots 11$$

Donde:

$$n = \frac{d \log(R\Delta p_T / 2L)}{d \log(4Q / \pi R^3)} \quad \dots 12$$

En este caso, “n” viene a ser la pendiente de una gráfica de $\log (R\Delta p_T / 2L)$ vs $\log(4Q / \pi R^3)$, que se determinó previamente para este ejemplo como 0.26, así:

$$\frac{3n+1}{4n} = 1.70$$

Tomando en cuenta esto último, se obtienen los datos que se presentan en la tabla siguiente:

γ (seg ⁻¹)	σ (dinas/cm ²)	η (poises)
6	2.68 x 10 ⁶	4.40 x 10 ⁵
20	3.83x 10 ⁶	1.87 x 10 ⁵
60	5.10 x 10 ⁶	0.84 x 10 ⁵
200	6.88 x 10 ⁶	0.34 x 10 ⁵
600	8.71 x 10 ⁶	0.14 x 10 ⁵

Tabla No. 20
Resultados del esfuerzo de corte y de la viscosidad para un fluido no newtoniano [1]

2.6.2.2 Materiales y equipo

- ✓ Pellet del L1-PEBD2: Sin Tamizar, Malla 10, Malla 20
- ✓ Pellet del L2-PEBD3: Sin Tamizar, Malla 10, Malla 16
- ✓ Reómetro capilar
- ✓ Equipo de limpieza de plastómetro
- ✓ Balanza de precisión con resolución: 0.0001 gr.

2.6.2.3 Condiciones de prueba

- ✓ Calentamiento inicial del barril= 40 min.
- ✓ Diámetro del dado capilar= 1.10 mm.
- ✓ Extensión precarga/inicio= 210/230 kgf para homogeneización con 3 minutos para cada ciclo; total del ciclo 6 minutos.
- ✓ Relación L/D=27.5
- ✓ Longitud del barril=30.30 cm.
- ✓ Muestra de pellet=12 gr.
- ✓ Tiempo de recalentamiento del dado=20-25 min.
- ✓ Velocidades de experimentación= 200, 100, 50, 20, 10, 5, 2, 1 mm/min
- ✓ Presión ejercida (precarga fuerza)= 288.0, 301.2, 315.3, 323.4, 327.5, 330.2, 331.5, 332.4 para cada velocidad respectivamente.

Nota: Para cada inter-cambio de material de prueba, se descarga por completo el barril y se realiza limpieza del barril y del dado.

2.6.2.4 Método

1. Seleccionar las condiciones de prueba de acuerdo a norma
2. Calentamiento del aparato
3. Verificar limpieza del dado.
4. Pesar 12 gr. de muestra (pellet)
5. Cargar el cilindro (barril).
6. Insertar pistón.
7. Compactar material con el pistón a velocidad constante de 100 mm/min y 230 kgf. de precarga.
8. Dejar que el material se suavice y empiece a fundirse.
9. Cortar filamento obtenido.
10. Parar acción de fuerza.
11. Establecer parámetro de velocidad.
12. Accionar carga hasta llegar a límite preestablecido.
13. Cortar muestra de filamento.
14. Anotar carga aplicada resultante.
15. Repetir los pasos 10 a 14 para las diferentes velocidades y cargas.
16. Retirar accionamiento de fuerza a 200 mm/min
17. Quitar pistón y dado.
18. Limpiar barril y dado
19. Introducir dado y dejar calentar entre 20-25 min. antes de la siguiente muestra.

2.6.2.5 Resultados preliminares

Velocidad de Corte V (mm·min ⁻¹)	Carga pre-establecida F (Kgf)	Carga Resultante F (Kgf)					
		L1-ST PEBD2	L1-10 PEBD2	L1-M20 PEBD2	L2-ST PEBD3	L2-M10 PEBD3	L2-M16 PEBD3
200	288.0	304.7	328.4	284.1	388.2	347.6	365.6
100	301.2	230.8	250.1	218.6	281.3	263.0	272.0
50	315.3	178.5	186.0	168.7	209.6	196.6	211.3
20	323.4	128.0	120.2	120.6	142.9	132.6	141.3
10	327.5	93.58	81.58	91.08	105.7	99.22	105.7
5	330.2	69.1	54.6	67.0	74.9	73.61	76.83
2	331.5	43.57	31.65	43.09	44.13	47.68	47.76
1	332.4	29.96	21.26	30.2	28.83	33.26	32.37

