

1ej 2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

**ANALISIS DE LA EXTRUSION DE TERMOPLASTICOS
A PARTIR DE MEZCLAS DE POLIETILENO DE ALTA
DENSIDAD VIRGENES Y RECICLADOS.**

**UNAM
- D.G.B.
TESIS DONADA POR**

**TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A N
OCTAVIO ALVAREZ LOPEZ
ALBERTO A. YANEZ SOTO**

MEXICO, D. F.



1987

**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ANALISIS DE LA EXTRUSION DE TERMOPLASTICOS
A PARTIR DE MEZCLAS DE POLIETILENO DE ALTA
DENSIDAD VIRGENES Y RECICLADOS

TESIS MANCOMUNADA

OCTAVIO ALVAREZ LOPEZ

ALBERTO A. YAÑEZ SOTO

INGENIERO QUIMICO

1986

JURADO ASIGNADO SEGUN EL TEMA

PRESIDENTE

PROF: JOAQUIN PALACIOS ALQUISIRA

VOCAL

PROF: CARLOS ELIAS RANGEL NAFIILE

SECRETARIO

PROF: CARLOS GUZMAN DE LAS CASAS

1er. SUPLENTE

PROF: ENRIQUE SALDIVAR GUERRA

2do. SUPLENTE

PROF: LUIS ANGEL LOPEZ LATORRE

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Departamento de Polímeros del Instituto de Investigaciones
en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de Méxi-
co.

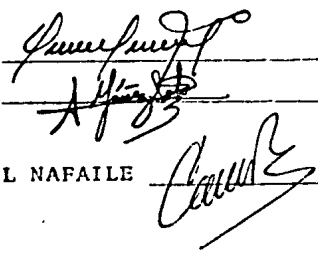
SUSTENTANTES:

OCTAVIO ALVAREZ LOPEZ

ALBERTO A. YANEZ SOTO

ASESOR DEL TEMA:

DR. CARLOS E. RANGEL NAFIILE



A MIS PADRES:

Por su preocupación en buscar una formación profesional para mí, la cual he logrado gracias a su apoyo y confianza.

A MI ESPOSA :

Por su amor, su paciencia y porque en los momentos de flaqueza ha sabido apoyarme para salir adelante.

A MI HIJO :

Que con su existencia nos ha proporcionado la felicidad más grande del mundo.

A MIS HERMANOS:

Que el solo hecho de verlos unidos, fué para mí un aliciente para buscar esta meta.

A MIS SUEGROS:

Gracias por querer mucho a mi esposa y a mi hijo.

A MIS AMIGOS:

Por comprensión y cariño.

A LA FAMILIA YAÑEZ:

Por tener la virtud de darlo todo sin esperar nada a cambio.

Deseamos agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el apoyo brindado al proyecto: MEZCLAS POLIMERICAS DE TERMOPLASTICOS. INVESTIGACION Y FORMACION DE RECURSOS HUMANOS. PCCBCNA 020839, a través del cual se pudo lograr la infraestructura e información necesaria para el desarrollo de este trabajo

Al Instituto de Investigaciones en Materiales, proporcionarnos el apoyo necesario con sus instalaciones y recursos de investigación.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

C O N T E N I D O

R E S U M E N	7
N O M E N C L A T U R A	9

I N D I C E

CAPITULO UNO

PLANTEAMIENTO A LA PROBLEMÁTICA	10
1.1 INTRODUCCION	10
1.2 OBJETIVOS	11
1.3 CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS PLASTI - COS	12

CAPITULO DOS

ANTECEDENTES	17
2.1 RESINAS POLIMERICAS	17
2.2 POLIETILENO. GENERALIDADES	18
2.3 PRODUCCION DE PEAD EN MEXICO	22
2.4 PRODUCCION DE PEAD EN AMERICA DEL NORTE- Y EUROPA OCCIDENTAL	28
2.5 VENTAJAS Y CARACTERISTICAS DEL POLIETI-- LENO	37

CAPITULO TRES

ANALISIS DE LA EXTRUSION .	
3.1 EXTRUSION. GENERALIDADES	38
3.2 EL EXTRUSOR Y LA BOQUILLA	40

3.3 DESCRIPCION MATEMATICA DEL PROCESO DE EX- TRUSION	41
3.4 CARACTERIZACION REOLOGICA DE MATERIALES VIR- GENES Y RECICLADOS	45
CAPITULO CUATRO	
ANALISIS DE INTEMPERISMO	
4.1 ENVEJECIMIENTO. GENERALIDADES	47
4.2 ACCION DE LA ACELERACION DE ENVEJECIMIENTO- ACELERADO POR MEDIO DEL INTEMPEROMETRO	49
CAPITULO CINCO	
PROPIEDADES MECANICAS DE LOS POLIMEROS	
5.1 GENERALIDADES	51
CAPITULO SEIS	
DESARROLLO EXPERIMENTAL	
6.1 COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES CON EL - MODELO TEORICO UTILIZADO	52
6.2 PREDICCION DE Q vs ΔP	56
6.3 CARACTERIZACION REOLOGICA DE MATERIALES VIR- GENES Y RECICLADOS	57
6.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE ENVEJECIMIENTO -- ACELERADO	58
6.5 PROPIEDADES MECANICAS DE LOS POLIMEROS.....	60
6.6 PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL AL RECICLADO DE - TERMOPLASTICOS	62

6.6.1 EXTRUSION DE PEAD EN DIFERENTES FORMAS FISICAS	62
6.6.4 COMPORTAMIENTO DEL EXTRUSOR CON RESINA VIRGEN, RECICLADA Y MEZCLA DE AMBAS	65

CAPITULO SIETE

DISCUSION DE RESULTADOS

7.1 COMPARACION DEL PROCESO EXPERIMENTAL CON EL MODELO DE MIDDLEMAN	68
7.2 CARACTERIZACION REOLOGICA DE MATERIALES VIRGENES Y RECICLADOS	74
7.3 ENVEJECIMIENTO	79
7.4 PROPIEDADES MECANICAS	86
7.5 EXTRUSION DE PEAD EN DIFERENTES FORMAS FISICAS	93
7.6 COMPORTAMIENTO DEL EXTRUSOR CON RESINA VIRGEN, RECICLADA Y MEZCLA DE AMBAS	101
7.7 INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y FORMA DE PARTICULA SOBRE EL PROCESO DE EXTRUSION	113

CAPITULO OCHO

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
APENDICE I	124
BIBLIOGRAFIA	133

RESUMEN

Debido a que el proceso de extrusión es el más empleado para el procesamiento de termoplásticos, el presente trabajo está destinado al análisis de extrusión combinando la factibilidad de reusar polietileno de alta densidad, como una alternativa para atacar el problema ecológico y económico ocasionado por los desechos de materiales plásticos.

Los materiales termoplásticos, que se transforman bajo el proceso de extrusión, difieren notablemente, entre sí, tanto en propiedades térmicas, como en propiedades mecánicas. Tomando esto como punto de partida y, particularizando en nuestro caso, los materiales probados en el presente trabajo, fueron muestras de polietileno de alta densidad: vírgenes, reciclados y mezclas, de ambos, utilizando diferentes tipos de partículas, no encontrándose influencia de la viscosidad del material fundido sobre el comportamiento del extrusor y sobre el flujo del mismo material a través de la boquilla usada para producir lámina ó película.

Las láminas extrudidas fueron posteriormente caracterizadas, para establecer la dependencia de sus propiedades mecánicas sobre el parámetro de mezclado y condiciones de procesamiento. Además, también se llevaron a cabo pruebas de envejecimiento acelerado, con el objeto de determinar los cam-

bios fisicoquímicos producidos en el material expuesto a ciertas condiciones ambientales. Los resultados muestran y cuantifican los cambios más importantes en todos estos parámetros, como una función del material recibido.

N O M E N C L A T U R A

E	=	Relación entre gasto másico y consumo neto de potencia
G	=	Gasto másico
N	=	Velocidad del tornillo
P	=	Consumo neto de potencia
PE	=	Polietileno
PEAD	=	Polietileno de alta densidad
PEBD	=	Polietileno de baja densidad
PP	=	Polipropileno
PS	=	Poliestireno
PVC	=	Policloruro de Vinilo
Q	=	Gasto volumétrico
QUV	=	Probador de intemperismo acelerado
R	=	Material reciclado
S	=	Indice de reducción de flujo másico
U_G	=	Coefficiente de variación del gasto y torque
V	=	Material Virgen
V/R	=	Símbolo que denota relación de la composición entre material virgen y material reciclado
ϵ	=	Relación de energía en el proceso de extrusión
Ω	=	Torque
ΔH	=	Entalpía del polímero
ΔP	=	Caída de presión

CAPITULO UNO

PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción

El hacer y el progreso, del hombre, tiene riesgos que pueden poner en peligro la salud y la convivencia entre una población que crece con una tendencia cada vez más acentuada. La contaminación se presenta en proporciones cada vez más alarmantes, provocando carencia de suficientes espacios verdes para el recreo y, sobre todo, la alteración del equilibrio hombre-naturaleza.

Los desperdicios y residuos de materiales plásticos constituyen un problema creciente al que se está intentando dar soluciones, tanto desde el punto de vista económico como ecológico.

Los desperdicios plásticos representan una fuente potencial de materias primas, en un mundo que actualmente enfrenta un incremento de dificultades en el agotamiento de sus recursos.

El análisis de la composición material de los desechos sólidos, es importante para reconocer y cuantificar, tanto los daños ambientales y la pérdida de recursos, como los niveles probables de reciclación de ciertos materiales.

La irrupción del plástico, en la vida moderna, constituye un fenómeno de indudable trascendencia. Hoy día, el ciu

dadano de cualquier país vive rodeado de objetos de plás
tico. Esta materia ha venido a substituir productos como
el vidrio, la madera, la cerámica, los metales, el algo-
dón y demás fibras naturales e, incluso, los mismos teji-
dos orgánicos.

Los plásticos tienen las ventajas de ser, en algunos
casos, más resistentes, elásticos o rígid^os, livianos, im-
permeables, no corrosivos y económicos. Los materiales -
antiguos pueden superar al plástico en alguna de sus pro-
piedades, pero ninguno podría igualarle en el conjunto de
ellas. Además tienen la enorme ventaja de que pueden fa-
bricarse programando, a voluntad, alguna de sus caracte-
rísticas.

La aplicación tecnológica actual de los termoplásti-
cos reporta que la mayor producción de su procesamiento -
se efectúa mediante su extrusión. Por lo mismo, se expli-
ca que las posibilidades que ofrece un equipo para tal -
proceso, lo tienen situado en posición de importancia -
creciente dentro de este campo (1).

1.2.- Objetivos

1° Dada la versatilidad del proceso de extrusión, -
se optó por tomar el análisis de éste como punto de par -
tida para estudiar la factibilidad de reciclar PEAD, como
una necesidad para plantear alternativas a los problemas-
ecológicos y económicos antes mencionados.

2° Determinación de la mezcla ó mezclas de material V/R que permita encontrar el comportamiento más cercano al material virgen (PEAD), mediante el análisis de propiedades mecánicas (Esfuerzo a la cedencia), pruebas de envejecimiento acelerado y el mismo análisis de extrusión.

3° En suma, el presente trabajo está destinado al análisis de EXTRUSION-RECICLADO de mezclas de termoplásticos, vírgenes y reciclados (PEAD).

4° Aunque hay una cantidad considerable de trabajos teóricos, publicados sobre el proceso de extrusión, puede decirse que aún no es posible dar una respuesta completa a muchos de los problemas de este proceso, pero sirven para ayudar a comprender, cualitativamente, las razones del por qué ocurren ciertos casos y para predecir tendencias que se manifiesten del análisis de éste trabajo.

1.3.- Clasificación de los residuos plásticos

El análisis del proceso de extrusión, utilizando material reciclado, nos lleva directamente a clasificar la procedencia de los residuos de materiales plásticos, así como la morfología de estos (2).

Tomando en cuenta su morfología, los materiales plásticos se clasifican en dos tipos:

- a) Residuos recuperables procedentes de materiales termoplásticos.
- b) Residuos no recuperables procedentes de materiales termofijos.

Según su procedencia, los residuos plásticos se clasifican en cuatro grupos:

- a) Residuos procedentes de basuras
- b) Residuos procedentes de las cavidades de moldeo en función de su diseño
- c) Residuos procedentes de piezas defectuosas, cuyo origen puede tener lugar según las condiciones del moldeo.
- d) Residuos procedentes de la puesta a régimen permanente de las máquinas.

No originar ningún desperdicio, que es la situación ideal, es una solución imposible ó, al menos, poco probable. Considerando inevitable este hecho, hay que estudiar el mejor camino para el aprovechamiento máximo de los residuos, siendo la reincorporación de los mismos a los materiales virgenes, la solución más adecuada hasta el momento.

Para decidir la reincorporación de material de desecho al producto virgen, debemos tomar en cuenta los siguientes factores:

- Tipos de material reciclado
- Características y necesidades del producto final transformado

Obviamente, el mejor camino para disponer de los desperdicios plásticos, es reciclar éstos como un nuevo material, según ya se ha mencionado. La presencia de resinas recicladas puede no únicamente reducir la demanda de Hidrocarburos (Petróleo ó gas natural) como materia prima, sino que también reduciría el -

consumo de energía necesario para producir una cantidad correspondiente de resina por polimerización.

De acuerdo a estadísticas desarrolladas por una agencia oficial del Gobierno Mexicano, en la ciudad de México los desperdicios plásticos representan únicamente el 0.4 % de la cantidad total de desperdicios recolectados anualmente. Además de la cantidad total, alrededor del 55 % corresponde al Polietileno (23 % al PEAD y 33 % al PEBD) (3).

Dado que el Polietileno de alta densidad se encuentra en una proporción considerable entre los desperdicios plásticos, se optó por tomarlo como base para este estudio.

La necesidad de abarcar dos puntos esenciales que van ligados en este estudio, llevó a investigar las fuentes principales que pueden resolver el problema de abastecimiento del material utilizado. Tales fuentes son las siguientes:

- a) Dos tiraderos de importancia en la ciudad de México:
 - 1) Santa Cruz Meyehualco (Deleg. Iztapalapa)
 - 2) Santa Fé (Deleg. Contreras).
- b) Planta procesadora de desechos sólidos cercana a la unidad Aragón, donde existe separación de la diversidad de desperdicios. Además cuentan con dos nuevos-incineradores (4).
- c) Material de desperdicio, principalmente artículos plásticos procedentes de escuelas.

Dada la dificultad que se presenta en los diferentes basureros, para la recolección y selección del material y la nula disposición que presentan las personas a su cargo, se optó por recolectar, de manera específica, el desperdicio plástico a utilizar, principalmente de procedencia escolar, siendo este un contenedor de bebidas de frutas (Figura 1.1.-)

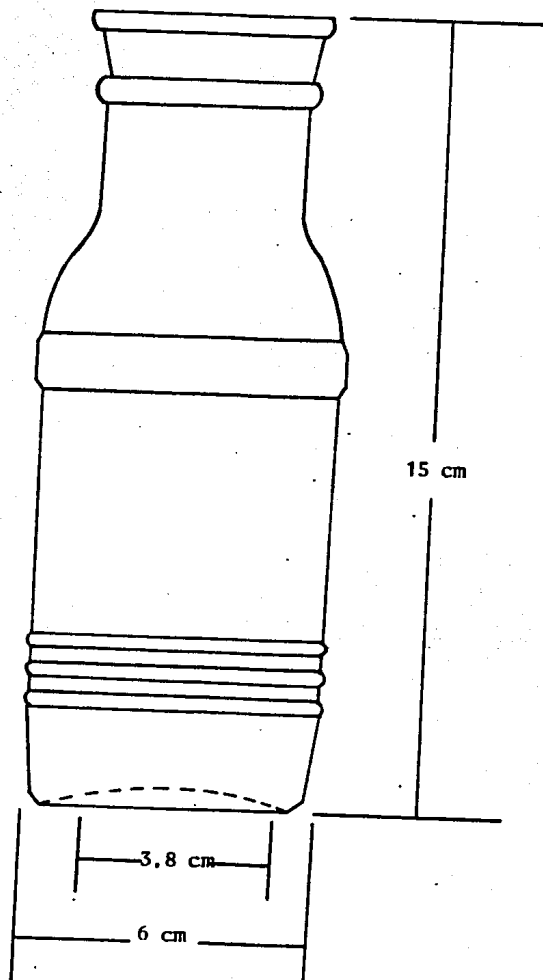


FIGURA 1.1.- CONTENEDOR DE BEBIDAS DE FRUTAS
USADO EN LA PRESENTE INVESTIGACION

CAPITULO D O S

ANTECEDENTES

2.1.- RESINAS POLIMERICAS

Los plásticos han llegado a ser los materiales más comunes de las actividades cotidianas. Se dice que los polímeros son sustancias que se obtienen sintéticamente ó por la transformación de algunos productos naturales. En esencia, son compuestos orgánicos de moléculas muy grandes, en comparación con otras sustancias y en donde existe siempre una agrupación determinada de átomos, denominada monómero, que se va repitiendo.

De manera simplificada, se clasifica a los plásticos en dos grandes grupos a saber:

- 1) Termoplásticos: son materiales, cuya principal característica es que, cuando son calentados, pueden ser moldeados bajo presión y, a diferencia de otros, pueden ser reformados y usados.
- 2) Termofijos: Contrariamente a los termoplásticos, son materiales que una vez procesados, no pueden ser vueltos a fundir, ni a readaptar formas diferentes, puesto que los calentamientos subsecuentes, a su elaboración inicial, les originan degradaciones y cambios irreversibles.

Generalmente, cualquier objeto, hecho de plástico, está constituido por un polímero base y algunos aditivos que ayudan a su manufactura ó al uso particular. Específicamente algunos ejemplos de aditivos son los estabilizadores térmicos, los antioxidantes, los colorantes, etc. De aquí que el conjunto de polímero base y aditivos, preparado para ser procesado y transformado en artículo de consumo, es descrito como resina polimérica. A manera de ejemplo se tiene el Polietileno que se vende comercialmente e incluye, al menos, un antioxidante que protege sus características, por lo menos durante su procesamiento.

P O L I E T I L E N O

GENERALIDADES:

El Polietileno es uno de los polímeros más usados en una amplia gama de productos que va desde materiales para la construcción y aislamiento eléctricos, hasta empaques de juguetes y alimentos. El polietileno cae dentro del área de materiales llamados termoplásticos y, específicamente dentro del grupo de las poliolefinas (PE, PP, PS) que son, de acuerdo a su composición bruta y estructura de su fórmula, los polímeros más sencillos, compuestos exclusivamente de átomos de carbono e hidrógeno y no contienen enlaces dobles ni anillos.

Los polímeros, con la cadena más sencilla de átomos de carbono con enlaces simples que se saturan con hidrógenos, son los polietilenos de alta y baja densidad respectivamente.

POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)

Exteriormente son materiales plásticos transparentes a opacos, con densidades comprendidas entre 0.94 a 0.96 g/cm³. La densidad de estos materiales, en el estado sólido, depende del grado de ramificaciones de la molécula producida, ya que - a menor cantidad de las mismas - se obtiene un grado de acomodamiento de las moléculas más regular, mayor densidad y además, una mayor cristalinidad del sólido.

Las zonas de reblandecimiento están comprendidas entre 128 - 135°C, y los módulos de elasticidad varían entre 7000 y 14000 kg/cm² (5).

POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (PEBD)

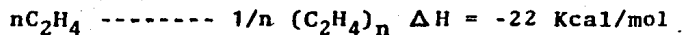
Los polietilenos de alta presión, particularmente de baja densidad, son polimerizados a elevadas presiones y sin el concurso de estabilizador. Son más transparentes que opacos; poseen densidades entre 0.91 y 0.92 g/cm³, zonas de reblandecimiento que oscilan alrededor de 110°C y sus módulos de elasticidad comprendidos entre 2000 y 4000 kg/cm² (6). Estos poseen un grado de ramificación superior a los descritos más arriba. Sus cadenas están menos ordenadas, ya que son obstaculizadas por las ramificaciones y, por tanto, su grado de cristalinidad es menor. De aquí se derivan las demás propiedades mencionadas.

PRODUCCION DE POLIETILENO

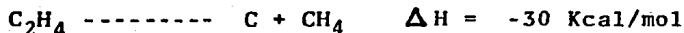
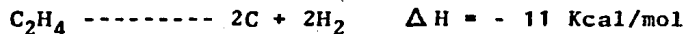
La polimerización de etileno es una reacción exotérmica, de la

cual son producidas 850 calorías por cada gramo de etileno. Esta característica hace necesario un método adecuado para remover este calor de reacción. El polietileno se descompone a altas temperaturas, siempre en ausencia de aire. Mientras, se pueden tener explosiones si la temperatura no se controla. Los productos de descomposición son Metano, Carbón e Hidrógeno. Las reacciones que toman lugar, son:

POLIMERIZACION:



DESCOMPOSICION:



Todos los polietilenos de alta densidad son hechos, en general, mediante procesos de baja presión en reactor de cama fluidizada. El catalizador está entre uno del tipo ZIEGLER, que es un complejo entre un alquilo de aluminio y un haluro de metal en transición, tal como Tetracloruro de titanio ó un catalizador de Sílica ó Sílica-Alúmina impregnado con pequeñas cantidades de un Oxido de metal, usualmente entre Oxido de Cromo y Oxido de Molibdeno. La preparación del catalizador y la activación son muy importantes. No solamente determinan la actividad ó eficiencia de la catálisis, sino también las propiedades del polímero. El peso molecular puede ser controlado por la introducción de un flujo de gas hidrógeno.