Tabla No. 21 Resultados preliminares de fuerza de corte resultante

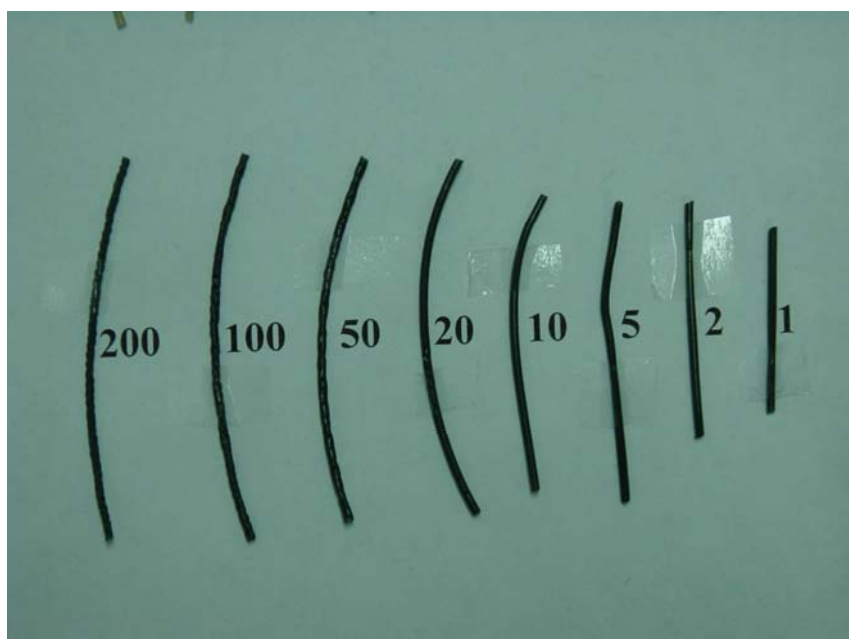


Foto No 17 Aspecto del filamento obtenido en Reómetro capilar para el análisis de viscosidad y esfuerzo de corte de pellet, muestra de L1-M20PEBD2

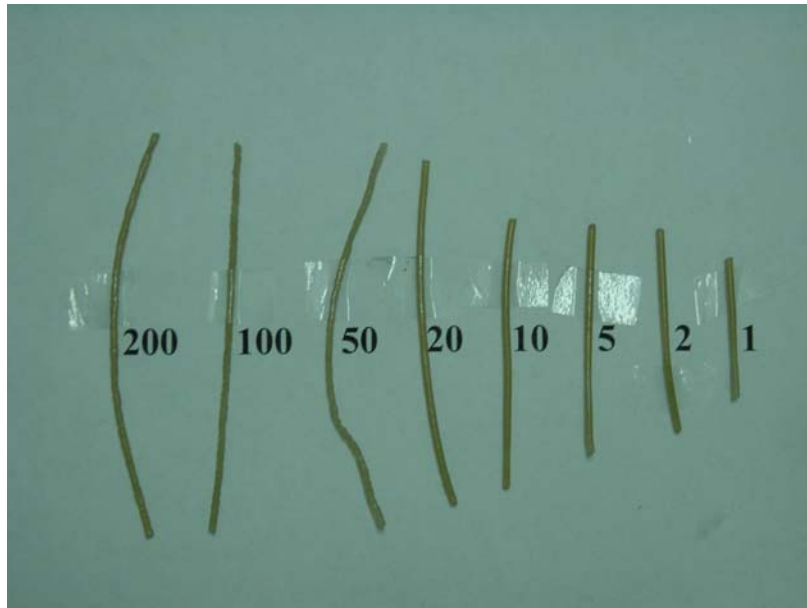


Foto No. 18 Aspecto del filamento obtenido en Reómetro capilar para el análisis de viscosidad y esfuerzo de corte de pellet, muestra de L1-STPEBD2

2.7 PRUEBAS MECÁNICAS DE LA PELÍCULA

2.7.1 Determinación de la tensión-elongación de películas L1-PEBD2 Y L2-PEBD3 en sus diferentes formulaciones.

Las propiedades mecánicas más relevantes de la película resistencia al desgarre, resistencia a la tensión y la resistencia a la penetración, dependen principalmente de la fluidez y de la densidad de la resina utilizada.

Las propiedades mecánicas se pueden ver afectadas por las condiciones de procesamiento como temperatura y velocidad de solidificación. Estas variables se reflejan en la relación de soplado RS y en la relación de estirado RE.

La optimización del proceso depende de la facilidad que se tenga para el control de los parámetros y del control sobre la influencia de los efectos del medio ambiente.

En la prueba de la tensión se pueden obtener el esfuerzo a la tensión en el punto de ruptura y el coeficiente de elongación a la ruptura. La velocidad de estiramiento es de 100 a 500 mm/min y significa el comportamiento del material cuando se le somete a una carga aplicada lentamente (p.ej. en las bolsas de supermercado).

El esfuerzo a la tensión en el punto de ruptura es la fuerza por unidad de área en la sección transversal en el momento de la ruptura.

La elongación es el cambio de longitud que sufre la probeta al momento de la ruptura.

Los valores antes mencionados varían significativamente si son medidos en la dirección del flujo o transversal al mismo. [7]

2.7.1.1 Materiales y equipo

- ✓ Cinta tipo diurex para sujeción de película a vidrio y corte de probetas.
- ✓ Vidrio para trazo, sujeción y corte de probetas.
- ✓ Navaja para corte de probetas.
- ✓ Marcador para trazo de probeta.
- ✓ 12 Probetas de cada película de L1-STPEBD2, L1-M10PEBD2, L1-M20PEBD2, L2-M10PEBD3, L2-M16PEBD3, con 6 en el sentido longitudinal de la película, y 6 en el sentido transversal de la película.
- ✓ Medidor de espesores micrométrico
- ✓ Equipo de Tensión-Elongación