El descubrimiento de un nuevo catalizador de Titanio por Karl Ziegler, en 1953, abrió una nueva era para la polimerización de etileno a baja presión.

Existen al menos cuatro métodos para la producción de polietilenos:

- 1) El proceso de alta presión
- 2) El proceso ZIEGLER
- 3) El proceso PHILLIPS
- 4) El proceso de LA STANDARD OIL,

donde todos ellos utilizan como materia principal el gas etileno.

El proceso de altas presiones produce principalmente Polietilenos de baja densidad y de bajos pesos moleculares. El proceso ZIEGLER se emplea para manufacturar polietilenos de una densidad intermedia (0.945 g/cm^3). El caso del proceso PHILLIPS y el de LA STANDARD OIL producen polietilenos de alta densidad (mayores o iguales a 0.96 g/cm^3).

El PEAD se obtiene fundamentalmente según dos procedimientos, desde el punto de vista del catalizador: con el procedimiento ZIEGLER, en el que se utilizan como catalizador Halogenuros de Titanio, Ester de Titanio y Alquilos de Aluminio, y con el procedimiento PHILLIPS que recurre a un catalizador de Oxido de Cromo. Desde el punto de vista del procedimiento se puede hablar del proceso en solución, en suspensión y en fase gaseosa. En todos los casos se trabaja con una presión reducida inferior a las 100 barías (7).

2.3.- PRODUCCION DE PEAD EN MEXICO

Características generales:

El PEAD es un plástico de reciente producción en México (1978). El único productor es PETROLEOS MEXICANOS en su planta de Poza Rica/Veracruz, con una capacidad instalada de 100 000 ton/año.

Se inició la producción en 1978 con 3,266 tons, siendo 58,432, 66,853 y 78,058 tons en los años 1979, 1980 y 1981 respectivamente.

Durante los tres primeros años hubo problemas de producción, debido a que el catalizador, por ser importado, permanecía durante mucho tiempo en la Aduana, lo que provocaba que perdiera parte de actividad, dando bajos rendimientos. A comienzos de 1982, se resolvió este problema.

Otro problema similar había en el suministro de Etileno que también se importaba en grandes cantidades. Sin embargo, al arrancar la Planta de la Cangrejera en Veracruz, se solucionó también esta limitación. El PEAD es más rígido y tiene mejores propiedades que el PEBD. Según la tendencia del mercado internacional, incrementará su participación en el mercado del moldeo por soplado y, en algunos casos, por moldeo de inyección.

En 1981 ocupó el tercer lugar, con el propileno en el consumo de resinas sintéticas en México con el 10.9 %.

Para 1982, la producción llegó a 78,237 tons. Se incrementó ligeramente respecto al año anterior. En 1983, se produjeron 82,202 toneladas que representan un aumento del 5 %, mientras que su participación, en el consumo total de resinas, fue de 17.56 % (8).

COMERCIO EXTERIOR

Las importaciones fueron el único medio de oferta de PEAD hasta fines de 1978, cuando comenzó a funcionar la Planta de PEMEX. Hasta dicho año crecieron a una tasa de 18.3 % anual para luego comenzar a decrecer: en 1981 se importaron 23,819 tons, en 1982 se importaron 25,238 tons y en 1983 llegó a 63,735 tons, teniendo un incremento en más de 150 %, debido principalmente al crecimiento de la demanda.

Las empresas de EUA que exportan a México son:

GULF OIL / CITIES SERVICE / UNION CARBIDE / EXXON / y
DOW CHEMICAL. (9)

CONSUMO APARENTE DEL PEAD

Entre 1970 y 1981 creció con una tasa de 19.24 %, promedio anual, pasando de 14,968 tons a 101,877 tons. En 1981 declinó el 7 % respecto a 1980. En 1982, el consumo aparente fue de 103,475 tons, para 1983, 145,937 tons, teniendo un crecimiento del 2 % y 4 % respectivamente (10).

U S O S

El PEAD encuentra sus principales aplicaciones en la producción de:

- Cajas
- Empaques
- Botellas
- Artículos del hogar
- Juguetes
- Cable
- Película

PERSPECTIVAS

Si la planta de Morelos/Veracruz, arranca a mediados de 1986, se agregará una capacidad de 100,000 tons. Funcionando las dos plantas, Morelos y Poza Rica al 90 % de su capacidad, se tendrá una producción alrededor de 180,000 tons/año hacia 1987 y así se alcanzaría la autosuficiencia.

Se considera que un pronóstico de consumo aparente hacia 1987 es de 198,500 tons, siendo las importaciones solamente 18,600 tons.

Se cree que de seguir la tendencia observada en otros países, el PEAD incrementaría su participación en el mercado de moldeo por soplado y por inyección (11).

MIL DE
TONELADAS

P E A D

PRODUCCION E IMPORTACION

AÑOS 1978-1983 ESTIMADO 1984 Y PRONOSTICO 1987 --

MEXICO (12)

200

150

100

50



PRODUCCION



IMPORTACIONES

1978

1979

1980

1981

1982

1983

1984

1987

AÑO

GRAFICA 2.1.-

MILES DE
TONELADAS

P E A D

PRODUCCION E IMPORTACION

AÑOS 1978 - 1983, ESTIMADO 1984

MEXICO (13)

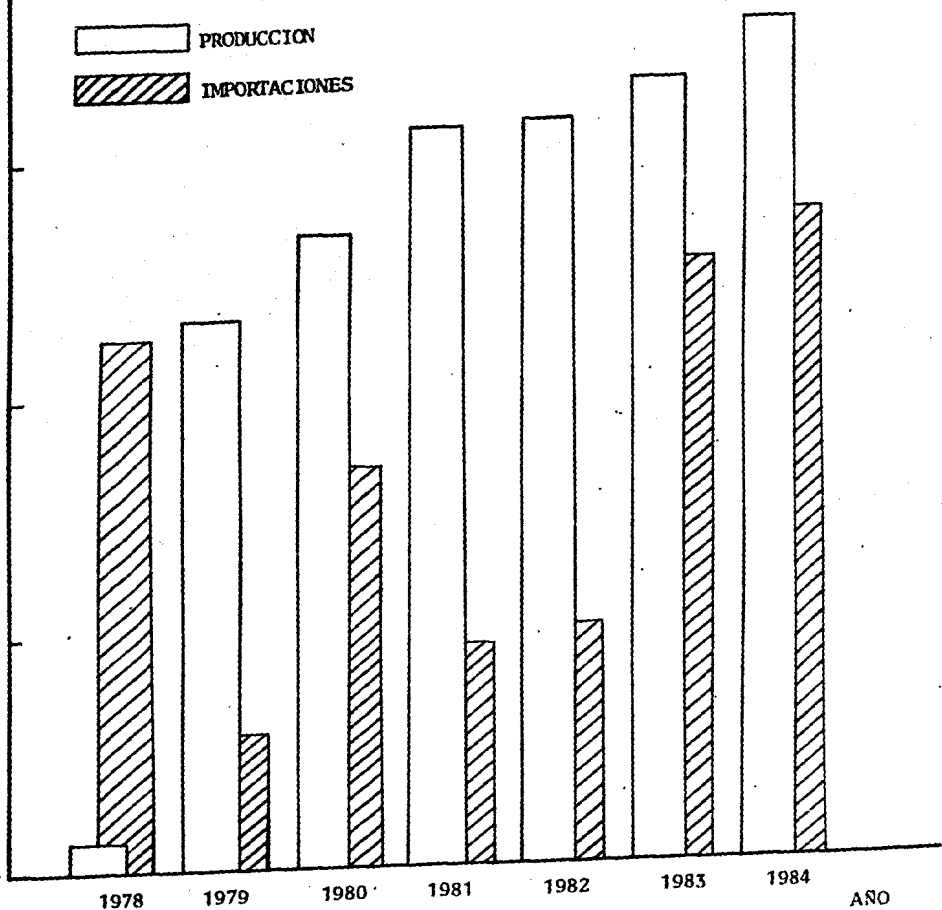
100

75

50

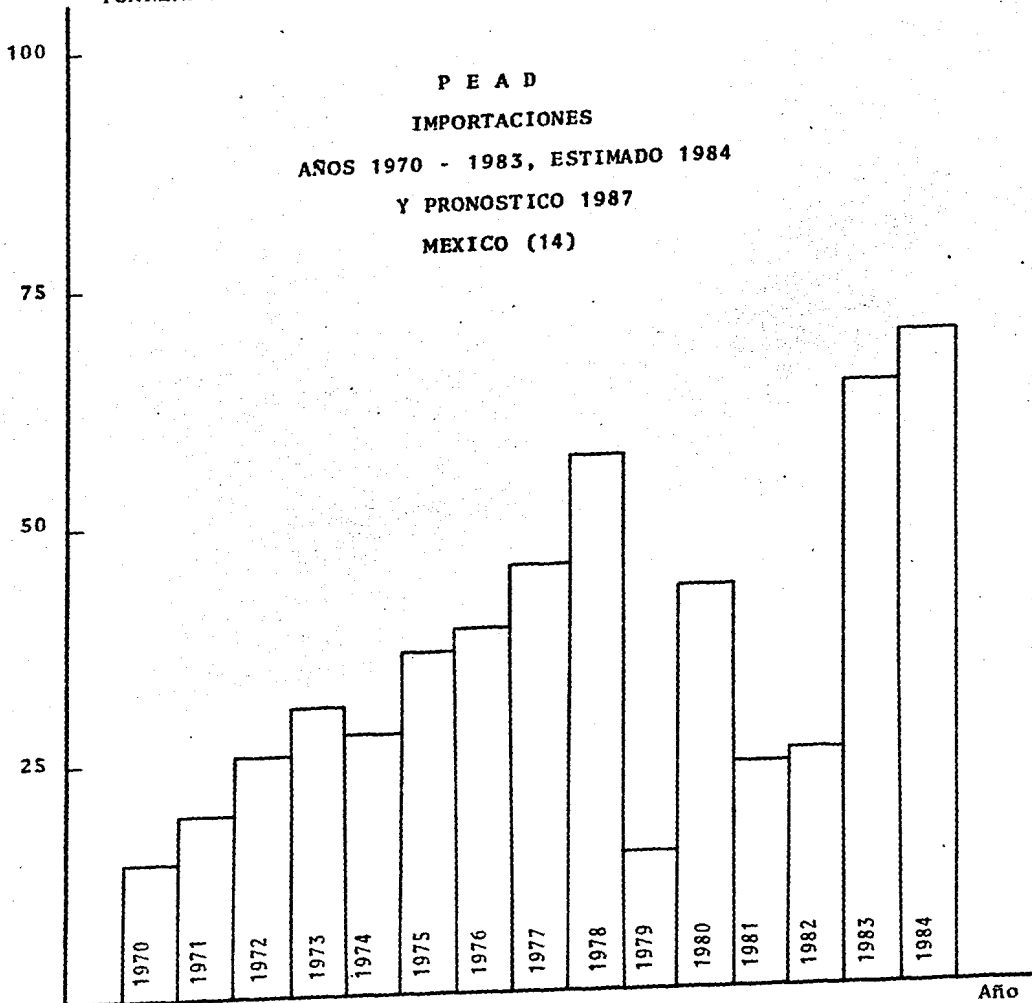
25

PRODUCCION
IMPORTACIONES



GRAFICA 2.2.-

MILES DE
TONELADAS

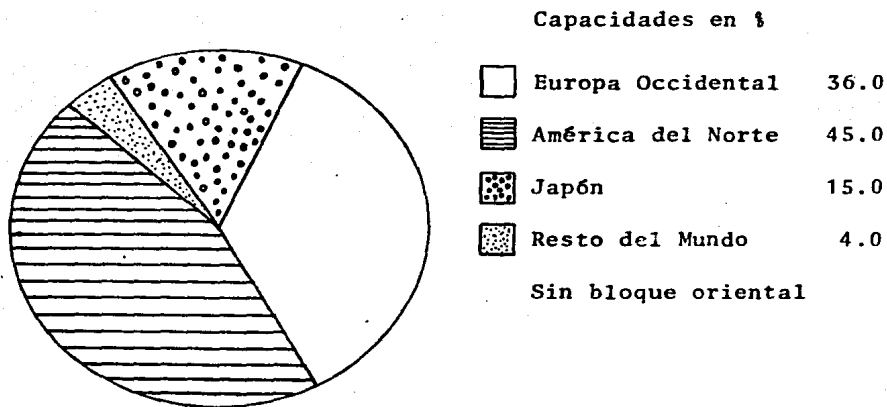


GRAFICA 2.3.-

2.4.- MERCADO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD EN AMERICA DEL NORTE Y EUROPA OCCIDENTAL.

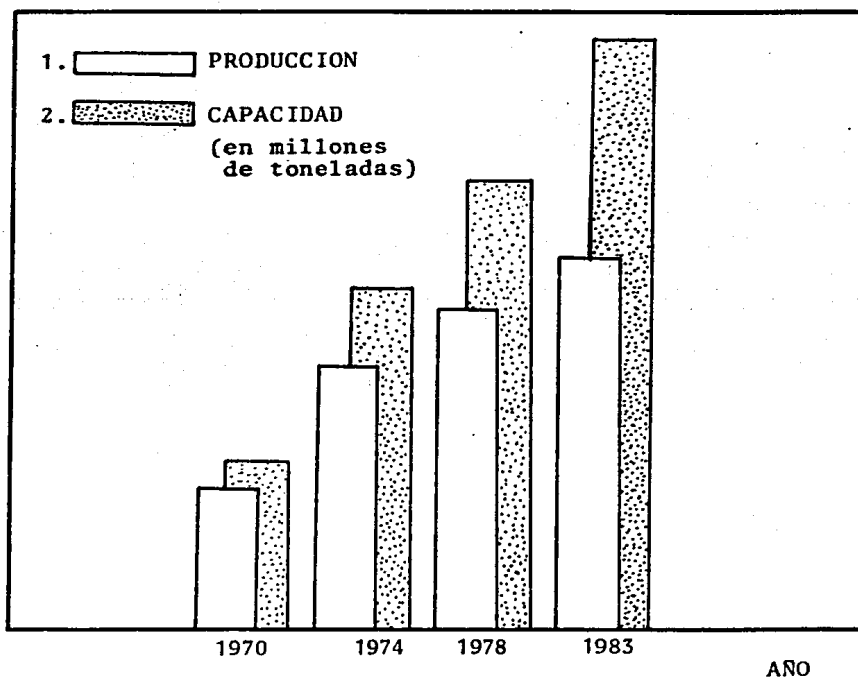
Capacidad de Producción

Las capacidades de producción de Polietileno de baja presión suman, a escala mundial, 6.15 millones de toneladas. En estas cifras no están contenidas las capacidades del bloque oriental. Aproximadamente el 36 % de la capacidad de PEAD está instalado en países de Europa Occidental. El 45 % aproximadamente, corresponde a America del Norte y el 15 % al Japón. Un aspecto de esto se aprecia en la gráfica circular 2.4.-:



GRAFICA 2.4.- CAPACIDAD MUNDIAL DE PEAD POR REGIONES

La ocupación de las capacidades empeoró en los últimos años para la industria productora de materiales plásticos, como se puede observar en la Gráfica 2.5.- - En 1978 se alcanzó una ocupación del 72 %. Incluso admitiendo que las posibilidades de producción reales se fijan en una media anual del 85 % de las capacidades nominales, se llega a un resultado poco satisfactorio.

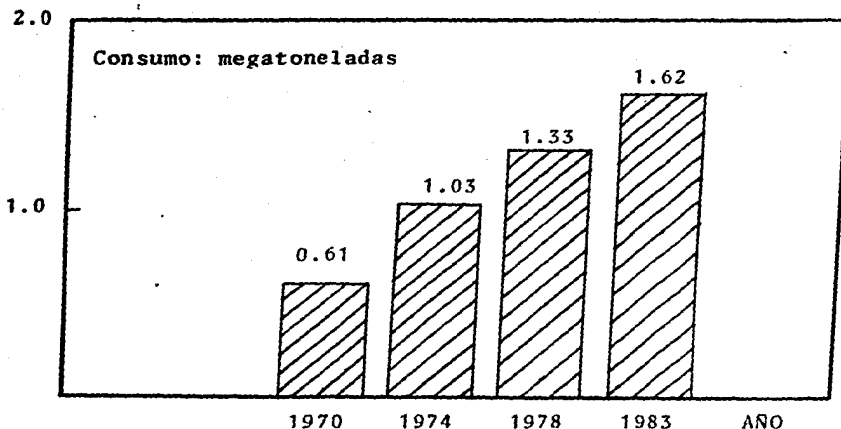


GRAFICA 2.5.-

CAPACIDAD Y PRODUCCION DE PEAD EN EUROPA OCCIDENTAL (1970 - 1983).

C O N S U M O

El consumo de PEAD, en Europa Occidental, alcanzó en 1978, 1.33 millones de toneladas aproximadamente, lo que representa un aumento de 65.000 toneladas ó del 5 %, correlación a 1977. En 1977 se registró la misma tasa de crecimiento. Esto significa que el crecimiento entre 1970 y 1974 alcanzó una media anual del 6.5 % entre 1974 y 1978. El fuerte descenso de 8 % del año de 1975 se compensó nuevamente en el año siguiente. Sobre esta base tuvo después un crecimiento relativamente continuo en los años siguientes. Por lo tanto parece que los próximos años también darán lugar a un crecimiento de este orden en magnitud. Lo anterior se puede apreciar claramente en la Gráfica 2.6.-:



GRAFICA 2.6.- CONSUMO DE PEAD EN EUROPA OCCIDENTAL (15)

La estructura del consumo regional de PEAD apenas varió en los últimos 10 años, como se aprecia en la siguiente tabla (2.4.1.-)

PAIS	CONSUMO PER CAPITA		PARTICIPACION EN EL
	-----		CONSUMO TOTAL (en %)
-----	1970	1978	1 9 7 8
República Federal de Alemania	3.5	6.1	28
Francia	1.5	3.5	14
Italia	1.3	2.2	9
Gran Bretaña	1.0	2.6	11
Bélgica	2.1	4.1	4
Países Bajos	2.1	4.1	4
Austria	1.9	4.2	2
España	0.9	3.2	9
Escandinavia	3.2	5.7	9

Casi el 70 % del Polietileno de baja presión se transforma en embalajes en el sentido más amplio. De ellos, el 40 % - aproximadamente corresponde a cuerpos huecos como botellas, - recipientes grandes y bidones, y el 25 % aproximadamente a recipientes inyectados como cajas, tapas, etc., observándose esta distribución en la Tabla 2.4.2.- (16):

TABLA 2.4.2.-

Transformación/Aplicación	Participación en el consumo en %
Inyección	38
Envases	25
Usos domésticos	9
Varios	4
Extrusión	20
Láminas y Planchas	7
Tubos	7
Varios	6
Soplado	40
Recipientes	39
Varios	1
Otros sistemas de transformación	1
Total	100

COMERCIO EXTERIOR

Las exportaciones de Europa Occidental alcanzaron en 1978 las 3,000 toneladas aproximadamente. Así aumentaron un 8 % con relación a 1977. Las exportaciones de los E.E.U.U. también aumentaron considerablemente en 1978 y alcanzaron un volúmen de 217,000 toneladas con un aumento del 12 % aproximadamente. Por el contrario, los Japoneses se contuvieron y redujeron su volúmen de exportación en un 10 %.

Los Canadienses aparecieron por primera vez en los mercados de exportación con volúmenes importantes. Dado, sin embargo, que la estadística de comercio exterior canadiense sólo registra la posición del polietileno, no es posible actualmente indicar para este país, una cifra de exportación.

Las exportaciones de estas tres zonas de producción se hicieron, casi exclusivamente, a países del tercer mundo. Los Americanos dominaron en América Central y del Sur, así como en el Lejano Oriente, donde ampliaron considerablemente su posición en los últimos años.

Las exportaciones de Europa Occidental poseen, por el contrario, una gran dispersión. La mayor parte se exportó a África, pero las cantidades exportadas a América Central y del Sur, así como a Asia, oscilaron entre el 16 y 20 %. Esto se puede apreciar en la Tabla 2.4.3.- (17)

TABLA 2.4.3.-

Exportaciones a terceros países desde Europa Occidental	Cantidad exportada 1978	Valoración al año presente %
Europa Occidental	300,000 tons	+ 8
E.E.U.U.	217,000 tons	+12
Japón	178,000 tons	-10
Total	695,000 tons	+ 4

TABLA 2.4.4.-

COMERCIO EXTERIOR DE PEAD ENTRE LAS REGIONES MAS IMPORTANTES
EN :

Exportaciones a:	Exportaciones de:		
	EE.UU.	Japón	Europa Occ.
Europa Occidental	11	2	--
Europa Oriental	--	-	14
Africa	--	-	27
Oriente Próximo y Medio	4	10	17
Lejano Oriente	21	85	16
América del Norte	14	--	6
América Central y del Sur	49	2	20
Oceania	1	1	--
Total	100	100	100

PRONOSTICO A MEDIO PLAZO

El polietileno de baja presión también formará parte, en los próximos años, de los materiales plásticos de mayor crecimiento. Si bien no se alcanzarán las tasas de crecimiento del polipropileno, éstas serán más altas que las del PVC, PEBD y PS. Por otra parte, las aplicaciones del PEAD están muy ligadas al consumo, de modo que el desarrollo de este producto no puede ser analizado sin conexión con el crecimiento del producto social bruto.

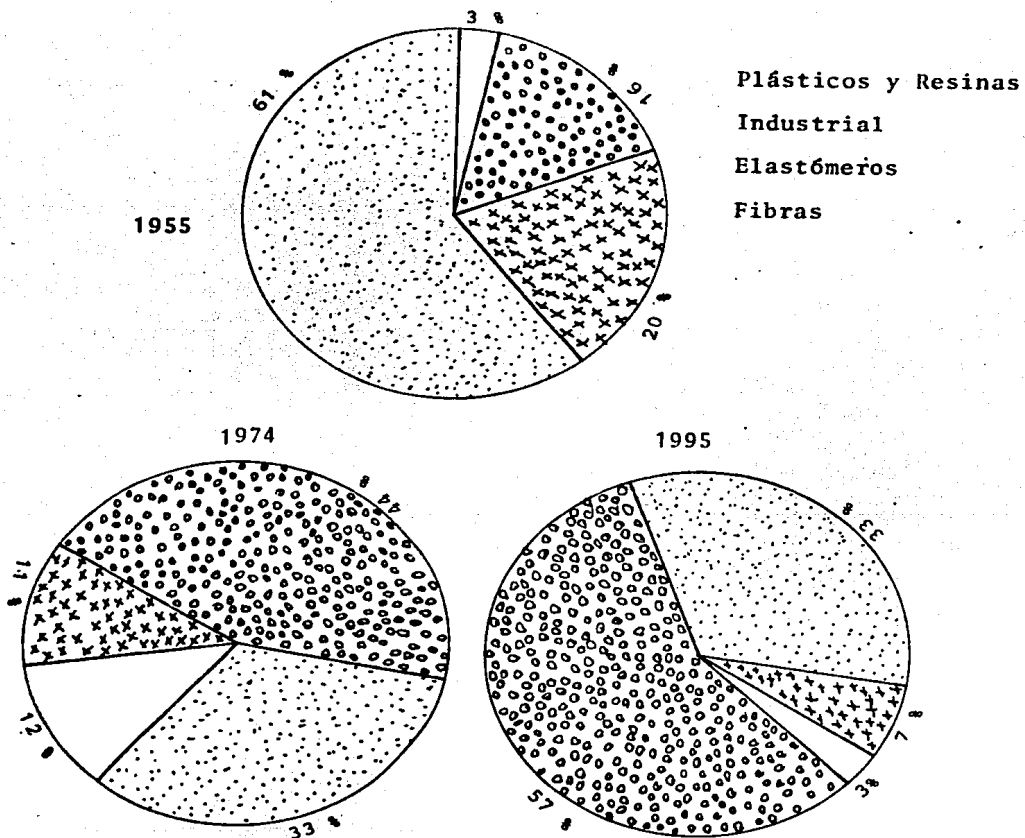
Para las láminas análogas a papel de PEAD, de elevado peso molecular, así como para los cuerpos soplados huecos con una -

capacidad superior a 10 litros y para los tubos de presión y de canalización de PEAD, se prevén tasas de crecimiento interesantes.

El crecimiento del mercado de Europa Occidental para artículos inyectables, cuerpos huecos y pequeñas cintas de lámina y monofilamentos, se desarrollará de forma distinta regionalmente, ya que algunas regiones todavía poseen un mercado limitado para estas aplicaciones.

GRAFICA 2.7.-

RELACION ENTRE EL PASADO Y FUTURO ENTRE PLASTICOS Y OTROS PRODUCTOS QUIMICOS (18)



2.5.- VENTAJAS Y CARACTERISTICAS DEL POLIETILENO

Afortunadamente, los materiales termoplásticos forman el grueso de los materiales plásticos urbanos (80 %) y califican, para procesos industriales simples de reutilización, como resultado de sus propiedades al ser manufacturados. En la medida, en que su degradación sea evitada, los termoplásticos, recuperados de los desechos, pueden volver a tratarse térmicamente y fundirlos y en ausencia de elementos contaminantes (tierra, pa pel, metales, etc.) pueden ser reprocesados para producir productos útiles con propiedades mecánicas comparativamente aceptables.

La diferencia de propiedades que presenta el material reciclado con respecto al virgen, puede ser poco considerable, por lo que, en los mismos, se podría usar como materia prima, para elaborar la mayoría de los productos que se procesan con la resina virgen.

El PEAD como materia prima, puede tener un gran número de aplicaciones para nuevos artículos de consumo masivo, tales como: tuberías, contenedores de bebidas, juguetes, accesorios pa ra plomería, etc., los cuales están teniendo una gran demanda, por lo tanto, podría ser potencialmente una resina reciclable.

CAPITULO T R E S

III.- ANALISIS DE LA EXTRUSION

3.1.- EXTRUSION

G E N E R A L I D A D E S

El proceso de extrusión es un proceso continuo, con el cual, forzando un material fundido a través de una boquilla, se obtiene un producto de configuración definida. Aunque sus orígenes se remontan hacia mediados del siglo pasado, ha sido en los últimos 30 años, cuando se han logrado avances muy significativos en lo que se refiere a la tecnología de su diseño y funcionamiento para lograr productividad y calidad en los productos extrudidos.

Las aportaciones tecnológicas más sobresalientes se han desarrollado en Alemania, Inglaterra, Estados Unidos e Italia, países que aún continúan manteniéndose en primer plano, en lo que respecta al dominio de este proceso de transformación de termoplásticos.

La aplicación tecnológica actual de los termoplásticos, reporta que la mayor producción de su procesamiento se efectúa mediante su extrusión (Anguita 1977, Vol. 1). Por lo mismo se explica que las posibilidades que ofrece un equipo para tal -- proceso, lo tienen situado en posición de importancia creciente dentro de este campo. Este es uno de los principales moti-

vos, por el cuál se analiza el proceso de extrusión.

Como se mencionó anteriormente, la conversión de un material plástico, en un producto de determinada configuración, se hace forzando ese material ya fundido a través de un orificio ó dado, bajo condiciones controladas. Para ello es necesario cumplir ciertos requisitos, tanto de equipo como de materia prima. El equipo debe ser capaz de proporcionar suficiente presión sobre el material en forma contnua y uniforme y poseer los medios necesarios para reblandecerlo y hacerlo procesable. Asimismo, el material debe comportarse de tal manera que, cuando llegue a un cierto estado de fluidez, pueda fluir bajo presión y solidificar cuando cambién sus condiciones de procesamiento. Las maquinas de extrusión consisten de un husillo de forma especial que gira dentro de un cilindro ó barril calentado, en el cual se tiene una abertura tangencial ó radial en un extremo y una abertura axial en el otro. Entre el extremo final del husillo y el dado, se localiza una restricción en forma de placa, provista de un -- gran número de perforaciones que se conoce con el nombre de placa porta mallas, que produce un gradiente de presión a lo largo del husillo. Este toma el material en la abertura de alimentación, lo transporta a lo largo del cilindro calentado y lo compacta -- contra la placa porta mallas, efectuándose así un incremento de -- presión. Durante este período es forzado y puesto en contacto -- con las paredes calientes del cilindro y sometido, a la vez, a -- esfuerzos cortantes, de tal manera que también se logra un calentamiento por fricción. Los efectos combinados del barril caliente y del calor, debido a la fricción interna, provoca que el termoplástico se suavice y se funda para que pueda ser forzado a --

través de la restricción del dado de extrusión para llegar a obtener la forma deseada del producto (19).

3.2.- EL EXTRUSOR

El extrusor es una de las máquinas más versátiles de la Industria transformadora de plásticos. En este equipo, el polímero sólido que se alimenta por la tolva, se mueve bajo la influencia de la gravedad hacia la garganta de alimentación, donde seguidamente se le transporta hacia el interior del barril, por la acción rotatoria del tornillo. Desde esta región, el polímero sólido se funde, homogeniza y finalmente se bombea a través de la boquilla a alta presión y temperatura, trabajando así eficientemente como un intercambiador de calor y un dispositivo de mezclado. Con estas condiciones, el extrusor cumple su objetivo entregando el material fundido para la transportación subsecuente en su acabado (20).

3.2.1.- LA BOQUILLA

Es la pieza fundamental de la extrusora para conformar el material plástico al perfil deseado. En la boquilla, el material fundido es conformado y adquiere una forma muy aproximada al perfil definitivo, es decir, la boquilla solamente determina las dimensiones del material extruído que son perpendiculares a la dirección de flujo. En la mayor parte de los casos, la sección transversal del perfil extruído no es igual, ni incluso similar al perfil geométrico del orificio de la boquilla y sólo se exceptúan de este comportamiento los perfiles más simples, -

tales como los usados para recubrimientos de alambre, extrusión de varillas y extrusión de placas (21).

3.3.- DESCRIPCION MATEMATICA DEL PROCESO DE EXTRUSION

Introducción

Para el análisis de una operación de extrusión bien controlada, se necesita empezar con las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía y de su solución. Después de especificar las condiciones al problema, se podrán obtener conclusiones sobre el comportamiento de dicha operación, principalmente sobre las características de volumen de material producido en la unidad de tiempo (gasto) de la presión generada en su operación, -- del efecto de la temperatura y de la energía involucrada en el proceso. Subsecuentemente, la operación del sistema se limitará a mantener las condiciones, bajo las cuales el diseño se llevó a cabo. Desde luego se sabe la limitación de que

- 1) ningún proceso de extrusión es isotérmico y
- 2) que el resultado de este análisis desprecia los efectos de los esfuerzos normales generados durante el flujo del polímero.

Estos últimos son responsables del hinchamiento del polímero - procesado, pudiendo en sí alterar las dimensiones deseadas de la película. No obstante, cabe decir que con los resultados derivados, con el siguiente análisis se tienen probabilidades de hasta un 80 % de lograr operación deseada y el diseño útil de la boquilla para el sistema.

Bajo circunstancias prácticas, la extrusión - usualmente - involucra un polímero fundido bajo condiciones no isotérmicas. En modelos desarrollados para el estudio del proceso de extrusión, es común iniciar con un caso simple, normalmente EXTRUSION ISOTERMICO NEWTONIANA. Una simplificación geométrica hace posible tratar analíticamente este caso. Se obtiene una teoría simplificada que nos sirve como base para comparación de subsecuentes modificaciones a la teoría (22).

La simplificación geométrica da principio, desenrollando el canal helicoidal sobre el tornillo, como se muestra en la Figura 3.1.- El movimiento relativo del tornillo y del barril equivale al movimiento estacionario de un plano, a un ángulo θ , con respecto al eje helicoidal Z. Así, un flujo de arrastre es generado con componentes en las direcciones X y Z.

Las ecuaciones dinámicas, en las direcciones X y Z, serán escritas, suponiendo que el término inercial no es importante. - Esto es una suposición razonable en fluidos altamente viscosos. Para estado estacionario escribimos:

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} \right) \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

$$U_z = U \cos \theta - \pi D N \cos \theta \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

$$U_x = U \sin \theta - \pi D N \sin \theta \quad \text{-----} \quad (3.4)$$

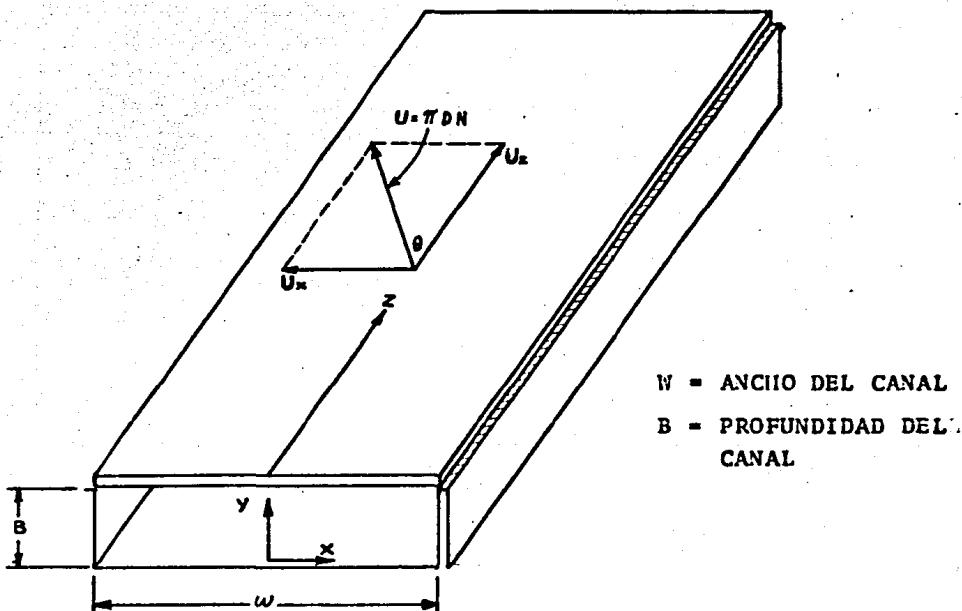


FIGURA 3.1 DESENROLLAMIENTO DEL CANAL HELICOIDAL SOBRE EL TORNILLO. LA SUPERFICIE SUPERIOR REPRESENTA EL BARRIL, QUE SE MUEVE A UN ANGULO θ CON RESPECTO AL EJE HELICOIDAL Y CAUSA UN FLUJO HACIA ABAJO DEL CANAL (U_z), ASI COMO TAMBIEN UN FLUJO TRANSVERSAL (U_x)

Suponiendo que la geometría del tornillo, en la dirección z , es uniforme y que u_z no es una función de z . El gradiente de presión es reemplazado por un valor constante:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\Delta P}{z} \quad \text{-----} \quad (3.5)$$

donde P es la caída de presión a través del extrusor y Z , la longitud del helicoide.

La ecuación 3.2 es idéntica a la tratada para un flujo en un ducto rectangular. Las condiciones a la frontera incluyen $U_z = U \cos \theta$ a $y = B$. Así tenemos un caso de presión combinada y flujo de arrastre en la dirección z , y, tomando en cuenta que el fluido es newtoniano, podemos simplificar superponiendo las soluciones dadas para flujo volumétrico, tanto en un ducto como en un canal rectaneular:

$$Q = \frac{W B^3 \Delta P}{12 L} F_p \quad (3.6) \quad \text{y} \quad Q = 1/2 U B W F_d \quad (3.7)$$

Obteniendo:

$$Q = 1/2 U B W F_d - \frac{W B^3}{12 L} \Delta P F_p \quad \text{donde} \quad (3.8)$$

$$U = U \cos \theta$$

Nótese que el flujo de presión es un flujo de retroceso, opuesto al flujo de arrastre. En muchos extrusores, el tornillo tiene una relación W/B grande como consecuencia de que F_d y F_p son cercanos a la unidad.

F_d y F_p = factores geométricos dados por una serie infinita como una relación de la función W/B ,

3.4.- CARACTERIZACION REOLOGICA DE MATERIALES VIRGENES Y RECICLADOS.

Introduccion:

La reología se define como la ciencia de la deformación y el flujo de materia.

Se dice que un cuerpo es deformado, cuando la aplicación de un sistema de fuerzas adecuado cambia la forma y el tamaño del mismo. Se dice que el cuerpo fluye, si su grado de deformación cambia continuamente.

Desde el punto de vista fundamental ó básico, los objetivos de la reología son: por un lado, desarrollar técnicas que permitan establecer experimentalmente las relaciones de comportamiento de un material y, por otro, sin lugar a duda el más importante, el establecimiento de relaciones entre esfuerzos y deformación, capaces de explicar el comportamiento de materiales complejos. Estas relaciones reciben el nombre de ecuaciones constitutivas.

Dos de las primeras ecuaciones reológicas fueron la ley de Hooke (1676), la cuál representa el comportamiento de un sólido completamente elástico, y la ley de la viscosidad de Newton (1686) que representa el comportamiento del llamado fluido viscoso de Newton. A partir de estas dos relaciones

y de las ecuaciones de la mecánica clásica derivaron la teoría de la elasticidad y la teoría de la mecánica de los fluidos, - dos áreas que cubren un gran número de aplicaciones. Sin embargo, entre el sólido de Hooke y el fluido de Newton existe una enorme gama de materiales, los cuales exhiben un comportamiento que es una mezcla de las condiciones elástica y viscosa. -- Debido a la importancia industrial que tienen estos materiales en la actualidad (en particular debido al crecimiento del área de polímeros sintéticos), la reología ha adquirido el papel relevante que tiene actualmente.

Además de su importancia teórica, la reología tiene una gran aplicación práctica. En casi todas las ramas de la industria metalúrgica, del vidrio, del concreto, de los plásticos, - alimenticia y otras, se encuentran problemas de diseño de equipo para transportar, procesar ó transformar sustancias que no se ajustan a los modelos clásicos del comportamiento de un material. Como ejemplo podemos citar: fabricación y moldeo de vidrio, fabricación y operaciones de procesamiento de polímeros, procesamiento de materiales en la industria alimenticia, fabricación de pinturas, materiales como aceite y grasas lubricantes, suspensiones de pulpa de celulosa, lodos de perforación, etc.

El conocimiento de las relaciones existentes entre el esfuerzo y la deformación para este tipo de materiales, es un -- elemento importante para el diseño eficiente de equipo de proceso, así como para poder predecir el comportamiento de un material bajo condiciones de esfuerzo y deformación dadas (23).

CAPITULO C U A T R O

4.1.- ANALISIS DE INTEMPERISMO

GENERALIDADES

Ningún material es ni inmutable ni perenne, una vez que es puesto en servicio. Por ejemplo, el proceso de corrosión en los metales tiene su contraparte en los materiales poliméricos. En los plásticos, el proceso de envejecimiento, por condiciones ambientales, es el resultado de la exposición de este tipo de material a condiciones, bajo las cuales la oxidación térmica y la foto-oxidación pueden actuar simultáneamente, junto con los efectos de la humedad, abrasión y contaminación atmosférica (24).

En el caso del envejecimiento del polietileno, las fisuras superficiales ó grietas, el estado quebradizo del material y la decoloración aparecen normalmente para un estado avanzado de envejecimiento ó degradación. Para este proceso de envejecimiento, polímero oxidado, bióxido de carbono y agua son los residuos principales del proceso.

Las fallas prematuras de los materiales plásticos y de hule, usados en exteriores, revelan el efecto tan severo de la luz UV en presencia de oxígeno, lo cual propicia principalmente su envejecimiento.

Aunque los mecanismos de envejecimiento pueden ser muy diversos, es posible indicar de manera cualitativa qué es -

lo que pasa. El hecho es que la energía radiada por el sol, en su espectro visible y del cercano UV, es capaz de romper enlaces C=O, C-C y C-H con el consecuente abatimiento de propiedades mecánicas y eléctricas en el material (25).

En general, todos los polímeros envejecen con una rapidez significativa, si no se toman las medidas para utilizarlos. Muy razonablemente diseñadores y consumidores buscan información confiable sobre la durabilidad de los materiales que se emplean.

Es, por eso, imperiosa la necesidad de saber - de antemano - el comportamiento que mostrarán los materiales al intemperismo en períodos largos de exposición. Esto significa que los materiales deberían someterse a pruebas de exposición natural para evaluar el resultado de la resistencia del material al envejecimiento. Este procedimiento, aparte de ser impráctico, está sujeto a resultados no confiables, debido a la gran cantidad de variación, en intensidades, de los factores que intervienen y en el poco control que se puede ejercer sobre el experimento. Todo esto conduce a conclusiones de escaso valor estadístico. Para solucionar este problema, alrededor del año de 1950, se diseñaron aparatos que aceleran el envejecimiento natural, ó sea, que provocan un envejecimiento acelerado, de tal forma que los resultados degradativos que se obtienen, son generados en un tiempo razonablemente corto. Estos aparatos poseen la ventaja colateral de ser operados con alto grado de control y así generan resultados con valor estadístico.