2.7.1.2 Condiciones de prueba

- ✓ Método de prueba ASTM D-882
- ✓ Distancia entre grapas= 25.4 mm.
- ✓ Ancho de probeta= 10 mm.
- ✓ Velocidad de corte o estiramiento= 500 mm/min
- ✓ Humedad relativa= 50%
- ✓ Sample Rate (pts/sec) = 10.000

2.7.1.3 Método

1. Trazar probetas de 10 mm. de ancho y 12 cm. de largo en sentido de orientación longitudinal y transversal de la película.
2. Cortar probetas con cutter
3. Elegir probetas sin corte irregular (fracturas y/o perfil no rectangular)
4. Medir probetas con ancho de 10 mm.
5. Medición de espesor por cada probeta elegida en tres puntos distintos.
6. Captura de espesores.
7. Cálculo de promedio de espesores y desviación estándar.
8. Elección de probetas con menor desviación estándar en el espesor.
9. Montaje de probetas entre grapas de sujeción.
10. Captura en software de espesor promedio y de ancho de probeta.
11. Puesta en marcha de fuerza de separación de grapas.
12. Medición alterna de % de elongación
13. Repetición de puntos 9 a 12 en cada probeta de prueba.

El método programado incluye la separación de Grapas a velocidad constante, y el regreso de grapas a distancia entre las mismas de forma automática.

2.7.1.4 Resultados preliminares

Las probetas para las pruebas fueron seleccionadas de acuerdo a los datos incluidos en el método, las Tablas No. 22 a la No. 25 nos muestran los resultados para selección de probetas.

Probetas Tensión-Elongación_ L1-STPEBD2 (slp)						
No. de probeta	X ancho (cm)	Espesor (cm ⁻³)			Promedio Espesor (cm ⁻³)	D.E.
1	10	37	35	35	35.75	1.15
2	10	36	34	35	35.83	1.00
3	10	34	37	35	35.91	1.53
4	10	37	35	35	36.00	1.15
5	10	37	38	33	36.11	2.65
6	10	36	36	36	36.50	0.00
7	10	34	36	37	36.57	1.53
8	10	37	33	36	36.50	2.08
9	10	32	32	35	36.83	1.73
10	10	30	35	32	37.17	2.52
11	10	36	38	38	38.00	1.15
12	10	39	41	42	38.00	1.53
PROMEDIO		36.0	35.7	36.0	36.4	1.0

Tabla No.22
Probetas elegidas en sentido longitudinal de la película

Probetas Tensión-Elongación_ L1-STPEBD2 (stp)						
No. de probeta	X ancho (cm)	Espesor (cm ⁻³)			Promedio Espesor (cm ⁻³)	D.E.
1	Irregular					
2	Irregular					
3	10	34	35	38	35.67	2.08
4	10	36	36	37	36.33	0.58
5	10	37	36	37	36.67	0.58
6	Irregular					
7	10	37	36	38	37	1.00
8	10	37	35	37	36.33	1.15
9	10	37	37	38	37.33	0.58
10	10	34	39	38	37	2.65
11	Irregular					
12	Irregular					
PROMEDIO		36.3	35.8	37.5	36.556	0.995

Tabla No. 23
Probetas elegidas en sentido transversal de la película

Probetas Tensión-Elongación_ L2-M16PEBD2 (slp)						
No. de probeta	X ancho (cm)	Espesor (cm ⁻³)			Promedio Espesor (cm ⁻³)	D.E.
1	10	39	39	36	38.00	1.73
2	10	42	39	36	39.00	3.00
3	10	42	38	38	39.33	2.31
4	10	36	39	38	37.67	1.53
5	10	42	37	36	38.33	3.21
6	10	33	39	43	38.33	5.03
7	10	37	39	42	39.33	2.52
8	10	42	47	42	43.67	2.89
9	10	41	40	41	40.67	0.58
10	10	46	48	50	48.00	2.00
11	10	42	46	43	43.67	2.08
12	Irregular					
PROMEDIO		40.4	41.3	41.1	41.0	1.8

Tabla No. 24
Probetas elegidas en sentido longitudinal de la película

Probetas Tensión-Elongación_ L2-M16PEBD2 (stp)						
No. de probeta	X ancho (cm)	Espesor (cm ⁻³)			Promedio Espesor (cm ⁻³)	D.E.
1	Irregular					
2	10	47	47	38	44.00	5.20
3	10	39	42	39	40.00	1.73
4	10	42	43	42	42.33	0.58
5	10	44	42	43	43.00	1.00
6	Irregular					
7	Irregular					
8	10	44	45	45	44.67	0.58
9	10	45	45	40	43.33	2.89
10	10	44	43	41	42.67	1.53
11	10	46	48	41	45.00	3.61
12	10	44	45	41	43.33	2.08
PROMEDIO		42.8	43.3	41.8	42.7	1.25

Tabla No. 25
Probetas elegidas en sentido longitudinal de película

2.7.2 Determinación la resistencia al rasgado de películas L1-PEBD2 Y L2-PEBD3 en sus diferentes formulaciones.

2.7.2.1 Materiales y equipo

- ✓ Probeta espécimen para corte de probetas reales
- ✓ Navaja para corte de probetas.
- ✓ Marcador para trazo de probeta.
- ✓ 5 Probetas de cada película de L1-STPEBD2, L1-M10PEBD2, L1-M20PEBD2, L2-M10PEBD3, L2-M16PEBD3.
- ✓ Medidor de espesores micrométrico
- ✓ Equipo de Tensión-Elongación