Este tipo de experimentación también permite una retroalimentación relativamente rápida que tiende a mejorar el diseño molecular, la formulación, el procesamiento y las propiedades de cada material polimérico que se estudie. A los aparatos, diseñados con este propósito, se les conoce en el mercado bajo el nombre de INTEMPEROMETROS.

4.2.- ACELERACION DE LA ACCION DE ENVEJECIMIENTO POR MEDIO DEL INTEMPEROMETRO.

El principio de envejecimiento está basado en que las propiedades de los materiales se ven afectadas por la acción de variables atmosféricas, del medio ambiente, que actúan sobre el material en ciclos cortos intensivos e intermitentes.

La experiencia ha demostrado que cuando la aplicación de esos esfuerzos se efectúa durante periodos largos, permite que las moléculas del polímero se relajen. Si el tiempo de exposición es relativamente corto, las moléculas tienden a dislocarse, dando como resultado fracturas internas que repercuten sobre el comportamiento externo y las propiedades del material que sufre un detrimento respecto a su valor original (26).

En el intemperómetro es posible controlar las frecuencias de las exposiciones, teniendo como resultado que el material se contraiga, se alargue, etc. durante cortos tiempos programados, de tal manera que se asemeje - en forma acelerada - a los procesos que se verifican lentamente en la naturaleza.

La experiencia ha demostrado que el grado de correlación entre el envejecimiento natural y el acelerado, cuando este es factible, depende del material en particular y de la propiedad específica en estudio, Así se tiene por ejemplo que para el caso del PEAD en las pruebas de tracción, 100 horas de intemperismo corresponden a un año de exposición natural (27).

CAPITULO C I N C O

PROPIEDADES MECANICAS DE LOS POLIMEROS -

5.1.- GENERALIDADES

El comportamiento mecánico de los materiales está relacionado con las respuestas de los mismos, cuando se le somete a esfuerzos de tensión, compresión ó de corte, ó bien, a una combinación de dos ó más de ellas.

Dependiendo de la aplicación que se le quiera dar a cualquier material, es importante conocer sus características limitantes ó los intervalos de aplicación, dentro de los cuales el material no sufre fallas catastróficas. Esto permite obtener la mayor utilidad del mismo.

La necesidad de utilizar los materiales, bajo situaciones de carga muy complejos y arbitrarios, ha determinado la necesidad de caracterizarlos bajo diferentes pruebas que se conocen como pruebas de tensión, resistencia a la cedencia, impacto, dureza, fatiga, flexión, ductibilidad etc.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA.**

CAPITULO S E I S

DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1.- COMPARACION DE DATOS EXPERIMENTALES CON EL MODELO TEORICO UTILIZADO PARA EL PROCESO DE EXTRUSION.

El extrusor, empleado en esta investigación, es el modelo RHEOMEX 254 de la compañía HAAKE de un husillo simple, con un -- diámetro de barril de 0.01905 m, con profundidad de canal constante y $L/D = 25:1$. Este equipo consta de tres zonas de calentamiento que son también enfriadas por aire, accionadas por controles de temperatura de acción electrónica para su apagado y encendido..

Acoplado al extrusor, se posicionó una boquilla para formar placas de 0.1 mm de ancho y con separación entre sus labios de 0.0115 cm.

Un diagrama esquemático de ambos aparatos se presenta en las figuras 6,1 y 6,2 respectivamente.

Con objeto de tener una visión general de los cambios en el desarrollo del proceso de extrusión, cinco mezclas fueron -- usadas con diferentes relaciones en peso de material virgen y reciclado. Las mezclas incluidas fueron: 0, 25, 50, 75 y 100 % de material reciclado.

Bajo un conjunto bien determinado de condiciones, se hicieron experimentos en las que se extruyó las resinas a una tem

peratura de 190°C, a través de una boquilla especial para cinta, a velocidades de 32, 64 y 100 RPM. El perfil de temperaturas para todos los experimentos, fué de 196-196-190-190°C, que incluía las tres zonas de calentamiento del extrusor y la boquilla respectivamente.

En estos experimentos, el equipo donde se recibía y enfriaba la cinta de polietileno extruído, consistió en un canal de 12 cm de ancho, inclinado 45° sobre el cual fluía la película por simple gravedad, y una corriente de aire a la salida de la boquilla ayudó a separar el polímero extruído de las superficies del metal, sobre las que pudiera pegarse.

El extrusor se operó por un mínimo de 30 min. bajo condiciones estables, para garantizar su operación, a régimen permanente, después de lo cual se procedió a tomar las medidas de flujo másico, colectando varias muestras que se extruyeron por unidad de tiempo (min.), esperando para tomar cada medida 10 minutos durante un período de 1.5 horas. Simultáneamente a las medidas de gasto, también se determinaron los torques y temperaturas reales involucradas en el experimento.

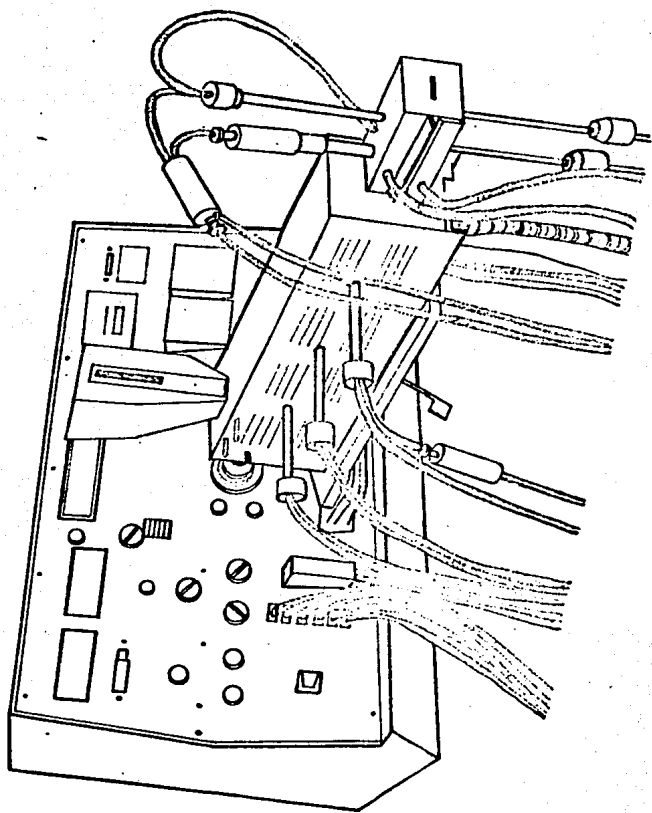


FIGURA 6.1.-
Vista frontal del aparato empleado en esta investigación
EXTRUSOR MODELO RHEOMEX 254 de la compañía HAAKE.

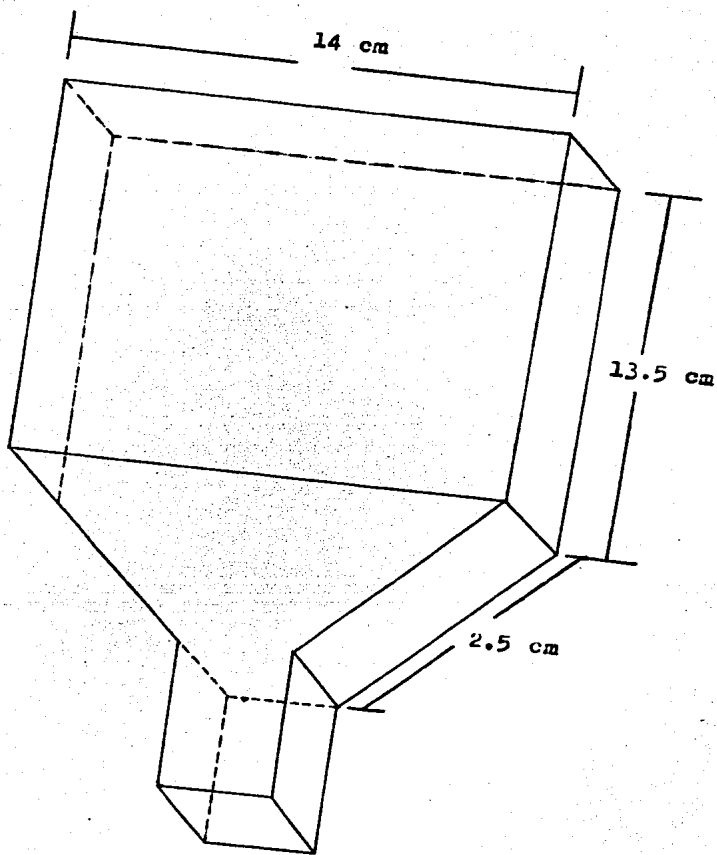


FIGURA 6.2 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA BOQUILLA.

6.2.- PREDICCIÓN DE Q Vs. P

6.2.1.- DETERMINACION DE LAS CONSTANTES GEOMETRICAS DEL EQUIPO

Especificaciones del tornillo:

- W = Distancia entre filetes = 1.5875 cm
- B = Tolerancia entre tornillo y barril = 0.381 cm
- D = Diámetro del tornillo = 1.905 cm
- Z = Longitud del tornillo = 47.625 cm
- θ = Angulo del filete del tornillo = 18°
- B = Profundidad del canal = 0.38 cm

Especificaciones de la boquilla:

- H = Separación entre labios = 0.115 cm
- L = Longitud de la boquilla = 2.65 cm
- W = Ancho de la boquilla = 10.12 cm

$$A = \frac{1}{2} \pi D W B \cos \theta$$

$$A = 1.7213 \text{ cm}^3$$

$$C = \frac{W B^3}{12 Z}$$

$$C = 1.536 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$$

$$k = \frac{W H}{12 L}$$

$$k = 4.84 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$$

(6.1)

(6.2)

(6.3)

Del libro de Middleman (pág. 130) tenemos que:

$$Q = \frac{A k}{C + k} N \quad \text{-----} \quad (6.4)$$

$$Q = \frac{(1.7213 \text{ cm}^3) \cdot (4.84 \times 10^{-4} \text{ cm}^3)}{(1.536 \times 10^{-4} \text{ cm}^3) + 4.84 \times 10^{-4} \text{ cm}^3}$$

$$Q = 1.3066 N$$

$$\Delta P = \frac{A}{C + k} = \text{-----} \quad (6.5)$$

$$\Delta P = \frac{1.7213 \text{ cm}^3}{(1.536 \times 10^{-4} + 4.84 \times 10^{-4}) \text{ cm}^3}$$

$$\Delta P = 2699.65 N$$

Dentro de este análisis se manejarán dos tamaños de partícula diferentes: finos y gruesos.

6.3.- CARACTERIZACION REOLOGICA DE MATERIALES VIRGENES Y RECICLADOS.

Los materiales vírgenes y reciclados fueron reológicamente caracterizados por medición de su viscosidad, utilizando para esto, un reómetro capilar.

Una vez cargada la muestra dentro del barril, se experimentó con 8 velocidades de extrusión diferentes (tabla I.i), -llevándose a cabo 3 pruebas con temperaturas de 170, 190 y 210°C respectivamente.

6.4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO.

Cuando son desarrollados nuevos materiales, es importante determinar su durabilidad, cuando éstos están expuestos a los efectos del medio ambiente. El saber por cuánto tiempo pueden retener un razonable porcentaje de su apariencia original y propiedades físicas, nos lleva a establecer el procedimiento, por el cual podremos obtener datos de envejecimiento de nuestro material en estudio (PEAD).

En este estudio se utilizó un intemperómetro (probador de intemperismo acelerado, QUV). Con estos probadores de intemperismo acelerado, es posible generar realmente la degradabilidad de un material en días o semanas, proporcionando el entendimiento del mecanismo de envejecimiento.

El QUV contiene ocho lámparas fluorescentes, arregladas en dos bancos de cuatro lámparas cada una. Un banco irradia los especímenes, a prueba, por el frente de la máquina. El otro banco irradia los especímenes por la parte posterior. Este equipo simula condiciones de Ultravioleta y Humedad en atmósfera natural:

La parte interna de los tubos fluorescentes contienen un fósforo especial*, diseñado para producir energía UV, mientras que el vidrio de los tubos es seleccionado para dar alta transmisión en la región UV. Aproximadamente, toda la energía está en la región ultravioleta, con poca luz visible, pero nada de infrarojo.

El mejor camino para simular el ataque por humedad ambiental, es por condensación caliente. Es por eso que el QUV simula lluvia y rocío por condensación, directamente sobre el espécimen a prueba. Esto se verifica llenando la cámara de prueba con vapor caliente para crear 100 % de humedad entre 40 y 50°C (28).

En el equipo se instalaron muestras de polietilenos de alta densidad vírgenes, reciclados y una mezcla de 75 % de material virgen y 25 % de material reciclado en forma de microprobetas norma DIN 53455, exponiéndolas durante períodos de 100, 200 y 400 horas. Esta caracterización fué realizada de acuerdo a la norma ASTM D 1708, con velocidades de prueba de 10 mm/min.

* Know Your Enemy: The Weather and How to Reproduce it in the Laboratory.

Douglas M. Grossman, The Q-Panel Co.,
15610 Industrial Pkwy, Cleveland, Ohio
44135.

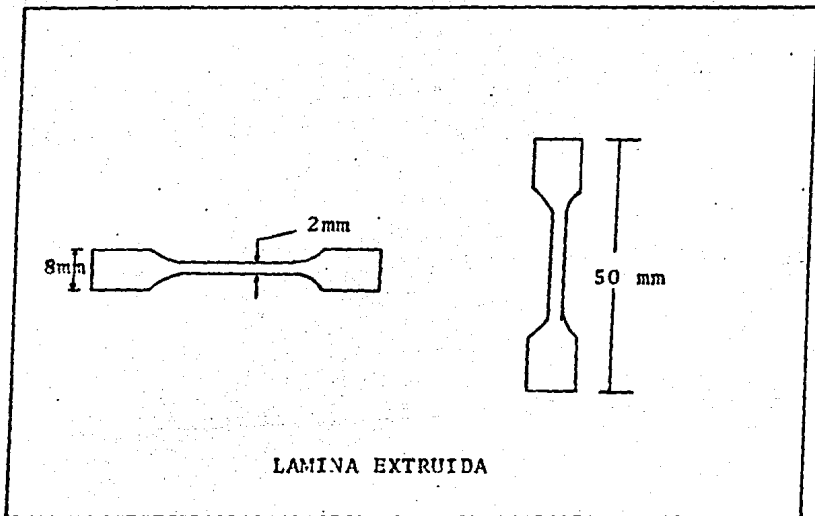
6.5.- PROPIEDADES MECANICAS

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este trabajo se utilizó, como prueba del comportamiento mecánico de las resinas vírgenes y reciclados, la resistencia a la tensión.

Esta prueba se realizó en la máquina Universal INSTRON, modelo 1125, utilizando microprobetas de la norma DIN 54455. Esta caracterización fué realizada de acuerdo a la norma ASTM D 1708 con velocidades de prueba de 10 mm/min.

Se tomaron muestras para esta prueba, tanto en el sentido de flujo, como en el sentido transversal. Las muestras tomadas se pueden observar en la figura 6.5.1.-



→
DIRECCION DE FLUJO.

FIG.6.5.1 MUESTRA PARA PRUEBA DE TENSION.


6.6.- PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL AL RECICLADO DE TERMO - PLASTICOS.

6.6.1.- EXTRUSION DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD EN DIFERENTES FORMAS FISICAS.

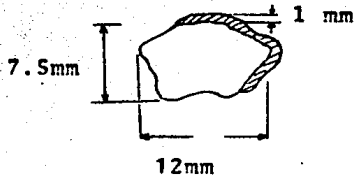
Las resinas empleadas en este estudio, fueron obtenidas bajo tres tipos diferentes de molienda. La resina virgen será identificada como tipo No. 1. La resina tipo No. 2 se obtiene de una molienda, llevada a cabo en un molino de martillos. Su forma fué una hojuela irregular, en donde el promedio en tamaño es el que se observa en la figura 6.

La resina No. 3 presenta características más regulares, debido a que su formación fué a partir de molinos especialmente para plásticos, (PAGANI 2222-170) de cuchillas rotatorias con enfriamiento de agua. La resina No. 4 de características finas, se obtuvo a partir de varios ciclos de molienda (3) en el mismo molino descrito anteriormente.

Los cuatro tipos de resinas mencionadas se pueden apreciar en la figura 6.6.1.-

 3 mm

PARTICULA NO. 1



PARTICULA NO. 2



PARTICULA NO. 3


1mm

PARTICULA NO. 4

FIG 6.6.1 CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE PARTICULA (MEDIDAS PROMEDIO).

6.6.2.- PLAN FORMAL DE ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EXTRUSOR CON RESINA VIRGEN.

Siguiendo el procedimiento experimental bosquejado anteriormente, el extrusor se operó, para este caso, con gránulos de resina virgen (PEAD), procedente de PETROLEOS MEXICANOS. De acuerdo a su forma física, no presentó durante la operación, variaciones sobresalientes de procesamiento.

Los resultados obtenidos del análisis de extrusión de esta resina, se presentan en las Gráficas 6.5.1.- y 6.5.2.-.

6.6.3.- PLAN FORMAL DE ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EXTRUSOR CON RESINA RECICLADA.

En base al planteamiento experimental de extrusión establecido, el trabajo con resina reciclada únicamente muestra variaciones determinantes en la operación de extrusión, principalmente por su característica física descrita en las figuras 6.6.1 y 6.6.2. Se tiene que establecer la diferencia de una alimentación más discontinua, en este caso, ocasionando problemas de operación reflejados, principalmente en el gasto y torque que se obtuvieron a lo largo del proceso de extrusión. Esto se muestra en las figuras 6.6.1 y 6.6.2.-

6.6.4.- ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EXTRUSOR CON COMBINACIONES DE MATERIAL VIRGEN Y RECICLADO.

Una vez más, el planteamiento experimental antes mencionado, es aplicado en estos puntos. Ahora, el material reciclado es mezclado en las proporciones ya conocidas con resina virgen. Al trabajar con diferentes formas físicas de material, se tienen los siguientes resultados:

- i) Material con características como el tipo No. 2 de la fig. 6.6.1.- Se puede observar que muestra un comportamiento estable de operación, cuando la concentración de material reciclado es 25 %. Pero, a medida que aumentamos la concentración de éste, se tienen problemas de alimentación, debido a la formación de espacios vacíos originados por la gran diferencia de tamaños entre ambas resinas.
- ii) Material con las características del tipo No. 3 tiene mínimos problemas de operación en mezclas 75V/25R y 50/50 V/R. Se les puede considerar muy semejantes en su procesamiento al de una resina virgen, ya que los datos que se obtienen de gasto y torque, que se consideran entre los parámetros más importantes del proceso de extrusión, son similares a los de un material virgen.
- iii) El último material, empleado en esta operación, es una resina reciclada de características finas. La operación con mezclas de 75V/25R y 50V/50R, muestra una gran mejoría en el procesado, debido a una buena alimentación del material.

Desde el punto de vista de las formas físicas de los materiales empleados, se puede pensar en un mejor deslizamiento del gránulo sobre la resina fina y una mejoría en el material fundido.

Los resultados de todas estas mezclas se tienen en las gráficas de gasto y torque contra velocidad del tornillo (RPM) y se puede observar mejor en la gráfica de Índice de reducción de flujo másico contra % de material reciclado.

Dentro de la presentación de tablas de datos, gráficas y análisis de resultados, se tienen las gráficas de torque y coeficiente de variación por unidad de revolución, además de la relación de energía que muestran también las diferencias que se obtienen con motivo de las características físicas de los materiales procesados.

6.6.5.- INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y FORMA DE PARTICULA SOBRE EL PROCESO DE EXTRUSION.

Introducción

De todos es conocido que el tamaño de partícula, así como la morfología de esta, son características dignas de tomarse en cuenta a la hora de analizar un proceso de extrusión, ya que presentan una influencia directa sobre la alimentación y por consiguiente un reflejo en el gasto de polímero fundido.

Con el objeto de ver la influencia de estas dos características de partícula sobre el proceso de extrusión, se desarrollaron una serie de experimentos utilizando 4 tamaños de partícula y forma diferentes.

DESARROLLO EXPERIMENTAL:

Las pruebas se llevaron a cabo con unas condiciones de operación similares a las descritas en el capítulo 6.6. Los tamaños de partícula y forma diferente con los cuales se experimentó son los descritos en la figura 6.6.1. Los datos obtenidos para los diferentes tamaños de partícula se muestran en la tabla 7.7.1, del capítulo 7. Se analizaron también mezclas de los diferentes tipos de partícula, mostrando se estos resultados en la tabla 7.7.2, del capítulo 7.

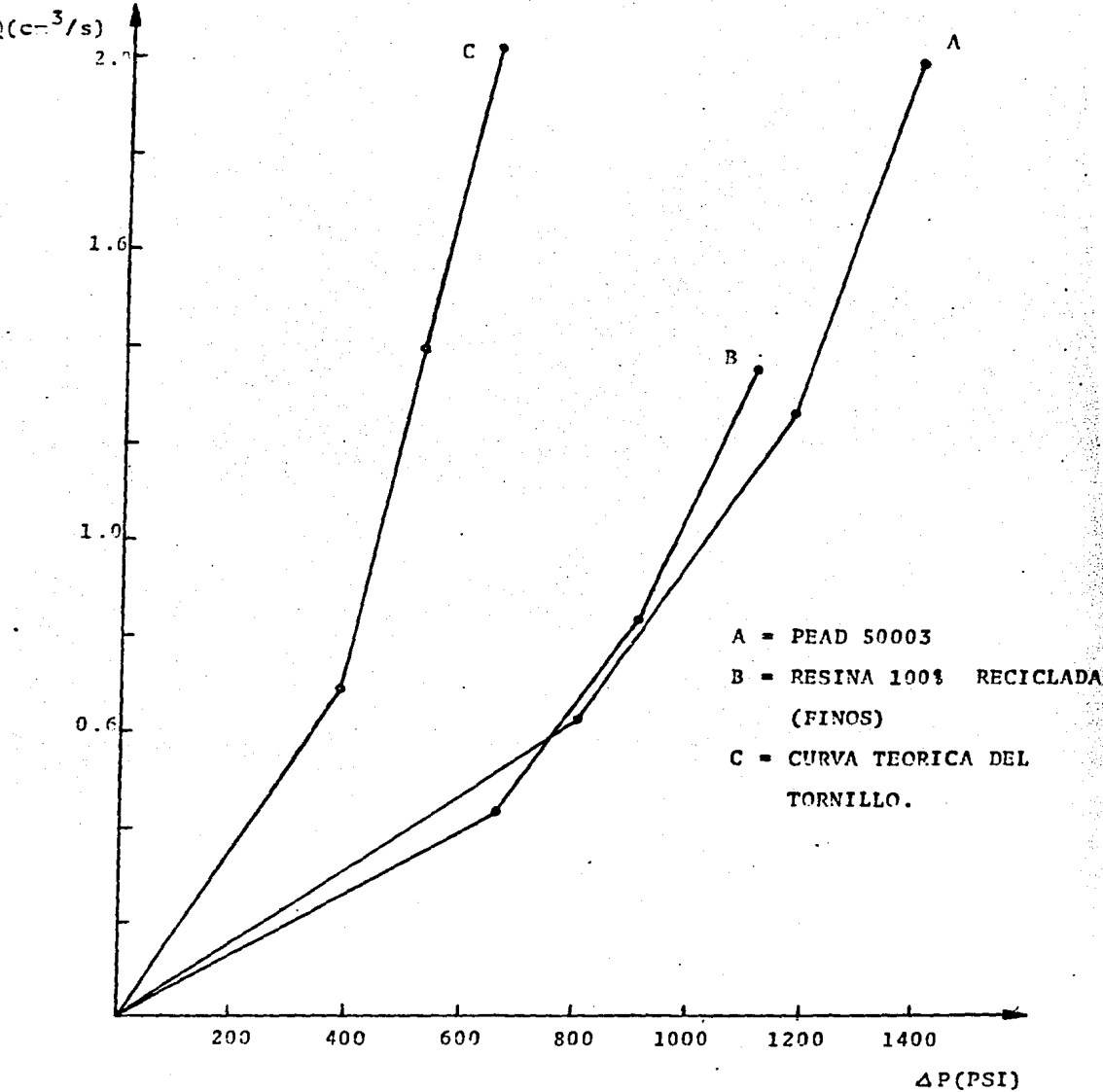
CAPITULO S I E T E

7.1.- COMPARACION DEL PROCESO DE EXTRUSION CON EL MODELO DE MIDDLEMAN.

Las gráficas 7.1 y 7.2 muestran que el modelo, propuesto por Middleman, se ajusta de manera cualitativa, a nuestro proceso de extrusión, pues tanto la resina virgen, como la resina reciclada presentan una tendencia similar a la obtenida, usando el modelo antes mencionado. Cuantitativamente no podríamos predecir con certeza que el procesamiento del PEAD se ajuste al mismo modelo, ya que el rango de caída de presión de la curva teórica con respecto a las dos curvas experimentales, difiere grandemente.

En lo que se refiere a mezclas de material virgen y reciclado, las gráficas 7.3 y 7.4 muestran que cuando se procesa una mezcla de 75 % de material virgen con 25 % de material reciclado (finos), presenta una tendencia similar a la que aparece cuando se procesa únicamente resina virgen. Consideramos que esto se debe a que los gránulos, con el material en polvo (finos), no permite formación de espacios vacíos que pudieron afectar la alimentación del tornillo, y que, además, el material en polvo es más fácil de fundir.

GRAFICA DE Q Vs. ΔP



GRAFICA 7.1

(cm³/s)

GRAFICA DE Q Vs. ΔP

A = CURVA TEORICA DEL TORNILLO.

B = PEAD 50003

C = 75V/25R GRUESOS.

2.0

1.6

1.0

0.6

400

800

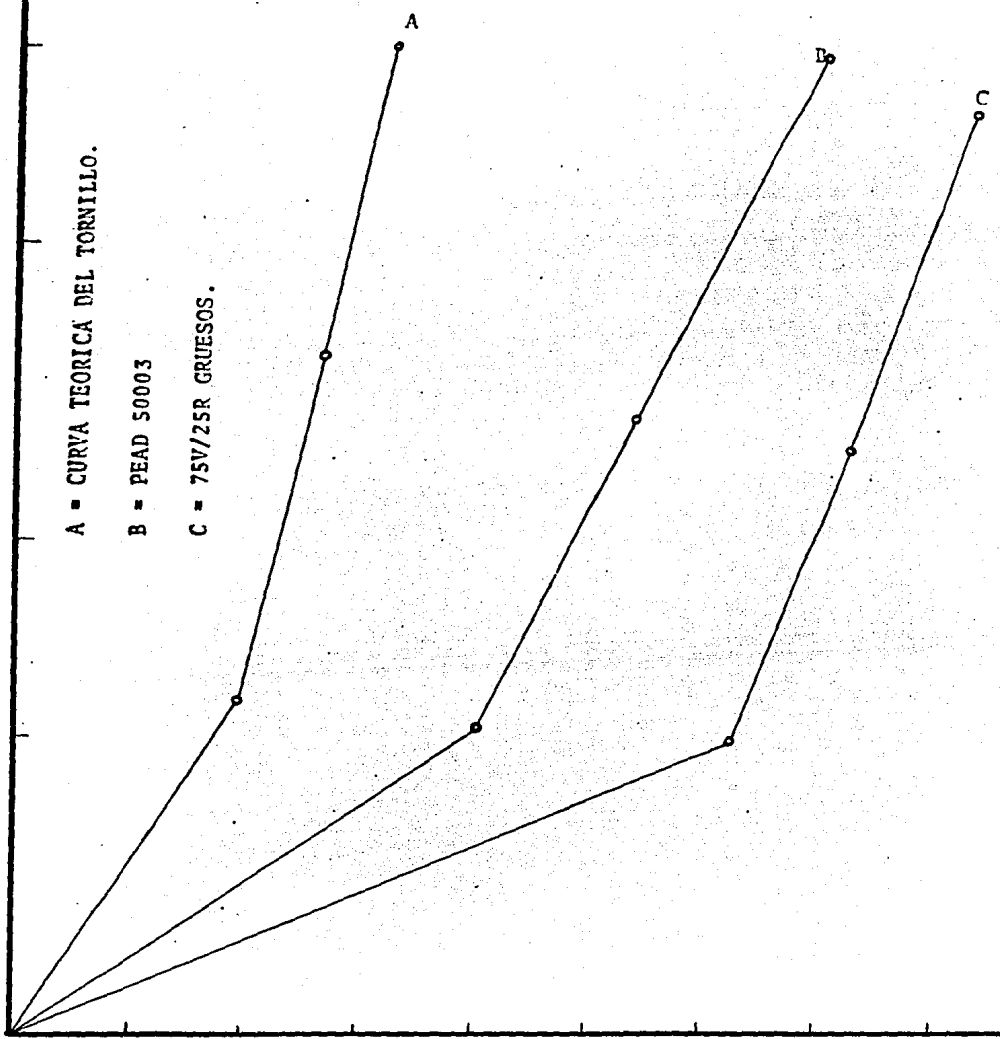
1200

1600

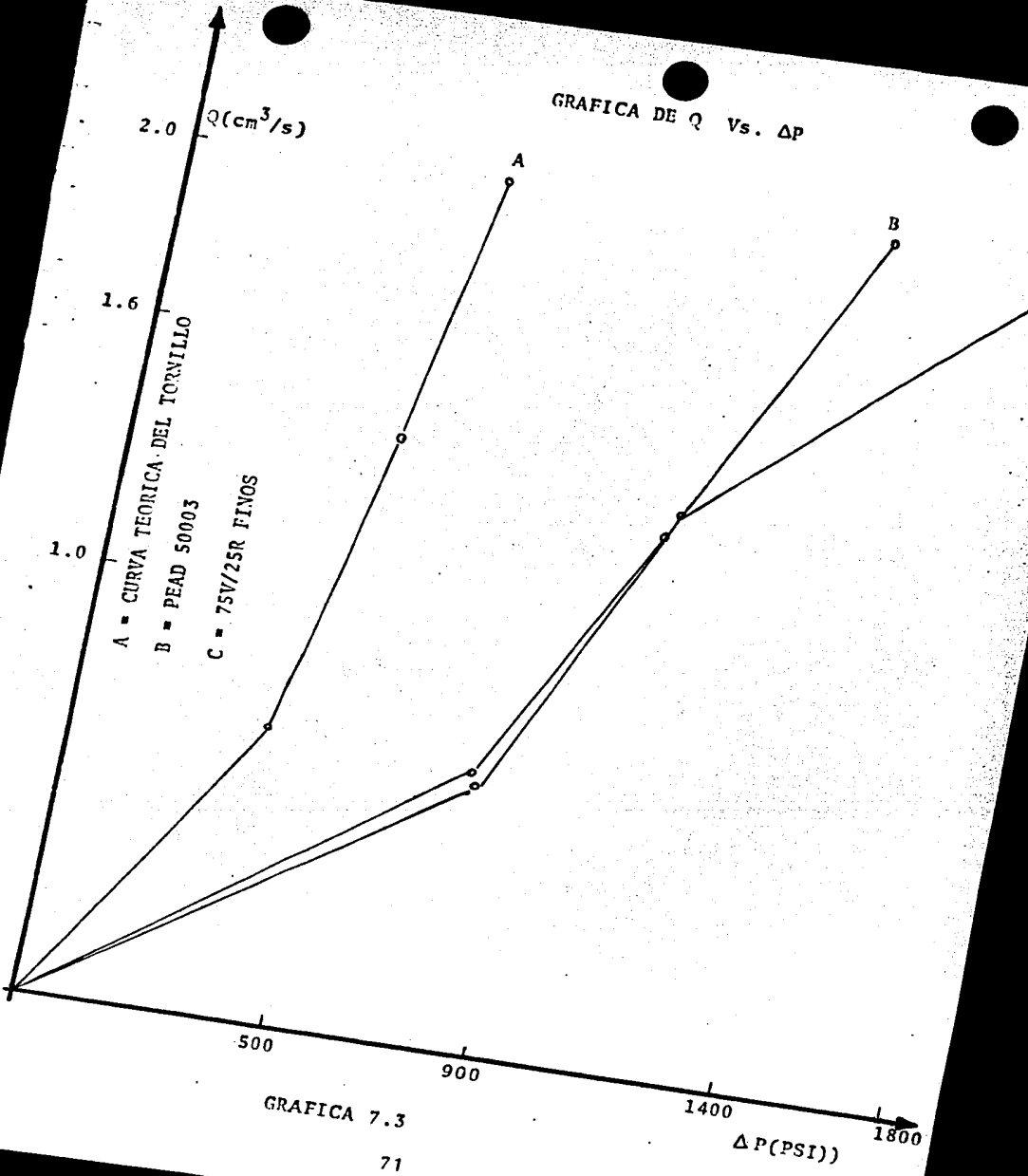
ΔP (PSI)

GRAFICA 7.2

70

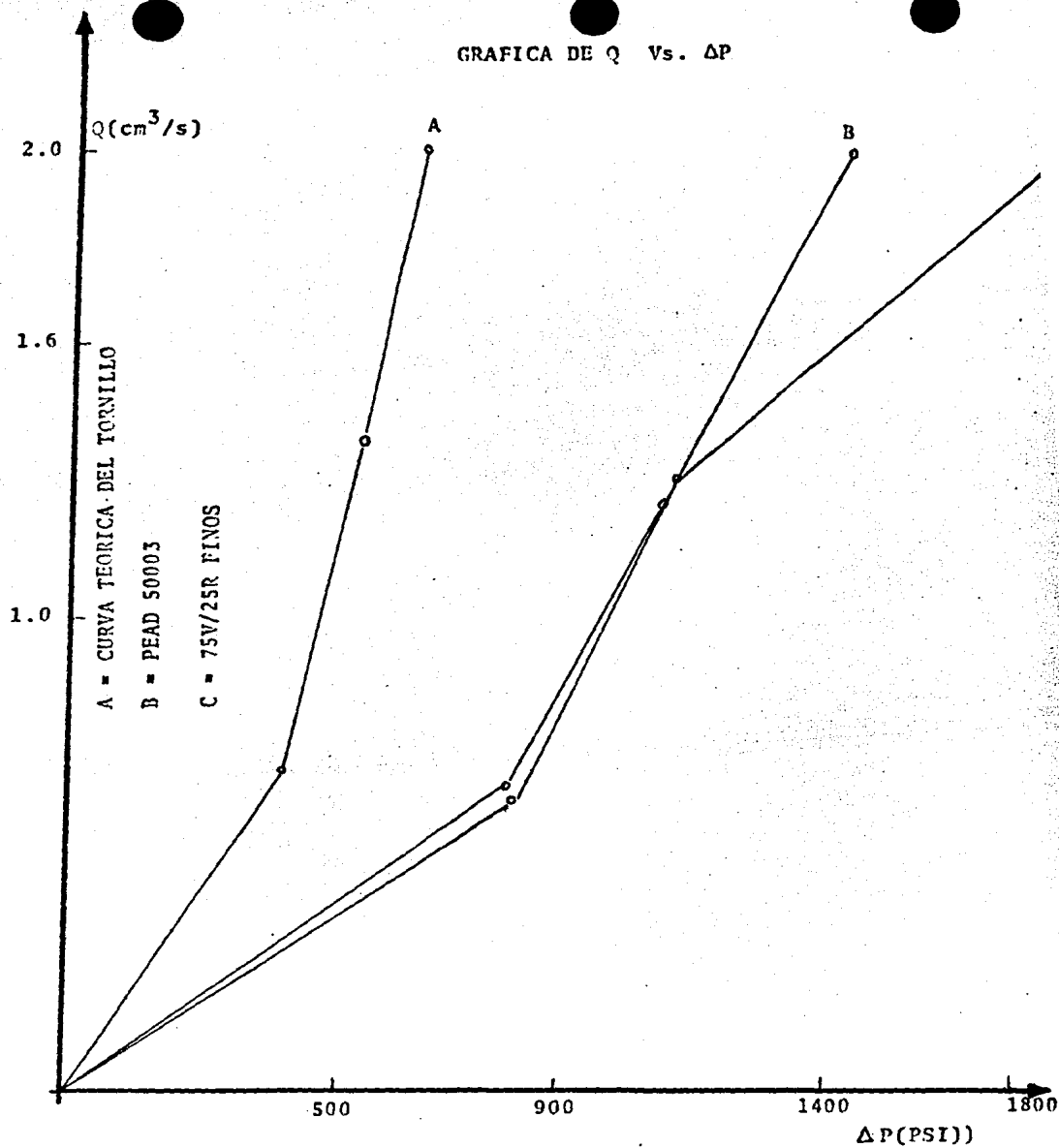


GRAFICA DE Q Vs. ΔP



GRAFICA 7.3

GRAFICA DE Q Vs. ΔP



A = CURVA TEORICA DEL TORNILLO

B = PEAD 50003

C = 75V/25R FINOS

GRAFICA 7.3

$Q(\text{cm}^3/\text{s})$

GRAFICA DE Q Vs. ΔP
COMPARACION ENTRE MATERIAL FINO Y GRUESO.

- A = CURVA TEORICA DEL TORNILLO.
- B = PEAD 50003
- C = 75V/25R FINOS
- D = 75V/25R GRUESOS

2.0
1.6
1.2
1.0
0.8
0.2

400 600 1000 1600 1800

GRAFICA 7.4

$\Delta P(\text{PSI})$

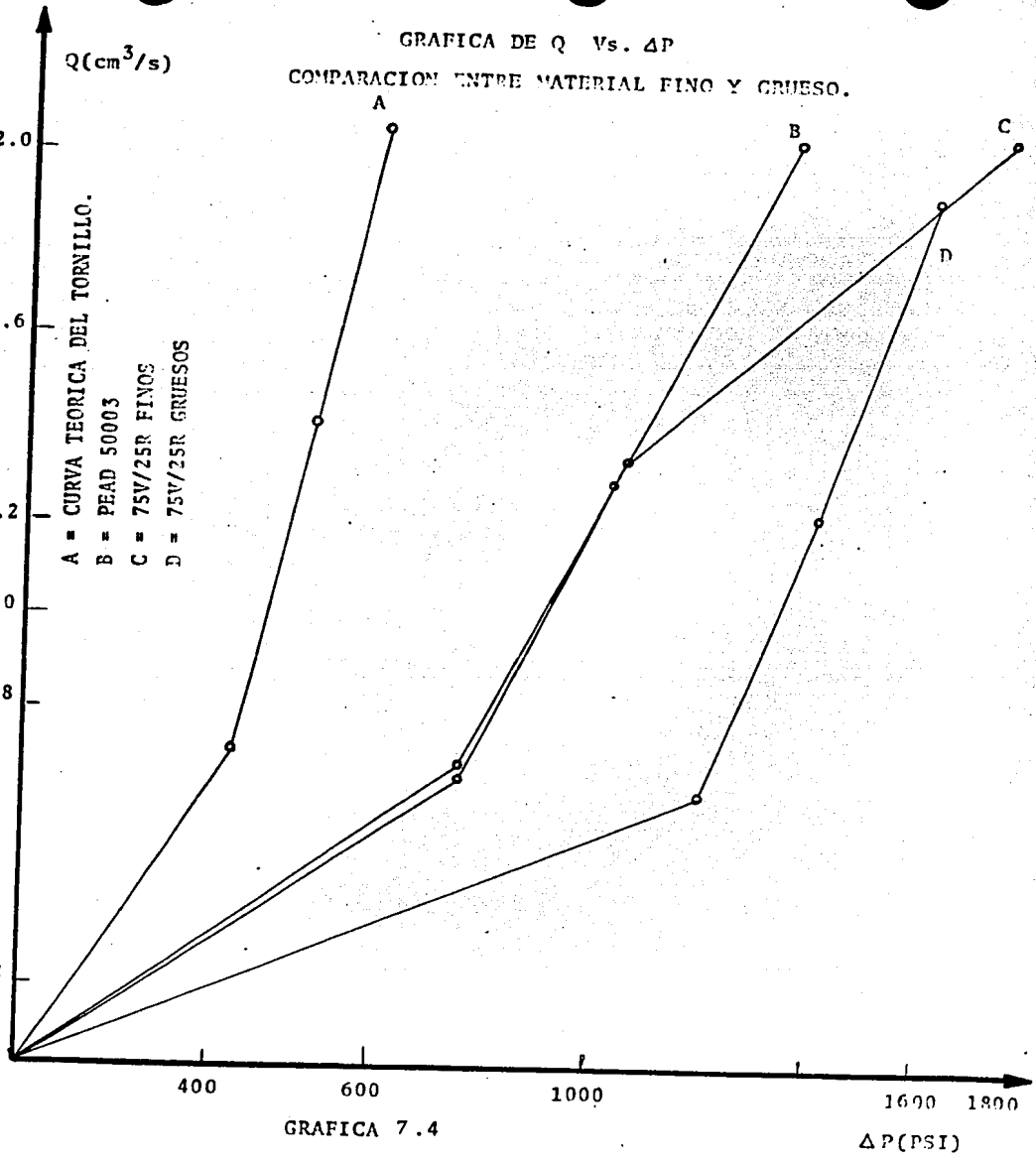


TABLA 7.1.-

PREDICION DE Q Vs. ΔP

N (RPM)	$\gamma = S^{-1}$	$Q_{teo} \text{ cm}^3/s$	$\Delta P_{teo} \text{ Psi}$
32	31.10	0.6966	331.25
64	62.21	1.3932	527.56
100	97.20	2.117	644.0

PEAD	5000 3	75V/25R	(finos)	75V/25R	(gruesos)
Q_{exp}	P exp	Q_{exp}	P exp	Q_{exp}	P exp
0.6379	800	0.6583	800	0.6009	1250
1.2643	1075	1.3139	1100	1.1911	1450
1.9958	1400	2.0593	1800	1.8705	1700

$Q = \text{cm}^3/s$

P = Psi

7.2.- CARACTERIZACION REOLOGICA DE LOS MATERIALES VIRGEN Y RECICLADO

La caracterización reológica del material virgen y reciclado, se obtuvo mediante el análisis de sus viscosidades. Los resultados son mostrados en la Gráfica 7.5. Esta muestra que la viscosidad de ambos materiales (virgen y reciclado) es idéntica dentro de un error experimental sobre un intervalo de 10^{-2} a 10^{-3} seg^{-1} de velocidad de corte.