2.7.2.2 Condiciones de prueba

- ✓ Método de prueba ASTM D-882
- ✓ Distancia entre grapas= 25.4 mm.
- ✓ Velocidad de corte= 500 mm/min
- ✓ Humedad relativa= 50%
- ✓ Sample Rate (pts/sec) = 10.000

2.7.2.3 Método

El método programado incluye:

Separación de Grapas a velocidad constante
Regreso de grapas a distancia entre las mismas

1. Trazar probetas de acuerdo a espécimen en el sentido de orientación longitudinal de la película.
2. Cortar probetas con cutre.
3. Elegir probetas sin corte irregular (fracturas y/o perfil no rectangular)
4. Medición de espesor por cada probeta elegida en tres puntos distintos.
5. Captura de espesores.
6. Montaje de probetas entre grapas de sujeción.
7. Captura en software de espesor promedio y de ancho de probeta.
8. Puesta en marcha de fuerza de separación de grapas.
9. Repetición de puntos 4 a 8 en cada probeta de prueba.

Clave	Datos de prueba	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
PC-PEBD2	Espesor (cm)	0.040	0.039	0.040	0.043	0.034
	Máxima carga (Kgf)	0.379	0.412	0.510	0.492	0.423
	Carga específica (Kg/cm)	9.475	10.564	12.750	11.442	12.441
M10-PEBD2	Espesor (cm)	0.020	0.029	0.015	0.027	0.027
	Máxima carga (Kgf)	0.227	0.293	0.236	0.262	0.275
	Carga específica (Kg/cm)	11.340	10.090	15.747	9.693	10.193
M20-PEBD2	Espesor (cm)	0.029	0.028	0.030	0.023	0.025
	Máxima carga (Kgf)	0.337	0.342	0.271	0.260	0.317
	Carga específica (Kg/cm)	11.617	12.225	9.037	11.322	12.672
M10-PEBD3	Espesor (cm)	0.042	0.049	0.042	0.047	0.041
	Máxima carga (Kgf)	0.395	0.517	0.505	0.427	0.535
	Carga específica (Kg/cm)	9.395	10.547	12.017	9.081	13.046
M16-PEBD3	Espesor (cm)	0.030	0.039	0.039	0.040	0.039
	Máxima carga (Kgf)	0.395	0.525	0.427	0.524	0.448
	Carga específica (Kg/cm)	13.153	13.456	10.944	13.088	11.495

Tabla No. 26
Resultados preliminares de pruebas de resistencia al rasgado en el sentido longitudinal de la película

CAPÍTULO III ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 RESULTADOS DE PRUEBAS REOLÓGICAS Y MECÁNICAS

3.1.1. Resultados de índice de fluidez

Clave	Índice de fluidez (gr/10min)
L1-STPEBD2	0.851
L1-M10PEBD2	0.850
L1-M20PEBD2	0.731
L2-STPEBD3	0.969
L2-M4PEBD3	1.275
L2-M5PEBD3	1.262
L2-M10PEBD3	0.905
L2-M16PEBD3	0.910
L2-M20PEBD3	0.981

Tabla No. 27
Resultados de Índice de Fluidez

3.1.2 Cálculos y resultados de las pruebas de viscosidad y esfuerzo de corte

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
V (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	29.96	1.19	41758879	9.081	378999.73	41736.22
2.00	43.57	2.37	60728784	18.162	551168.83	30347.91
5.00	69.10	5.93	96313036	45.404	874128.22	19252.15
10.00	93.58	11.87	130433776	90.808	1183804.90	13036.30
20.00	128.00	23.73	178409098	181.617	1619224.48	8915.61
50.00	178.50	59.33	248797062	454.042	2258059.14	4973.24
100.00	230.80	118.66	321693904	908.084	2919664.15	3215.19
200.00	304.70	237.32	424697281	1816.167	3854513.28	2122.33

log(γ)	log(τ)	Log(η)
0.9581	5.5786	4.6205
1.2592	5.7413	4.4821
1.6571	5.9416	4.2845
1.9581	6.0733	4.1152
2.2592	6.2093	3.9502
2.6571	6.3537	3.6966
2.9581	6.4653	3.5072
3.2592	6.5860	3.3268

Tabla No. 28 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L1-STPEBD2

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
v (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	34.56	1.19	48170456	9.081	437190.61	48144.32
2.00	45.18	2.37	62972836	18.162	571535.64	31469.33
5.00	72.31	5.93	100787202	45.404	914735.33	20146.50
10.00	105.43	11.87	146950556	90.808	1333709.67	14687.08
20.00	130.80	23.73	182311797	181.617	1654645.02	9110.64
50.00	174.90	59.33	243779306	454.042	2212518.45	4872.94
100.00	227.90	118.66	317651823	908.084	2882978.59	3174.79
200.00	290.87	237.32	405420736	1816.167	3679561.13	2026.00

$\log(\gamma)$	$\log(\tau)$	$\log(\eta)$
0.9581	5.6407	4.6825
1.2592	5.7570	4.4979
1.6571	5.9613	4.3042
1.9581	6.1251	4.1669
2.2592	6.2187	3.9595
2.6571	6.3449	3.6878
2.9581	6.4598	3.5017
3.2592	6.5658	3.3066

Tabla No. 29 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L1-M10PEBD2

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
v (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	30.20	1.19	42093396	9.081	382035.78	42070.55
2.00	43.09	2.37	60059750	18.162	545096.74	30013.58
5.00	67.00	5.93	93386012	45.404	847562.82	18667.07
10.00	91.08	11.87	126949223	90.808	1152179.42	12688.03
20.00	120.60	23.73	168094822	181.617	1525613.07	8400.18
50.00	168.70	59.33	235137615	454.042	2134087.27	4700.20
100.00	218.60	118.66	304689287	908.084	2765331.81	3045.24
200.00	284.10	237.32	395984567	1816.167	3593919.34	1978.85

$\log(\gamma)$	$\log(\tau)$	$\log(\eta)$
0.9581	5.5821	4.6240
1.2592	5.7365	4.4773
1.6571	5.9282	4.2711
1.9581	6.0615	4.1034
2.2592	6.1834	3.9243
2.6571	6.3292	3.6721
2.9581	6.4417	3.4836
3.2592	6.5556	3.2964

Tabla No. 30 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L1-M20PEBD2

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
v (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	29.96	1.19	41758879	9.081	378999.73	41736.22
2.00	43.57	2.37	60728784	18.162	551168.83	30347.91
5.00	69.10	5.93	96313036	45.404	874128.22	19252.15
10.00	93.58	11.87	130433776	90.808	1183804.90	13036.30
20.00	128.00	23.73	178409098	181.617	1619224.48	8915.61
50.00	178.50	59.33	248797062	454.042	2258059.14	4973.24
100.00	230.80	118.66	321693904	908.084	2919664.15	3215.19
200.00	304.70	237.32	424697281	1816.167	3854513.28	2122.33

log(γ)	Log(τ)	log(η)
0.9581	5.5786	4.6205
1.2592	5.7413	4.4821
1.6571	5.9416	4.2845
1.9581	6.0733	4.1152
2.2592	6.2093	3.9502
2.6571	6.3537	3.6966
2.9581	6.4653	3.5072
3.2592	6.5860	3.3268

Tabla No. 31 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-STPEBD3

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
V (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	20.80	1.19	28991478	9.081	263123.98	28975.75
2.00	32.12	2.37	44769533	18.162	406324.14	22372.62
5.00	53.10	5.93	74011899	45.404	671725.16	14794.35
10.00	78.12	11.87	108885302	90.808	988232.94	10882.62
20.00	119.00	23.73	165864708	181.617	1505372.76	8288.73
50.00	182.45	59.33	254302655	454.042	2308027.40	5083.29
100.00	223.23	118.66	311142678	908.084	2823902.20	3109.74
200.00	319.54	237.32	445381586	1816.167	4042242.12	2225.70

log(γ)	log(τ)	log(η)
0.9581	5.4202	4.4620
1.2592	5.6089	4.3497
1.6571	5.8272	4.1701
1.9581	5.9949	4.0367
2.2592	6.1776	3.9185
2.6571	6.3632	3.7061
2.9581	6.4508	3.4927
3.2592	6.6066	3.3475

Tabla No. 32 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M4PEBD3

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
v (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	28.83	1.19	40183862	9.081	364705.01	40162.05
2.00	44.13	2.37	61509324	18.162	558252.94	30737.97
5.00	74.90	5.93	104397198	45.404	947499.33	20868.11
10.00	105.70	11.87	147326888	90.808	1337125.22	14724.69
20.00	142.90	23.73	199177032	181.617	1807712.33	9953.45
50.00	209.60	59.33	292144897	454.042	2651480.09	5839.73
100.00	281.30	118.66	392081868	908.084	3558498.80	3918.69
200.00	388.20	237.32	541081341	1816.167	4910804.25	2703.94

$\log(\gamma)$	$\log(\tau)$	$\log(\eta)$
0.9581	5.5619	4.6038
1.2592	5.7468	4.4877
1.6571	5.9766	4.3195
1.9581	6.1262	4.1680
2.2592	6.2571	3.9980
2.6571	6.4235	3.7664
2.9581	6.5513	3.5931
3.2592	6.6912	3.4320

Tabla No. 33 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M10PEBD3

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
v (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	33.26	1.19	46358489	9.081	420745.36	46333.33
2.00	47.68	2.37	66457389	18.162	603161.12	33210.66
5.00	73.61	5.93	102599169	45.404	931180.58	20508.70
10.00	99.22	11.87	138294927	90.808	1255151.98	13821.99
20.00	132.60	23.73	184820674	181.617	1677415.36	9236.02
50.00	196.60	59.33	274025223	454.042	2487027.60	5477.53
100.00	263.00	118.66	366574943	908.084	3327000.30	3663.76
200.00	347.60	237.32	484492205	1816.167	4397206.49	2421.15