De la caracterización reológica, descrita anteriormente, observamos que ambas resinas presentaron conducta casi idéntica durante la extrusión, lo cual se esperaba. Además, la velocidad de corte, en la boquilla rectangular (calculados de los datos de velocidad de flujo), varía entre 10 y 60 seg^{-1} . Estos valores son buenos dentro del rango de nuestra determinación experimental.

VISCOSIDAD (poises)

GRAFICA 7.5.- VISCOSIDAD VS. RAPIDEZ DE DEFORMACION

○ PEAD RECICLADO(R)
△ PEAD VIRGEN (V) .

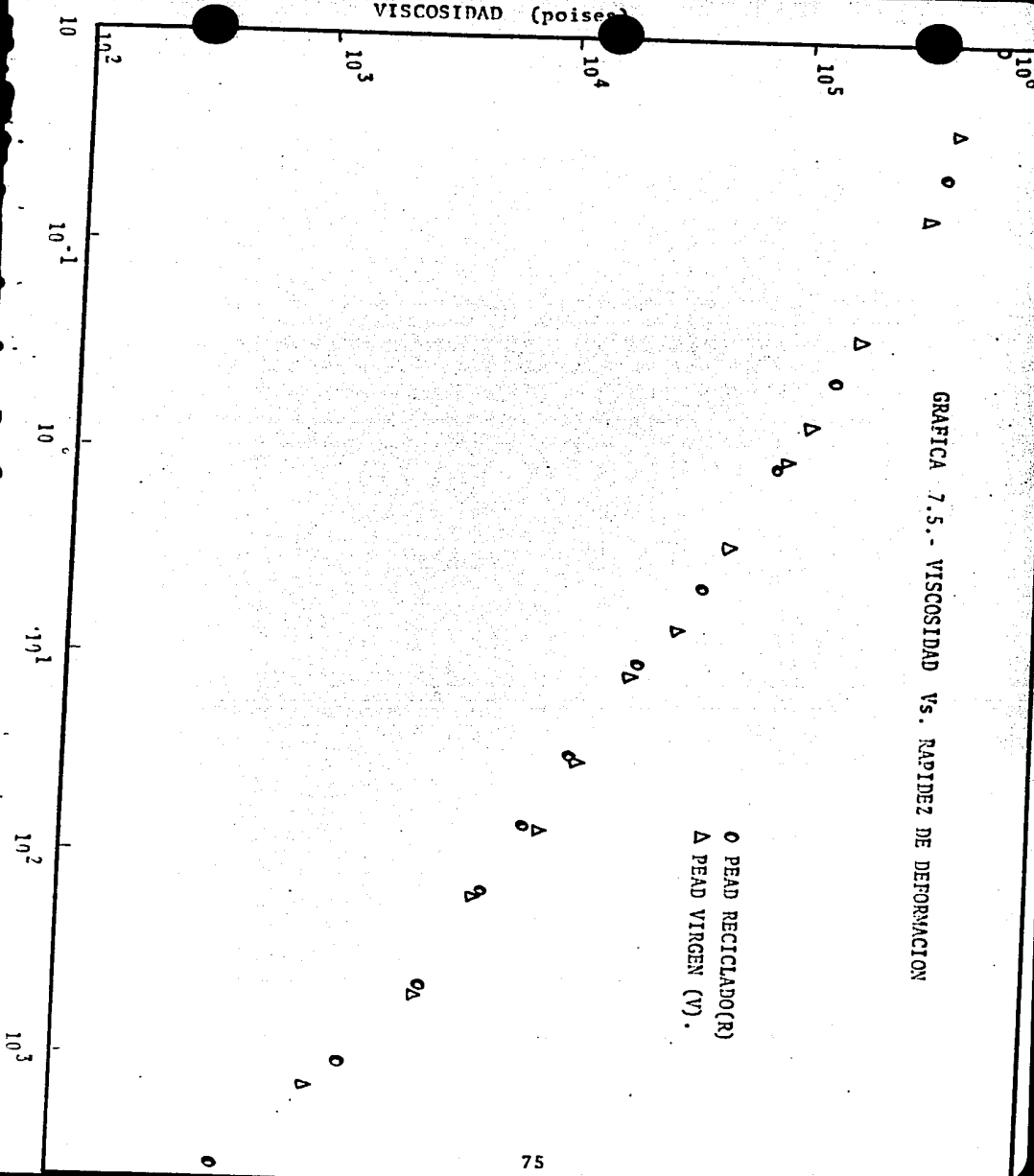


TABLA 7.2.1. - COMPARACION ENTRE LA VELOCIDAD DE EXTRUSION Y LA FUERZA APLICADA A TRES TEMPERATURAS DIFERENTES.

PEAD = Dc = 0.127508 cm T = 170°C

L / D	20	40	60	Corrección Bagley
*cm/min F Kg **				
0.1	24	42	62	-----
0.2	32	58	86	-3.45
0.5	47	90	132	-2.19
1	68	124	187	-2.46
2	94	165	255	-2.57
5	135	290	360	-6.52
10	170	305	465	-2.48
20	178	285	430	----

T = 190°C * Velocidad de Extrusión ** Fuerza Kg

0.1	--	-----	-----	-----
0.2	36	58	75	-17.18
0.5	48	92	126	- 5.47
1	66	124	170	- 6.15
2	90	168	235	- 5.33
5	122	235	340	- 2.63
10	155	295	440	- 1.64
20	195	385	500	----

TABLA 7.2.1.- (Continuación)

PEAD 50003

Dc 0.127508 cm

T = 210°C

L / D	20	40	60	Corrección de Bagley
*cm/min. F Kg **				
0.1	21	25	45	---
0.2	28	41	64	- 9.25
0.5	41	66	102	- 5.68
1	57	77	145	- 2.27
2	76	108	200	- 1.29
3 5	108	170	295	- 0.855
10	139	225	390	- 0.053
20	174	300	495	----

72
 TABLA I.2 DETERMINACION DE PROPIEDADES REOLOGICAS
 USANDO EL REOMETRO CAPILAR.

170 °C		190 °C		210 °C	
$\dot{\gamma}_{wc} = S^{-1}$	$T_{wc} = \text{LPa}$	$\dot{\gamma}_{wc} = S^{-1}$	$T_{wc} = \text{KPa}$	$\dot{\gamma}_{wc} = S^{-1}$	$T_{wc} = \text{KPa}$
14.64	46.45	12.12	33.54	13.72	50.97
36.59	73.11	29.37	67.09	34.04	52.97
72.82	102.36	78.74	89.46	70.48	75.70
148.69	138.49	150.06	124.73	144.13	106.66
421.39	193.54	368.91	187.52	375.14	160.86
820.90	253.76	806.63	245.15	778.97	215.91

$$n = 0.46 \quad n_0 = 12230 \text{ Pa} \quad n = \frac{T_{wc}}{\dot{\gamma}_{wc}} \quad n^* n_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}\right)^{n-1}$$

DISCUSION DE RESULTADOS

7.3.- ENVEJECIMIENTO

Los efectos resultantes, al similar exposición a la intemperie del material en estudio, fueron analizados, en base a la prueba mecánica de resistencia a la tensión de microprobetas, como fué discutido en el planteamiento experimental. Las tendencias obtenidas, se presentan en las gráficas 7.6., 7.7. y 7.8. -

La gráfica 7.6.- muestra el comportamiento de una resina virgen, presentando para las primeras 200 horas de exposición, un aumento de la propiedad mecánica de análisis. Esto se explica, debido a que la incidencia de rayos ultravioleta, tiende inicialmente a completar el grado de polimerización e inducir el entrecruzamiento de ligaduras, coincidiendo con el punto máximo de la curva.

Después de 200 horas de exposición, las propiedades del material empiezan a decaer y generalmente son atribuidas, del predomino de división de cadenas, sobre las reacciones de entrecruzamiento, ocurridas durante la exposición de las microprobetas a la luz UV. Este caso ya ha sido ampliamente reportado por: F.H.Winslow y W.L.Hawkins (29).

La gráfica 7.8.- de una resina 75 % virgen y 25 % reciclada, presenta un comportamiento muy similar a la de una resina 100 % virgen, pudiendolo explicar de la misma forma que para la gráfica 7.6.

La gráfica 7.7.-, referida al comportamiento de una resina 100 % reciclada, muestra un caso muy diferente a las descritas an

teriormente, pues el material, desde 100 horas de exposición, tiende ya a decaer en sus propiedades. Esto se puede explicar considerando que el material cuenta ya con un tiempo de exposición natural, además de tres procesos de transformación, e numerados a continuación:

1.- Procesamiento por Soplado

para obtener el contenedor, base de la resina por reciclar.

2.- Proceso de Molienda

Proporcionando fuerzas cortantes y de impacto, para obtener el tamaño de la resina a reciclar.

3.- Proceso de Extrusión

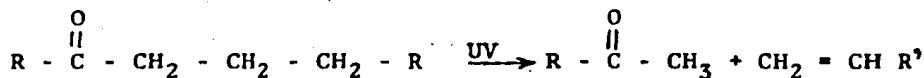
Resina base de nuestro estudio.

Es por esto que el material 100 % reciclado, cuenta ya, a 100 horas de exposición, con un considerado predominio de división de cadenas sobre la reacción de entrecruzamiento, siendo ésta la causa directa de la falla mecánica.

El envejecimiento explicado a nivel macroscópico, puede ser apreciado mediante un incremento en el tiempo de exposición. De esta forma, las propiedades del material tienden a decaer, detectadas por la medición de una prueba mecánica: fisuras superficiales ó grietas, un estado quebradizo del material y una decoloración apreciable.

A nivel microscópico, el mecanismo fisicoquímico del envejecimiento es explicado por la penetración libre del oxígeno at-

mosférico, en regiones desordenadas de polímero, donde este reacciona con segmentos de cadena activa por la absorción de radiación ultravioleta. Se ha propuesto también que grupos carbonilos u otros defectos en la estructura molecular, absorben la energía requerida para el envejecimiento. Los mecanismos de éste son probablemente diversos. En realidad, el rompimiento de enlaces C-C y C-H son relativamente poco comunes, mientras que el enlace C-O (carbonilo) absorbe más fuertemente y, pudiendo indicar la siguiente reacción, el inicio del envejecimiento de polímeros conteniendo grupos carbonilos :



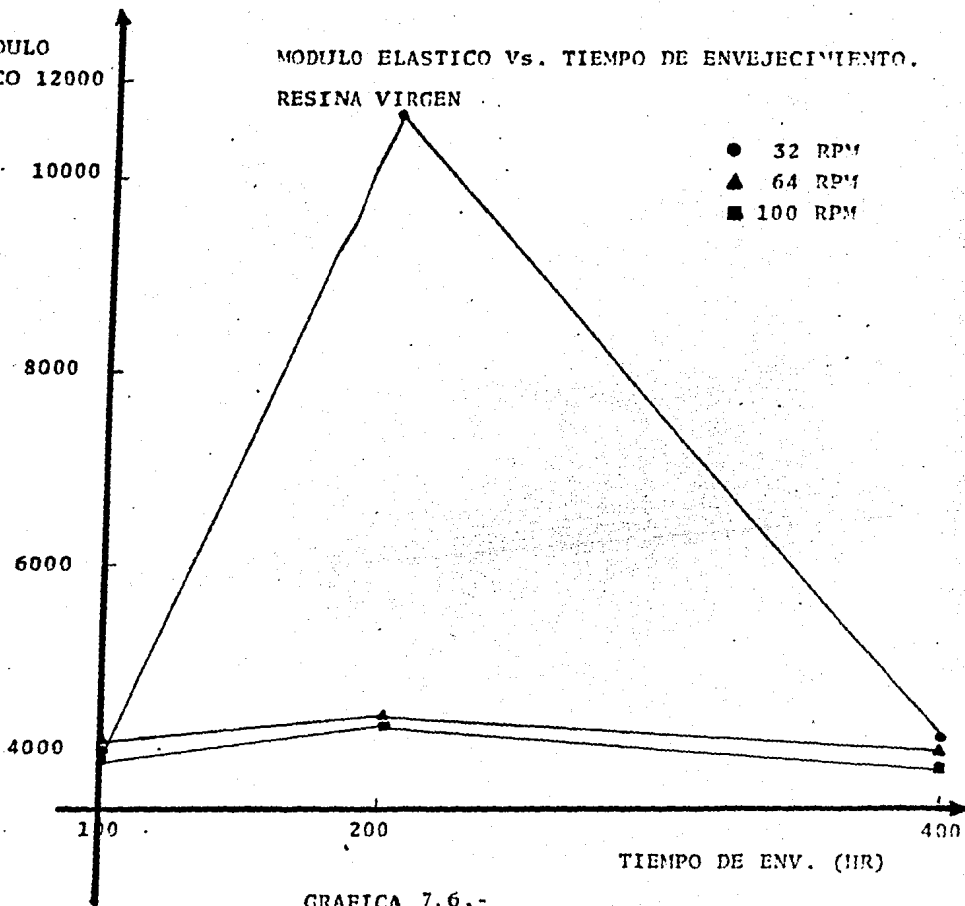
(Grupos carbonilos están presentes como impurezas en polietileno y otras poliolefinas). (30)

Se ha indicado que marcados cambios morfológicos, como los que acompañan a un polietileno quebradizo, presentan durante la exposición en oxígeno a temperaturas elevadas ó bajo radiación ultravioleta - un rápido ascenso en la cristalinidad, lo que ha sido observado por rayos X y mediciones de calor de fusión, también como por determinaciones de densidad.

De observaciones hechas se tiene, que la relación de partición a entrecruzamiento durante el envejecimiento, depende de la concentración de oxígeno en el sitio de la reacción, y por lo tanto varía con la cristalinidad y el espesor del espécimen.

MODULO
ELASTICO 12000
 $\bar{\text{Kg/cm}}^2$

MODULO ELASTICO Vs. TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO.
RESINA VIRGEN



TIEMPO DE ENV. (HR)

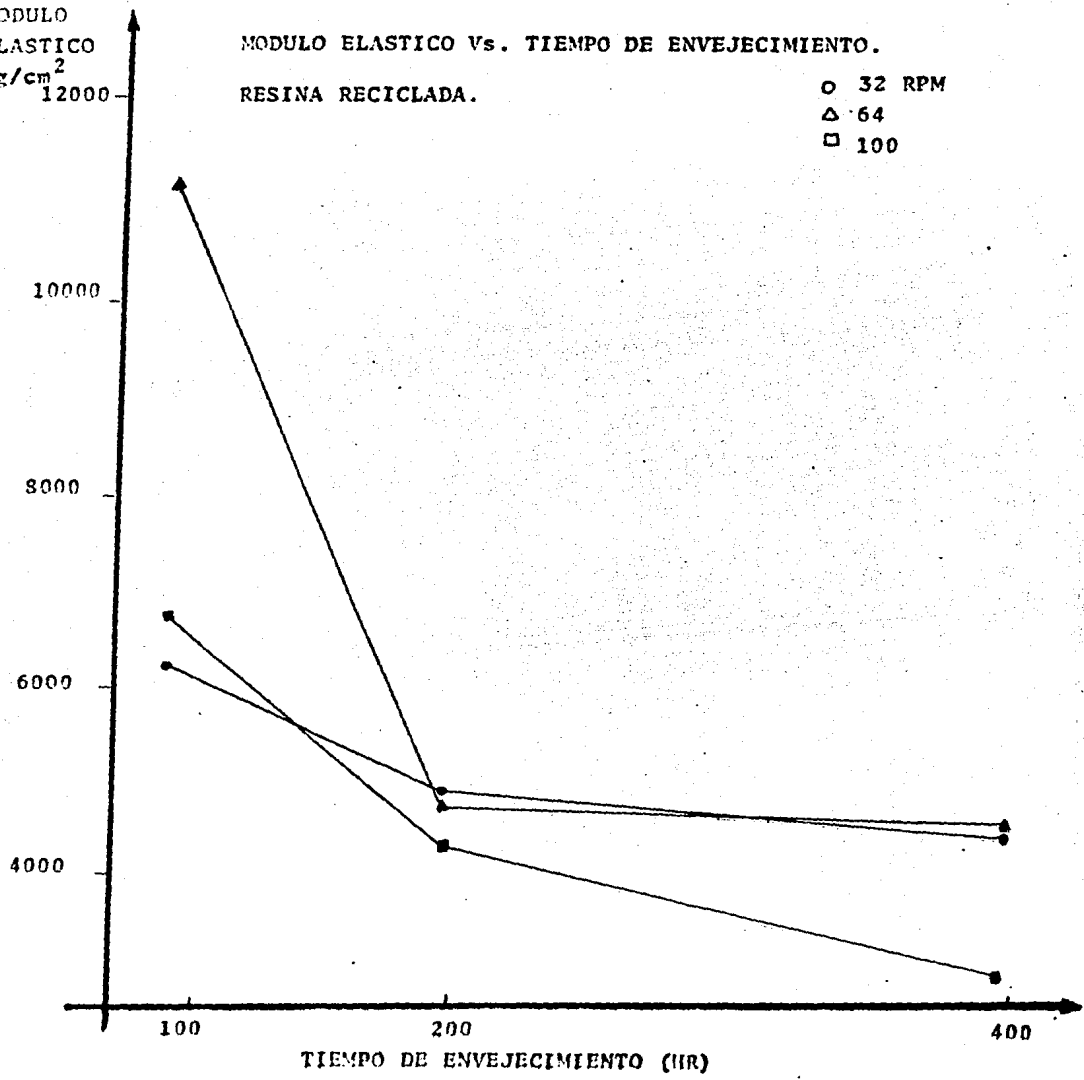
GRAFICA 7.6.-

MODULO
ELASTICO
Kg/cm²

MODULO ELASTICO Vs. TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO.

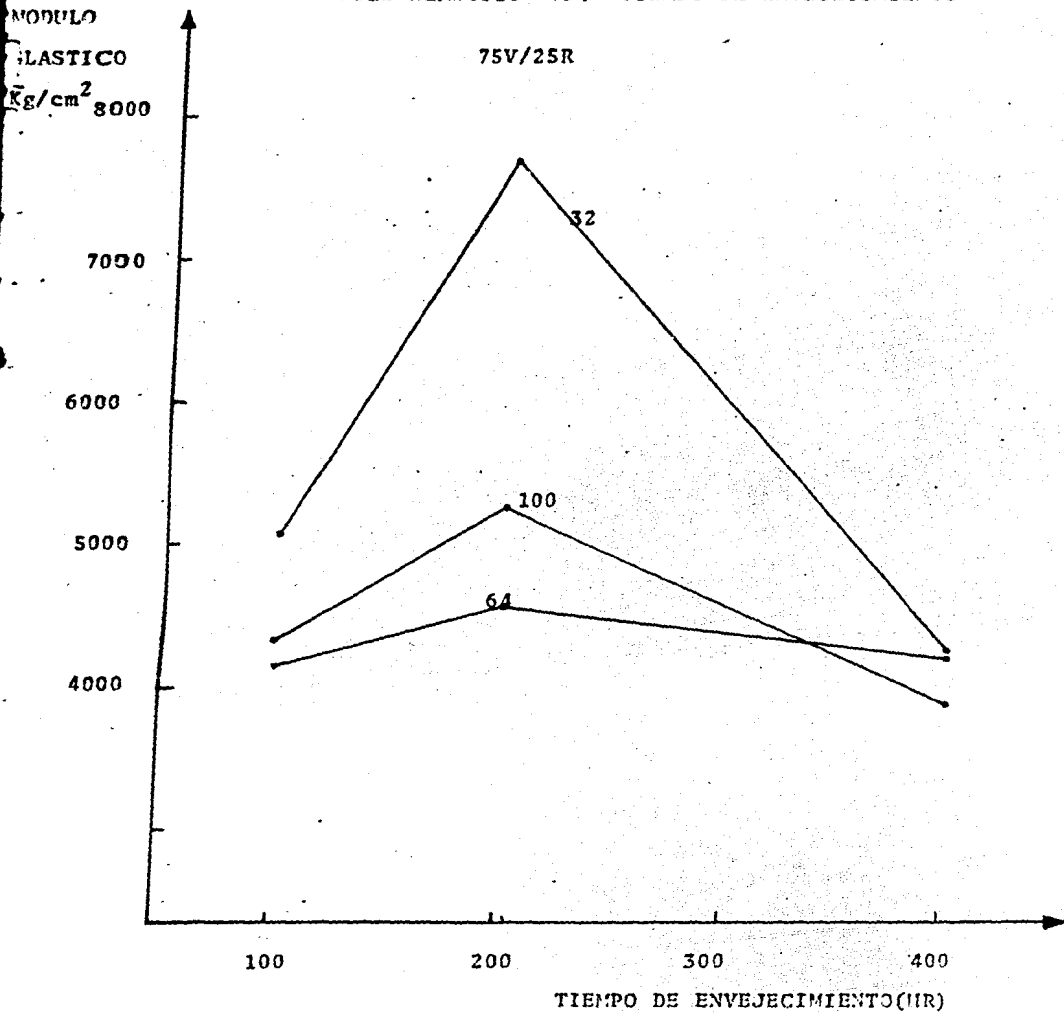
RESINA RECICLADA.