$\log(\gamma)$	$\log(\tau)$	$\log(\eta)$
0.9581	5.6240	4.6659
1.2592	5.7804	4.5213
1.6571	5.9690	4.3119
1.9581	6.0987	4.1406
2.2592	6.2246	3.9655
2.6571	6.3957	3.7386
2.9581	6.5221	3.5639
3.2592	6.6432	3.3840

Tabla No. 34 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M10PEBD3

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
v (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	32.37	1.19	45117988	9.081	409486.69	45093.50
2.00	47.76	2.37	66568895	18.162	604173.14	33266.38
5.00	76.83	5.93	107087273	45.404	971914.20	21405.83
10.00	105.70	11.87	147326888	90.808	1337125.22	14724.69
20.00	141.30	23.73	196946918	181.617	1787472.03	9842.00
50.00	201.30	59.33	280576182	454.042	2546483.50	5608.48
100.00	272.00	118.66	379119332	908.084	3440852.03	3789.14
200.00	365.60	237.32	509580985	1816.167	4624909.93	2546.52

$\log(\gamma)$	$\log(\tau)$	$\log(\eta)$
0.9581	5.6122	4.6541
1.2592	5.7812	4.5220
1.6571	5.9876	4.3305
1.9581	6.1262	4.1680
2.2592	6.2522	3.9931
2.6571	6.4059	3.7488
2.9581	6.5367	3.5785
3.2592	6.6651	3.4059

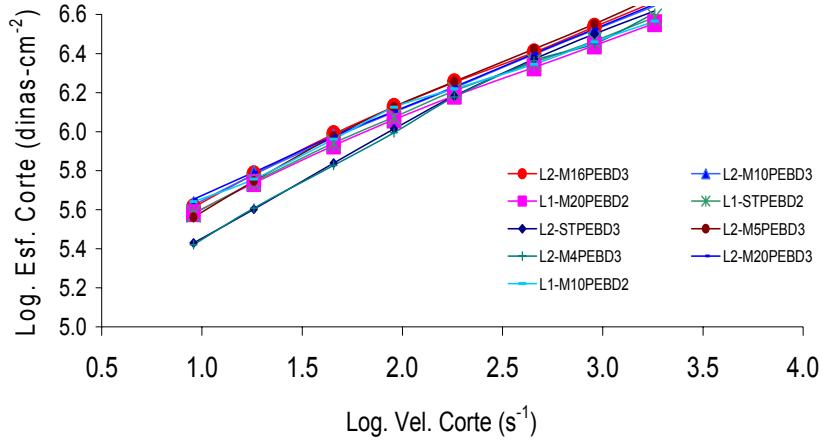
Tabla No. 35 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M16PEBD3

Velocidad del pistón	Fuerza del pistón	Flujo Volumétrico	Caída de Presión	Pendiente de la recta	Esfuerzo de corte	Viscosidad
v (mm·min ⁻¹)	F (Kgf)	Q (mm ³ ·s ⁻¹)	ΔP (dinas·cm ⁻²)	γ (s ⁻¹)	τ (dinas·cm ⁻²)	η (Poises)
1.00	35.61	1.19	49633968	9.081	450473.31	49607.03
2.00	49.00	2.37	68297233	18.162	619859.37	34130.08
5.00	74.98	5.93	104508704	45.404	948511.34	20890.40
10.00	100.24	11.87	139716625	90.808	1268055.17	13964.08
20.00	134.00	23.73	186772024	181.617	1695125.63	9333.53
50.00	198.70	59.33	276952247	454.042	2513593.01	5536.04
100.00	265.50	118.66	370059495	908.084	3358625.78	3698.59
200.00	355.23	237.32	495127060	1816.167	4493727.44	2474.29

$\log(\gamma)$	$\log(\tau)$	$\log(\eta)$
0.9581	5.6537	4.6955
1.2592	5.7923	4.5331
1.6571	5.9770	4.3199
1.9581	6.1031	4.1450
2.2592	6.2292	3.9700
2.6571	6.4003	3.7432
2.9581	6.5262	3.5680
3.2592	6.6526	3.3935

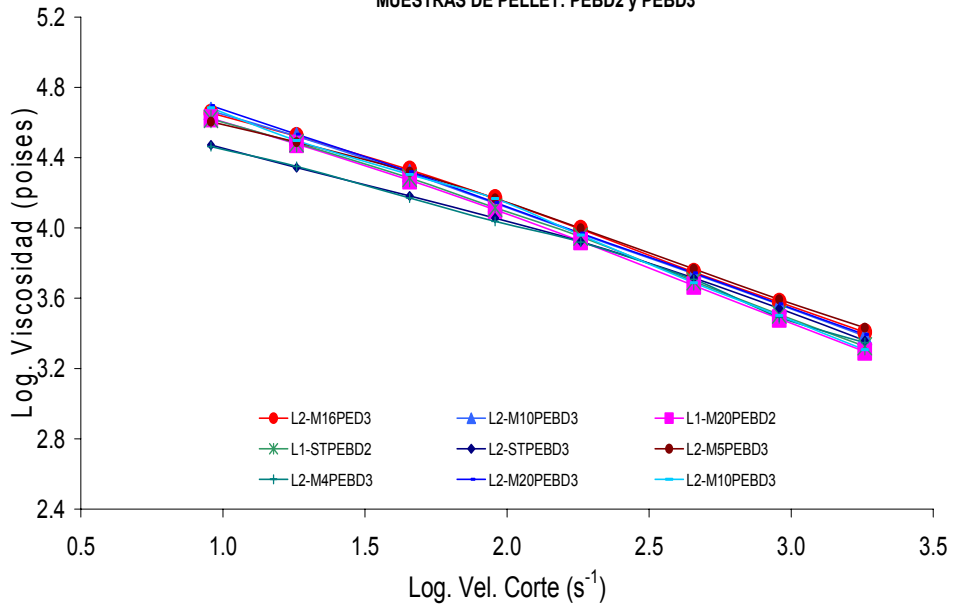
Tabla No. 36 Cálculos y resultados de velocidad de corte, esfuerzo de corte y viscosidad, para L2-M20PEBD3

**REOMETRIA CAPILAR
ESFUERZO DE CORTE
MUESTRAS DE PELLET: PEBD2 y PEBD3**



**Figura No. 15
Gráfico del Esfuerzo de Corte vs Velocidad de Corte**

**REOMETRIA CAPILAR
VISCOSIDAD
MUESTRAS DE PELLET: PEBD2 y PEBD3**



**Figura No. 16
Gráfico de la Viscosidad vs Velocidad de Corte**

No.	CLAVE	ESFUERZO		VISCOSIDAD	
		ECUACIÓN	Y''	ECUACIÓN	Y''
1	LI-STPEBD2	y=0.4318x+5.2029	6.7142	y=-0.5682x+5.2029	3.2142
2	LI-M10PEBD2	y=0.4029x+5.2798	6.68995	y=-0.5609x+5.226	3.26285
3	LI-M20PEBD2	y=0.4183x+5.1252	6.58925	y=-0.5817x+5.2152	3.17925
4	L2-STPEBD3	y=0.5228x+4.961	6.7908	y=-0.4772x+4.961	3.2908
5	L2-M4PEBD3	y=0.5129x+4.9684	6.76355	y=-0.4871x+4.9684	3.26355
6	L2-M5PEBD3	y=0.4804x+5.198	6.8794	y=-0.5196x+5.148	3.3294
7	L2-M10PEBD3	y=0.4391x+5.226	6.76285	y=-0.597X+5.2798	3.1903
8	L2-M16PEBD3	y=0.4491x+5.2184	6.79025	y=-0.5509x+5.484	3.55578
9	L2-M20PEBD3	y=0.4323x+5.2501	6.76315	y=-0.5677x+5.2501	3.26315
Log. Velocidad de Corte			3.5		

Tabla No. 37
Modelado de curvas de esfuerzo de corte y viscosidad
para velocidad de corte a 3.5 s⁻¹

3.1.4 Resultados de las pruebas de la resistencia a la tensión y % de elongación

Clave	Prueba	Promedio Espesor (cm)	D.E.	Tensión máxima (kg/mm ²)	Tensión a la ruptura (kg/mm ²)	Tensión máxima/cm espesor	Tensión a la ruptura/cm espesor	% Elong.
L1-STPEBD2	SLP	0.036	1.00	1.796	1.677	49.492	46.190	195.00
	STP	0.037	0.99	1.734	1.725	47.439	47.175	584.17
L1-M10PEBD2	SLP	0.033	1.09	1.840	1.788	55.390	53.809	158.33
	STP	0.024	2.19	1.109	1.028	45.798	42.458	125.00
L1-M20PEBD2	SLP	0.031	1.41	1.750	1.708	57.152	55.802	275.00
	STP	0.029	0.97	2.206	1.930	75.623	66.183	579.17
L2-M16PEBD3	SLP	0.040	1.80	1.803	1.745	45.335	43.865	319.44
	STP	0.043	1.25	2.051	2.050	48.059	48.035	590.83
L2-M10PEBD3	SLP	0.058	1.65	1.594	1.476	27.618	25.568	308.33
	STP	0.058	5.43	1.381	1.353	23.700	23.216	575.00

Tabla No. 38
Resultado de pruebas de tensión-elongación
de películas de PEBD2 y PEBD3

3.1.5 Resultados de la prueba de resistencia al rasgado

CLAVE	DATOS	PROMEDIOS
PC-PEBD2	Espesor (cm)	0.039
	Máxima carga (Kgf)	0.443
	Carga específica (Kg/cm)	11.306
M10-PEBD2	Espesor (cm)	0.024
	Máxima carga (Kgf)	0.259
	Carga específica (Kg/cm)	10.953
M20-PEBD2	Espesor (cm)	0.027
	Máxima carga (Kgf)	0.306
	Carga específica (Kg/cm)	11.315
M10-PEBD3	Espesor (cm)	0.044
	Máxima carga (Kgf)	0.476
	Carga específica (Kg/cm)	10.759
M16-PEBD3	Espesor (cm)	0.037
	Máxima carga (Kgf)	0.464
	Carga específica (Kg/cm)	12.396