- 32 RPM
- △ 64
- 100



GRAFICA 7.7.-

MODULO ELASTICO Vs. TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO



GRAFICA 7.8.-

TABLA 7.3.1.- ANALISIS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO PARA
TRES TIPOS DE MUESTRAS.

MATERIAL	Tiempo* N (RPM)	MODULO ELASTICO \bar{K}_g / cm^2		
		32	64	100
RESINA	100	4409.02+452.1	4173.43+349.61	4281.6+350.34
VIRGEN	200	4500.5+256.43	4496.3+332.14	4650.2+319.5
	400	4228.4+148.43	3992.5 + 423.2	3880.6 + 151.5

MATERIAL	TIEMPO* N (RPM)	MODULO ELASTICO \bar{K}_g / cm^2		
		32	64	100
75% VIRGEN	100	5661.3 + 300.2	4152.1 + 220.5	4333.0 + 150.1
25% RECIC-	200	7692.1 + 305.1	4571.4 + 301.2	5264 + 198.4
LADA	400	4251.2 + 150.5	4196.3 + 322.1	3859.9 + 148.4

MATERIAL	TIEMPO* N (RPM)	MODULO ELASTICO \bar{K}_g / cm^2		
		32	64	100
RESINA	100	6088.56 + 350.5	4705.5 + 234.5	4271.5 + 248.1
100 %	200	11,164.5+489.5	4371.2 + 246.9	4236.0 + 189.7
RECICLADA	400	4274.5 + 165.9	4303.57+284.2	3042.2 + 318.2

* TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO (HR)

DISCUSION DE RESULTADOS

7.4.- PROPIEDADES MECANICAS

Analizando la propiedad mecánica en estudio (Módulo de Elasticidad), y dado que la rigidez es la medida básica de ésta, se presenta a continuación una breve descripción de -- los resultados de las muestras (microprobetas), tomadas, tanto en la dirección de flujo, como en sentido transversal. Se toma en consideración que del análisis de esta variable, se puede determinar el empleo final de la resina en estudio, -- además de encontrar la mezcla de material Virgen/Reciclado -- que guarde los valores de rigidez más cercanos a los de una resina virgen.

Para dar visión más clara de estos resultados, los hemos agrupado de acuerdo a sus tendencias.

A.- Para las muestras, tomadas en la dirección de flujo, se tienen dos grupos:

-- El primero, marcado por su similitud en valores y su tendencia descendente del módulo elástico observado al -- aumentar la velocidad de extrusión ($N=RPM$).

Este primer grupo corresponde a la resina 100 % virgen y a la mezcla de resinas 75 % V/25 % R.

-- Mientras que el segundo grupo, a decir verdad, no -- muestra una tendencia específica de los valores obtenidos y estos se refieren a las mezclas 50%V /50%R, 25%V / 75% R y a material 100 % reciclado.

B.- Para muestras, tomadas en sentido transversal, se observan tres grupos:

-- El primer grupo se identifica por los valores obtenidos para las resinas: 100 % Virgen, 100 % Reciclada y 50 % V / 50 % R. Estas muestran tendencias descendentes del valor de rigidez (módulo elástico), dependientes de la velocidad de extrusión, además de un ligero valor inferior en comparación con las muestras longitudinales, pudiendo explicar esta diferencia por la forma en que la muestra fué tomada (transversalmente), pues la orientación molecular, que se ha dado por el proceso de extrusión, es longitudinal.

-- El segundo grupo está representado por la mezcla de resinas 75 % V / 25 % R y donde sus valores no muestran a simple vista una variación significativa en su rigidez (módulo elástico), si la consideramos dependiente de la velocidad de extrusión. Pero si tiene, como en el primer grupo, valores ligeramente inferiores, comparados con las muestras longitudinales.

-- El tercer grupo que incluiría a la mezcla de resinas 25 % V / 75 % R, no muestra una tendencia específica para este tipo de muestras.

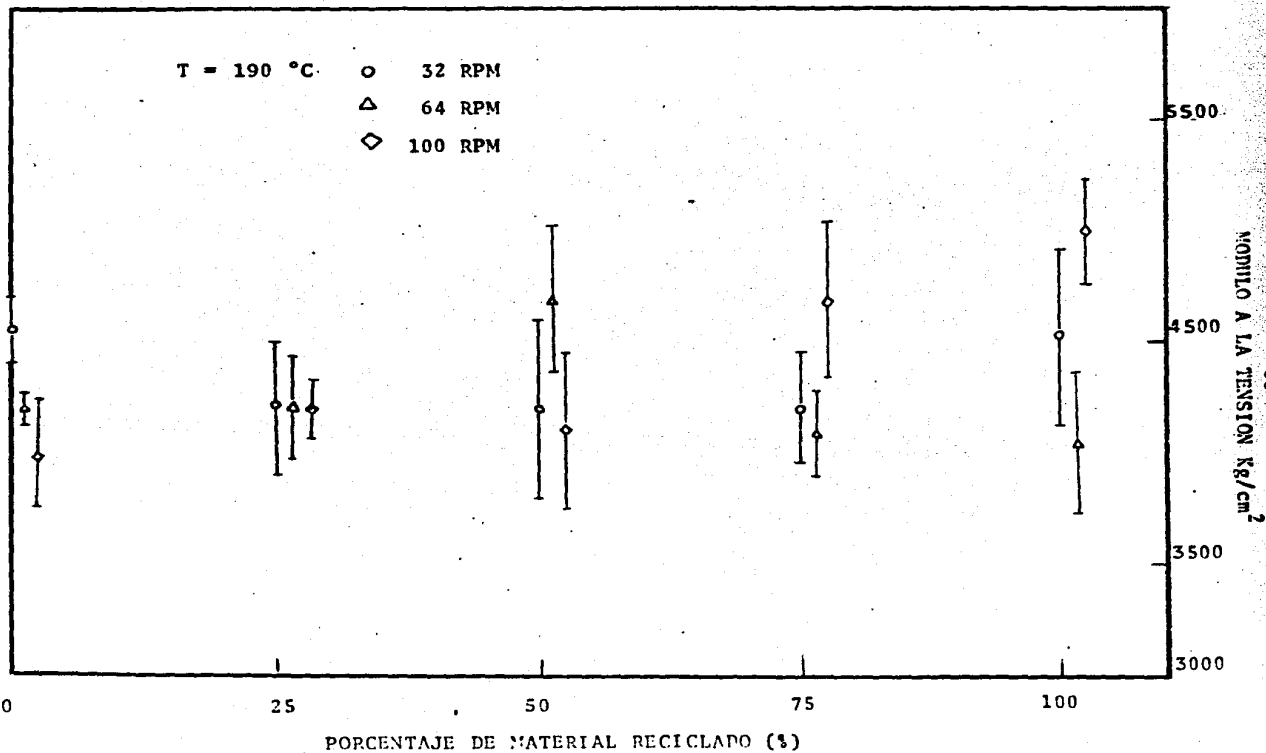
Del análisis de estos resultados se puede indicar, hasta el momento, tres puntos importantes:

a) La dependencia del módulo elástico con la velocidad de extrusión (N=RPM). Es decir, el módulo elástico desciende al aumentar la velocidad de extrusión.

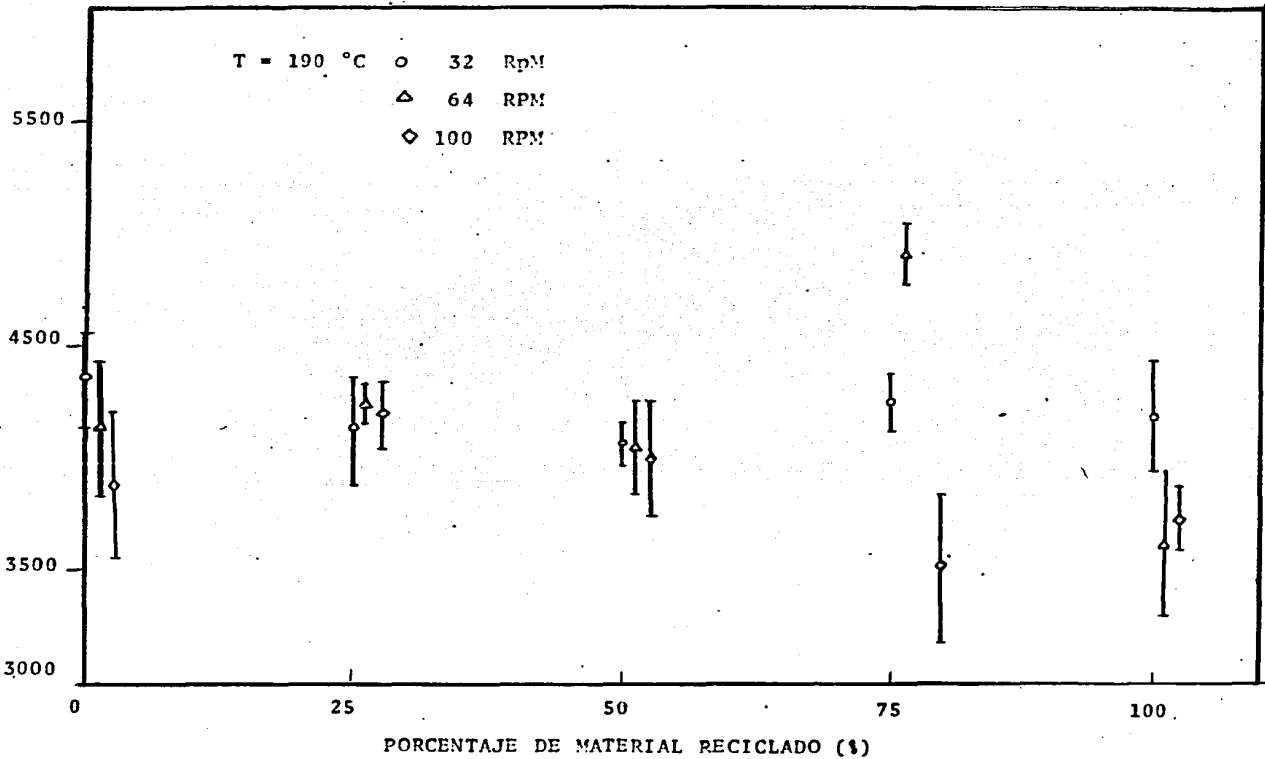
- b) Se determina que la mezcla de resinas 75 % V / 25 % R tiene valores de módulo elástico muy similares al de una resina - 100 % virgen y, por lo tanto, se considera la mezcla óptima.
- c) Es esperado un valor de módulo elástico menor en muestras - transversales, debido a la orientación molecular (longitudi- nal) que se proporcionó por el proceso de extrusión.

El análisis de todos estos resultados lleva a contemplar que las mezclas de material virgen con diferentes proporciones de material reciclado, alcanzan variaciones en el módulo elástico de un 8 % en promedio, aún en los casos en que la velocidad de tornillo se ve aumentada.

Considerando esta desviación poco significativa, podemos pensar que la factibilidad de reciclar PEAD es posible.



* MUESTRAS TOMADAS EN LA DIRECCION DE FLUJO.



* MUESTRAS TOMADAS EN SENTIDO TRANSVERSAL

TABLA 7.4.1.- ANALISIS DE PROPIEDADES MECANICAS PARA
 DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MATERIAL
 RECICLADO.

MATERIAL	RESINA 100 % VIRGEN		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4525.2 + 148.3	4192.4 + 120.5	4006.7 + 273.3

MATERIAL	75 % VIRGEN / 25 % RECICLADO		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4288.7 + 304.5	4260.4 + 198.7	4203.2 + 130.5

MATERIAL	50 % VIRGEN / 50 % RECICLADO		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4194.8 + 407.2	4680.9 + 367.6	4120.4 + 350.4

MATERIAL	25 % VIRGEN / 75 % RECICLADO		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4205.2 + 252.2	4098.8 + 178.4	4690.7 + 356.2

MATERIAL	RESINA 100 % RECICLADA		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4518.2 + 404.3	4056.4 + 308.6	5721.8 + 244.1

* MUESTRAS TOMADAS EN LA DIRECCION DE FLUJO

TABLA 7.4.2 ANALISIS DE PROPIEDADES MECANICAS PARA
 DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MATERIAL
 RECICLADO.

MATERIAL	RESINA 100 % VIRGEN		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4350.4 + 204.2	4140.2 + 285.4	3888.1 + 306.3

MATERIAL	75 % VIRGEN / 25 % RECICLADA		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4125.15+233.2	4252.2 + 68.6	4210.1 + 148.7

MATERIAL	50 % VIRGEN / 50 % RECICLADA		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4062.4 + 1577	4050.8 + 193.4	3990.9 + 250.5

MATERIAL	25 % VIRGEN / 75 % RECICLADA		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4271.1 + 120.9	4909.7 + 136.0	2531.3 + 312.3

MATERIAL	RESINA 100 % RECICLADA		
N (RPM)	32	64	100
MODULO Kg/cm ² ELASTICO	4198.1 + 249.3	3642.02 + 319.4	3748.5 + 128.6

* MUESTRAS TOMADAS EN SENTIDO TRANSVERSAL

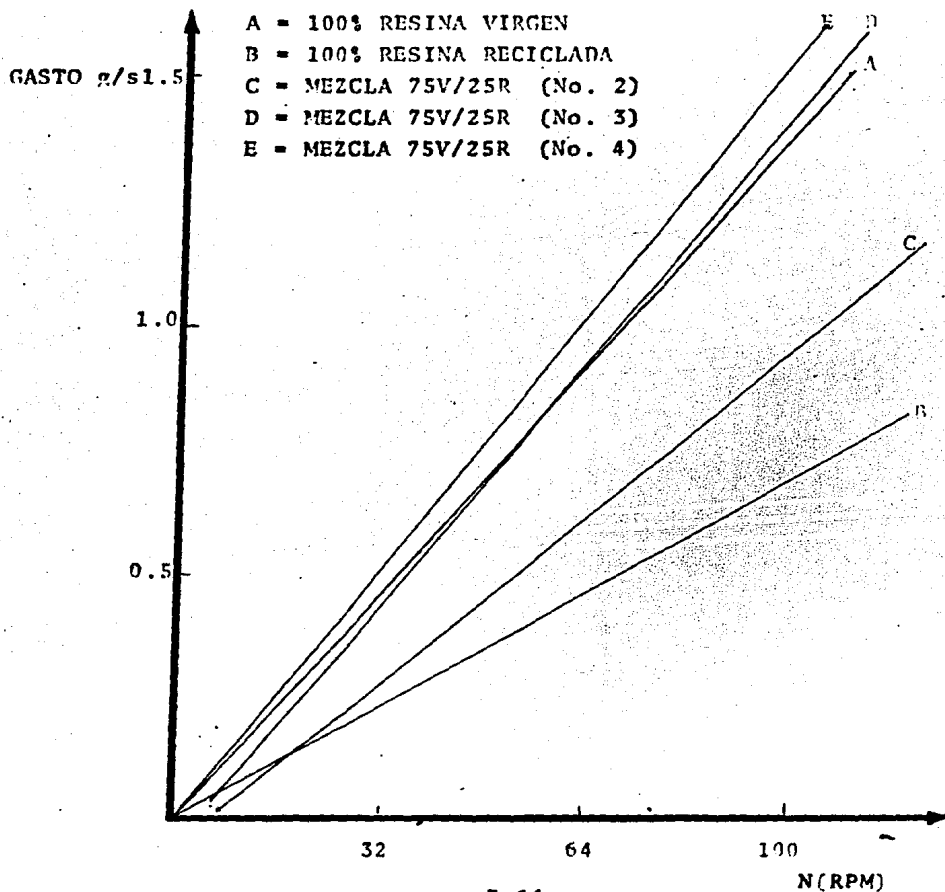
7.5.- EXTRUSION DE PEAD EN DIFERENTES FORMAS FISICAS

Las gráficas 7.11 y 7.12 muestran claramente el pequeño efecto que se produce, cuando la concentración de material reciclado es de 25 % y, además, la morfología y el tamaño de éste es regular. Esta tendencia se asemeja mucho al proceso, cuando extruímos resina virgen, es decir, no presentan problemas de alimentación, ni de compactación del material.

(Líneas E, D, A de la Gráfica 7.11.-)

El efecto mostrado por la línea C, que corresponde a la más grande e irregular de las partículas (2), tiende a parecerse más a una resina 100 % reciclada, a causa de los problemas provocados por la formación de espacios vacíos que afectan la alimentación al tornillo.

REPRESENTACION GRAFICA DEL PROCESO DE EXTRUSION PARA MATERIAL VIRGEN, RECICLADO Y MEZCLAS DE AMBOS TOMANDO EN CUENTA EL TAMAÑO DE PARTICULA



GRAFICA 7.11.-

EXTRUSION DE PEAD a 190 °C
 VELOCIDAD DEL TORNILLO (RPM) Vs. τ ($\bar{g}m$)

TORQUE $\bar{g}m$

1500

1000

500

- A = 100% RESINA VIRGEN
- B = 100% RESINA RECICLADA
- C = MEZCLA 25 / 75 (No. 2)
- D = MEZCLA 75V/25R (No. 3)
- E = MEZCLA 75V/25R (No. 4)

32

64

100 N(RPM)

GRAFICA 6.6.2.-

EXPERIMENTACION CON 4 TIPOS DIFERENTES DE PARTICULA

TABLA 7.5.1 ANALISIS DE TORQUE Vs. N(RPM) PARA EL PROCESO DE EXTRUSION UTILIZANDO PARTICULAS DEL TIPO NO. 2.

V/R	100/0			75/25		
N(RPM)	32	64	100	32	64	100
(gm)	934.5	1090.25	1339.0	804.75	1035.75	1320.5
	16.25	73.48	88.37	55.5	21.75	76.58
U_G	1.73	6.74	6.6	6.9	2.1	5.8

V/R	50/50			25/75		
N(RPM)	32	64	100	32	64	100
(gm)	892.15	1193.5	1346.7	878.5	1242.75	1477.0
	120.48	70.4	162.8	31.6	31.69	66.46
U_G	13.5	5.9	12.1	3.6	2.55	4.5

V/R	0/100		
N(RPM)	32	64	100
(gm)	1065.0	1089.25	1147.5
	100.48	279.9	54.8
U_G	9.4	25.7	4.8

TABLA 7.5.2 RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL PROCESO DE EXTRUSION EMPLEANDO PARTICULAS DEL TIPO 2.

V/R	N(RPM)	Ω : (gm)	G(g/s)	P(W)	E=Kg/Kw-Hr
100/0	32	939.5	0.4632	30.85	54.052
	64	1090.25	0.881	71.63	44.27
	100	1339.0	1.49	137.47	37.68
75/25	32	804.75	0.3317	26.43	45.18
	64	1035.75	0.6125	68.056	32.39
	100	1320.5	1.031	135.5	27.39
50/50	32	892.5	0.321	29.32	39.41
	64	1193.5	0.5973	78.42	27.42
	100	1346.7	0.9863	138.26	25.68
25/75	32	878.5	0.299	28.86	37.29
	64	1242.75	0.5945	81.65	26.21
	100	1477.0	0.9705	151.63	23.04
0/100	32	1065.0	0.2435	34.98	24.95
	64	1089.25	0.4477	71.57	22.36
	100	1147.5	0.6902	117.81	21.090

TABLA 7.5.3.- RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL PROCESO DE -
EXTRUSION USANDO PARTICULAS DEL TIPO 2.

V/R	N(RPM)	P(W)	G(Kg/hr)	$G_{MH}(W)$	$\epsilon = P/G_{MH}$
100/0	32	30.85	1.667	161.6	0.1909
	64	71.63	3.1716	307.26	0.2330
	100	137.47	5.1804	502.04	0.2738
75/25	32	26.43	1.1941	115.72	0.2283
	64	68.05	2.205	213.69	0.3184
	100	135.5	3.711	359.69	0.3767
50/50	32	29.32	1.155	111.99	0.2618
	64	78.42	2.1502	208.35	0.3763
	100	138.26	3.5506	344.09	0.4018
25/75	32	28.86	1.0764	104.31	0.2766
	64	81.65	2.1402	207.39	0.3937
	100	151.63	3.4938	338.59	0.4478
0/100	32	34.98	0.8766	84.95 _{gw}	0.4117
	64	71.57	1.600	155.05	0.4616
	100	117.81	2.4847	240.80	0.4892

TABLA 7.5.4.- RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL PROCESO DE EXTRUSION USANDO PARTICULAS DEL TIPO 2.