Tabla No. 39
Resultados de resistencia al rasgado
de películas de PEBD2 y PEBD3

3.2 Cálculo de costos de Mano de Obra Directa

Clasificación	Producción de Pellet (kg/hr)	Costo de MOD (\$Ton)	Producción de Película (kg/hr)	Costo de MOD (\$Ton)	Total costo Pellet + película (\$Ton)
L1-STPEBD2	71.34	262.84	25.08	996.81	1259.65
L1-M10PEBD2	70.32	266.63	20.53	1217.73	1484.36
L1-M20PEBD2	66.94	280.09	29.13	858.22	1138.31
L2-STPEBD3	70.03	267.74	S/R	S/R	S/R
L2-M4PEBD3	77.75	241.16	S/R	S/R	S/R
L2-M5PEBD3	68.46	273.88	S/R	S/R	S/R
L2-M10PEBD3	70.03	267.74	20.13	1242.14	1509.88
L2-M16PEBD3	64.61	290.20	22.54	1108.97	1399.18
L2-M20PEBD3	61.04	307.18	S/R	S/R	S/R

Tabla No. 40
Costo de Mano de Obra Directa de pelletización y extrusión de película

3.3 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

- El Resultado de la producción nos dice que la Mano de Obra Directa en su conjunto es menor para los tamaños de partícula de la malla 20 en el caso del PEBD2 y en el caso del PEBD3 del tamaño de partícula de la malla 16, y entre el PEBD2 y el PEBD3 el primero es con menor costo. Si pensamos en que este tamaño de partícula en el primer experimento (material PEBD2) contiene los tamaños 16 y 20 entonces podemos decir que las partículas se empaquetan y se complementan entre sí otorgando mejores propiedades físicas como podemos constatar en los resultados de las pruebas de Tensión-Elongación y de rasgado.
- Con el trabajo de tesis se demostró que el método tradicional de elevar temperaturas para producir más resulta engañoso, pues no necesariamente el costo es el mejor cuando se combinan ambos procesos de extrusión, por tanto un tamaño más homogéneo de partícula nos permite mejor productividad y reducir temperaturas de operación.
- En el caso de la producción de la película con los tamaños de partícula de las mallas 4, 5 y 20 de PEBD3 además del compactado sin tamizar de PEBD2 que no se lograron extruir con una mezcla de 45% de PEBD3+ 55% PEBD2, se puede deducir, de acuerdo a los resultados de las pruebas reológicas (índice de fluidez y viscosidad) que estos tamaños influyen en las propiedades elásticas del material de tal forma que no permiten su producción. Suena aventurado pero podría ser posible decir que si el tamaño de partícula es más grande o más pequeño que las mallas 10 y 16 entonces el material tiende a degradarse aún más.
- Por otro lado, los datos de las pruebas mecánicas, nos indican que los tamaños ideales para mejorar las propiedades mecánicas del material se encuentran entre los tamaños de partícula de las mallas 10 y 16, para el método tradicional de extrusión. Para el caso del material PEBD3 el tamaño de partícula ideal es el de la malla 16.
- Es importante recalcar que el método tradicional de mezcla del PEBD3 con el PEBD2 sin tamizar es de 20% y 80% respectivamente, por tanto si consideramos que en la mezcla de los mismos, se logró una proporción 45% y 55% respectivamente podemos concluir que si los tamaños de partícula son homogéneos y se encuentran entre los tamaños de partícula de las mallas 10 y 16 se puede utilizar con mayor facilidad el material más sucio y degradado.

3.4 OTROS PROYECTOS

- **Diseñar un sistema de compactado-molienda que permita obtener tamaños de partícula homogéneos de entre las mallas 16 y 20, para el método tradicional.**
- **Diseñar un sistema de lavado que permita darle mayor valor agregado al material PEBD3 puesto que por la contaminación del mismo su precio de venta en pellet es menor y para producción de película es más bajo en su productividad y la bolsa producida con el tiene un menor costo en el mercado.**
- **Diseño de husillo extrusor para producción de pellet con tamaño de partícula de 80 mesh.**
- **Realizar estudios de repetitibilidad y reproducibilidad de de los experimentos razón de esta tesis, para asegurar conveniencia de resultados.**

3.5 BIBLIOGRAFIA

1. RAMOS DEL VALLE L.F. Principios Básicos de Extrusión de Plásticos. Limusa. 2ª. Edición. 2000.
2. HELIODORO HERNÁNDEZ LUNA. Et. Al. Transformación de Termoplásticos, Termofijos y Reciclado. IPN-México, 1ª. Edición. 1996.
3. URIBE VELASCO MIGUEL. Et. Al. Los Polímeros-Síntesis, Caracterización, Degradación y Reología. Instituto Politécnico Nacional. 1ª. Edición. 1996.
4. INSTITUTO MEXICANO DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL. Enciclopedia del plástico 2000. Tomo I.
5. DONALD R. ASKELAND Et. Al. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Thomson. 4ª. Edición. 2005.
6. ARTHUR N.WILKINSON. Polymer processing and Structure Development. The Manchester Metropolitan University, Manchester, UK.
7. INGENIEROS EN PLÁSTICOS ASOCIADOS A.C. Proceso de Extrusión.
8. NORMA ASTM D1238-94a
9. P.J.FLORY. Principles of polymer chemistry. Cornell University press, Octava reimpresión. 1971.
10. R.M. GERMAN: Powder Metallurgy Science, Second. Edition, MPFI