V/R	N(RPM)	G_{R+V}	$S=1-G_{R+V}/G_V$
75/25	32	0.7162	0.2838
	64	0.6952	0.3048
	100	0.7165	0.2835
50/50	32	0.6930	0.3070
	64	0.6780	0.3220
	100	0.6854	0.3146
25/75	32	0.6455	0.3545
	64	0.6750	0.3250
	100	0.6744	0.3256
0/100	32	0.5257	0.4743
	64	0.5048	0.4952
	100	0.4796	0.5204

S = Indice de reducción de flujo Másico.

TABLA 7.5.5.- RESULTADOS CORRESPONDIENTES AL PROCESO DE EXTRUSION USANDO PARTICULAS DEL TIPO 3.

V/R	S	U_g/N	ϵ	Ω/N	E^*
75/25	0.1305	0.075	0.2429	0.3063	42.46
50/50	0.2367	0.1121	0.2518	0.2787	40.97
25/75	0.3347	0.5362	0.2859	0.276	36.08
0/100	0.3363	0.096	0.2870	0.2762	35.95

V/R	N(RPM)	G_m^*	Ω/N J Min
100/0	32	1072.5	0.3286
75/25	32	999.9	0.3063
50/50	32	909.8	0.2787
25/75	32	900.6	0.276
0/100	32	901.8	0.2763

*Kg/Kw-Hr

V/R	N(RPM)	P(W)	$\epsilon = P/GAH$	$E = \text{Kg/Kw-Hr}$
100/0	32	35.22	0.2265	45.55
75/25	32	32.85	0.2429	42.46
50/50	32	29.89	0.2518	40.97
25/75	32	29.58	0.2859	36.08
0/100	32	29.62	0.2870	35.95

7.6.- COMPORTAMIENTO DEL EXTRUSOR CON RESINA VIRGEN, RECICLADA Y MEZCLA DE AMBAS.

MATERIAL FINO (4):

La gráfica 7.13 muestra que existe una clara tendencia de aumentar el torque, cuando el porcentaje de material reciclado es 25 %, debido a las razones antes mencionadas.

Cuando la concentración del material reciclado es mayor del 50 %, se presentaron problemas de alimentación, ya que el torque tiene una caída bastante significativa, debido en gran parte al peso específico del material en la tolva, pues este ya no tiende a caer con la misma facilidad que cuando se está extruyendo resina virgen.

MATERIAL GRUESO (3):

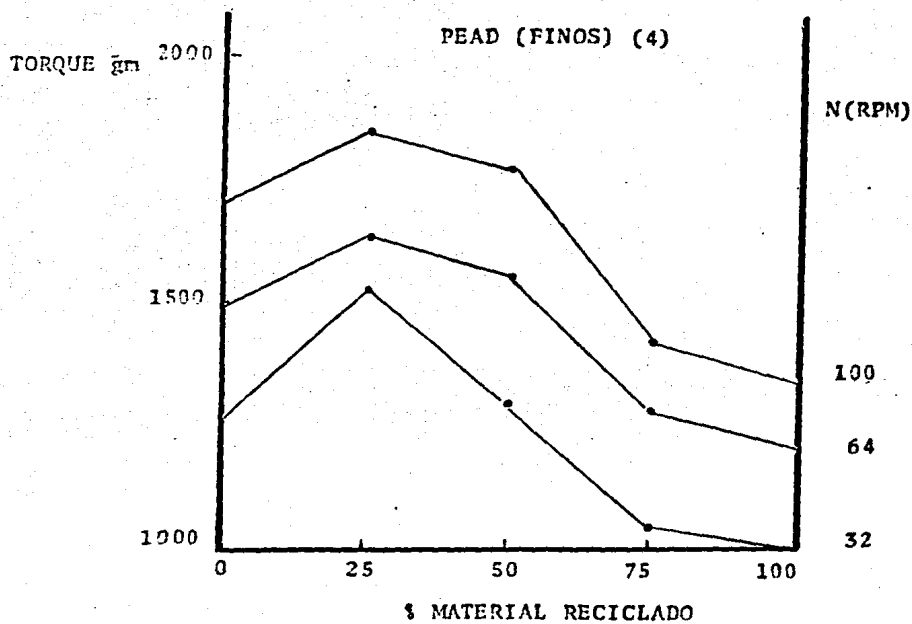
La gráfica 7.14 muestra que independientemente de la velocidad del tornillo, a medida que aumentamos la concentración del material reciclado, el torque disminuye proporcionalmente.

La gráfica 7.15 muestra que el torque obtenido al extruir material fino y material grueso, es independiente de las revoluciones del tornillo, aunque, con respecto a la resina virgen, esta variación es un poco mayor. Esto se corrobora si observamos la gráfica 7.16, donde el gasto para material fino y material grueso es casi idéntico.

La gráfica 7.17 muestra el gasto obtenido al extruir mezclas de resina virgen y reciclada en sus dos tamaños (finos y -

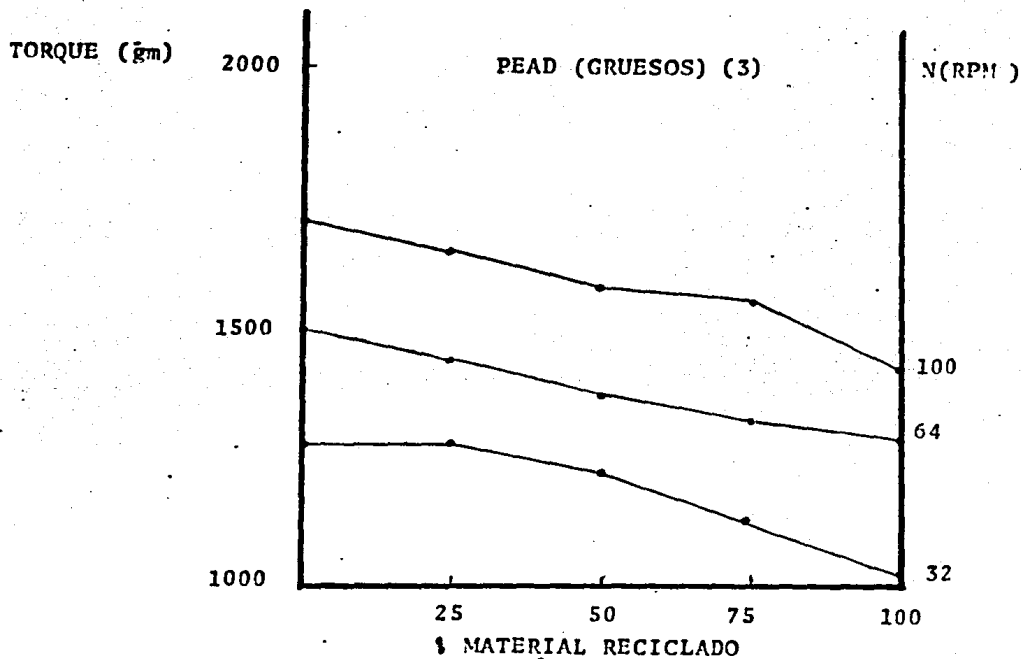
gruesos), de donde se observa que propiamente la extrusión de éstas, es independiente de las revoluciones del tornillo. Se observa que los porcentajes de mezcla más adecuados para su procesamiento, son 25 y 50 % respectivamente.

GRAFICA DE TORQUE (β) Vs. % MATERIAL RECICLADO
A DIFERENTES VELOCIDADES DE TORNILLO.



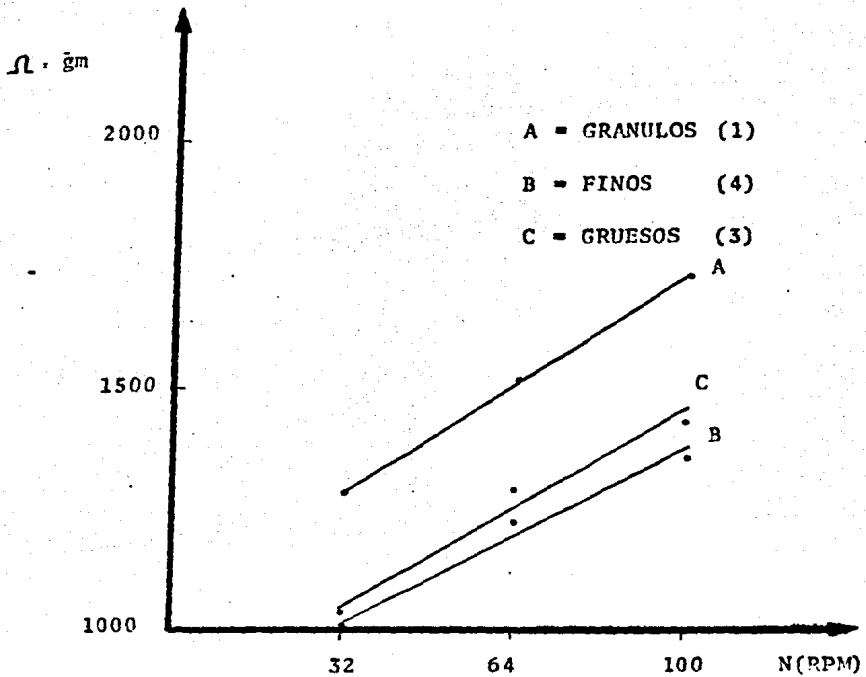
grafica 7.13.-

GRAFICA DE TORQUE (Ω) Vs. % MATERIAL RECICLADO
A DIFERENTES VELOCIDADES DE TORNILLO.



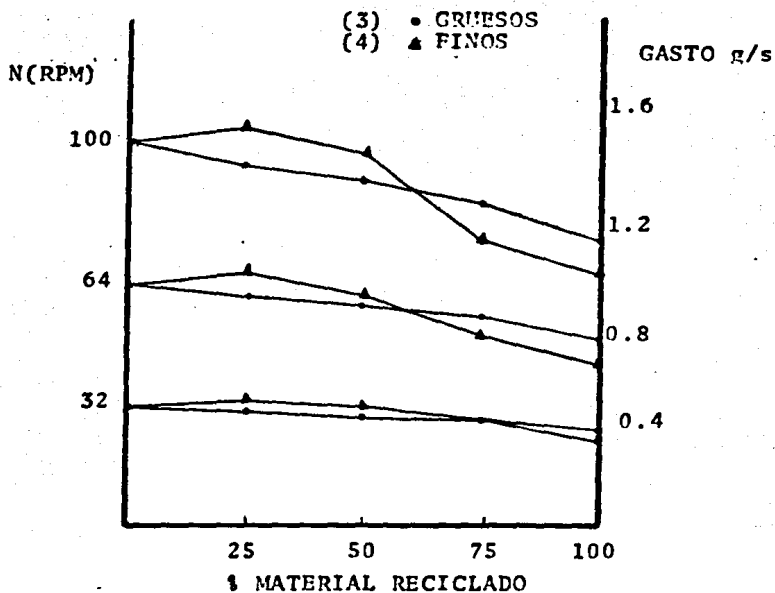
GRAFICA 7.14.-

GRAFICA DE TORQUE (Ω) V s. N(RPM)



GRAFICA 7.15.-

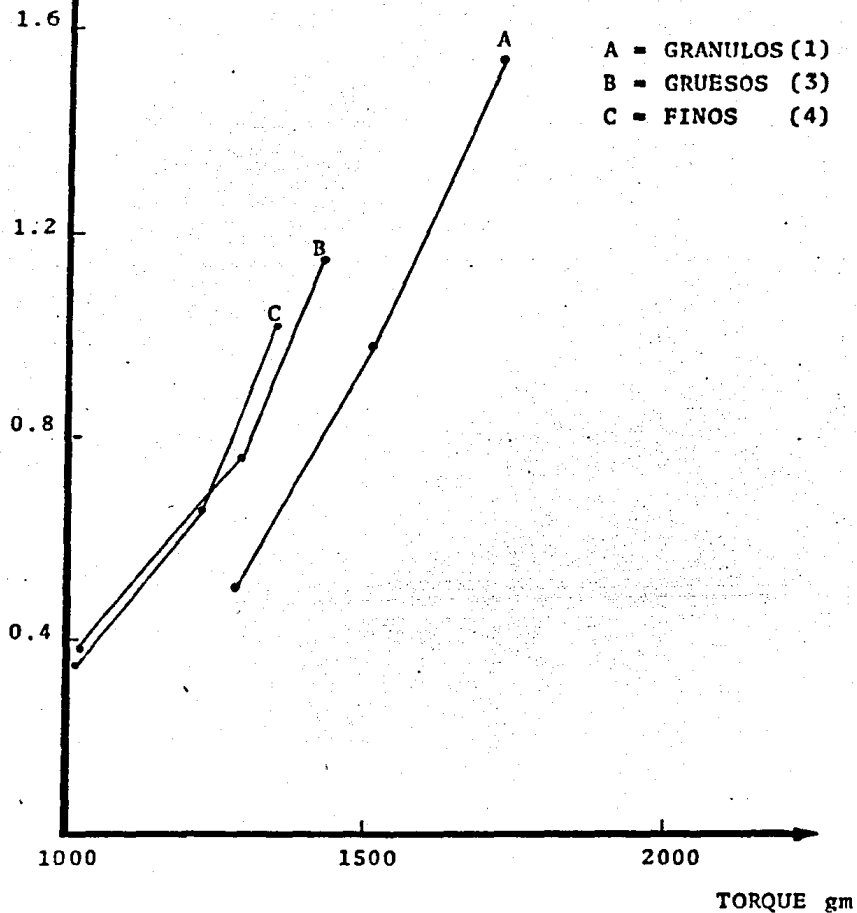
GRAFICA DE EXTRUSION COMPARANDO GASTO Vs, % MATERIAL RECICLADO EN FUNCION DE LAS REVOLUCIONES DEL TORNILLO.



GRAFICA 7.16.-

ANALISIS DE GASTO Vs. TORQUE

GASTO g/s



GRAFICA 7.17.-

TABLA 7.6.1 ANALISIS DEL PROCESO DE EXTRUSION USANDO DOS TAMAÑOS DE PARTICULA DIFERENTE (3 y 4).

PARAMETRO EN ESTUDIO: GASTO MASICO

100% Resina Virgen			
	32	64	100
	0.4890	0.9715	1.5231
	0.4920	0.959	1.5344
	0.4290	0.966	1.5214
	0.4903	0.9570	1.5205
G (g/s)	0.4888	0.9612	1.5268
σ	0.00275	0.01056	0.00585
U_G	0.5626	1.0918	0.3836
$U_{G/N}$	0.0176	0.0170	0.0038

75% Virgen / 25% Reciclada						
	32		64		100	
	Finos	Gruesos	Finos	Gruesos	Finos	Gruesos
	0.5040	0.4650	0.9981	0.9260	1.5840	1.4141
	0.5043	0.4619	1.010	0.9080	1.5580	1.426
	0.5030	0.4590	1.008	0.9140	1.5883	1.4380
	0.5032	0.4530	1.004	0.8970	1.5713	1.4458
G(g/s)	0.5036	0.4597	1.0053	0.9112	1.5754	1.4310
σ	0.00275	0.01056	0.0052	0.01209	0.0136	0.0139
U_G	0.1191	1.1094	0.5173	1.2268	0.8659	0.9706
$U_{G/N}$	0.0037	0.0347	0.0080	0.0208	0.009	0.0097

TABLA 7.6.1. -

CONTINUACION.

50% Resina virgen / 50% Resina Reciclada						
32		64		100		
Finos	Gruesos	Finos	Gruesos	Finos	Gruesos	
0.4780	0.4437	0.9045	0.8717	1.4679	1.3955	
0.4883	0.4269	0.9065	0.8193	1.4565	1.3636	
0.4776	0.4330	0.9219	0.8817	1.4662	1.3713	
0.4731	0.4429	0.9222	0.8743w	1.5036	1.3655	
G(g/s)	0.4775	0.4363	0.9137	0.8767	1.4735	1.3736
σ	0.0033	0.0081	0.0095	0.0045	0.02065	0.0137
\bar{U}_G	0.6910	1.8565	1.0397	0.5132	1.4014	0.9913
$U_{G/N}$	0.0216	0.058	0.0162	0.0080	0.0140	0.0100

25% Resina Virgen/ 75% Resina Reciclada						
32		64		100		
Finos	Gruesos	Finos	Gruesos	Finos	Gruesos	
0.4274	0.4274	0.7724	0.8180	1.1518	1.2756	
0.3903	0.4215	0.7720	0.8268	1.1942	1.2847	
0.4189	0.4130	0.7330	0.8250	1.1955	1.2697	
0.4011	0.4220	0.7448	0.8167	1.1510	1.2785	
G(g/s)	0.4095	0.4209	0.7555	0.8198	1.1731	1.2771
σ	0.0059	0.0056	0.020	0.0073	0.025	0.0006
\bar{U}_G	1.4407	1.3304	2.6472	0.8904	2.1311	0.0467
$U_{G/N}$	0.045	0.0415	0.0413	0.014	0.0213	0.0004

TABLA 7.6.1. CONTINUACION.

Resina 100% Reciclada						
32		64		100		
Finos	Gruesos	Finos	Gruesos	Finos	Gruesos	
0.3365	0.3724	0.6020	0.7518	1.040	1.1275	
0.3300	0.3828	0.6610	0.7456	1.017	1.1385	
0.3576	0.3720	0.6612	0.7385	1.043	1.1330	
0.3407	0.3705	0.6306	0.7465	1.055	1.1428	
G(g/s)	0.3412	0.3746	0.6387	0.7456	1.038	1.1354
σ	0.0112	0.0055	0.0283	0.00546	0.0159	0.0067
U_G	3.45	1.468	4.43	0.732	1.531	0.585
$U_{G/N}$	0.108	0.046	0.069	0.0114	0.0163	0.006

TABLA 7.6.2.- ANALISIS DEL PROCESO DE EXTRUSION USANDO DOS TAMAÑOS DE PARTICULA DIFERENTE (3 y 4).

PARAMETRO EN ESTUDIO: TORQUE

		Material 100% virgen					
		32	64	100			N (RPM)
		1237.2	1507.5	1712.5			$\bar{\rho}$ (g/cm)
		38.0	37.75	6.45			σ
		3.0	2.5	0.37			U _G
75% Virgen/25% Reciclado			75%Virgen/25% Reciclado				
Fino	Fino	Fino	Grueso	Grueso	Grueso	MTL	
32	64	100	32	64	100	N (RPM)	
1527.0	1668.0	1851.2	1280.0	1452.7	1660.0	$\bar{\rho}$ (g/cm)	
67.6	46.07	13.77	49.15	39.46	38.08	σ	
4.4	2.76	0.74	3.83	2.71	2.29	U _G	
50% Virgen/50% Reciclada			50% Virgen/50% Reciclada			MTL	
Fino	Fino	Fino	Grueso	Grueso	Grueso	MTL	
32	64	100	32	64	100	N (RPM)	
1237.5	1525.0	1759.2	1221.2	1376.2	1588.0	$\bar{\rho}$ (g/cm)	
28.72	75.16	21.65	28.26	35.44	60.54	σ	
2.23	4.92	1.23	2.31	2.57	3.8	U _G	

CONTINUACION TABLA 7.6.2.-

25 Virgen / 75% Reciclado			25% Virgen/75% Reciclado			
Finos	Finos	Finos	Gruesos	Gruesos	Gruesos	MTL
32	64	100	32	64	100	N (RPM)
1098.5	1315.2	1428.5	1127.5	1322.5	1562.5	(mm)
91.46	50.16	38.59	11.90	30.68	34.76	σ
8.32	3.81	2.70	1.05	2.31	2.2	UG
100% Reciclado			100% Reciclado			MTL
32	64	100	32	64	100	N (RPM)
971.0	1218.7	1348.7	1022.5	1286.5	1426.2	(mm)
26.84	68.42	70.75	38.23	16.70	31.3	σ
2.76	5.61	5.24	3.7	1.20	2.18	UG
Finos	Finos	Finos	Gruesos	Gruesos	Gruesos	MTL

7.7.- INFLUENCIA DEL TAMAÑO Y FORMA DE PARTICULA SOBRE EL PROCESO DE EXTRUSION

Tomando como base el gasto obtenido al extruir resina virgen (gránulos), analizaremos la influencia del tamaño y forma de partícula en el proceso de extrusión. La gráfica - 7.18 muestra que el gasto presentó una disminución más significativa, cuando la resina reciclada presenta mayor tamaño y morfología demasiado irregular. Esto se justifica, ya que el material forma espacios vacíos dentro de la tolva de alimentación, lo que provoca demasiada discontinuidad en la misma sección de alimentación.

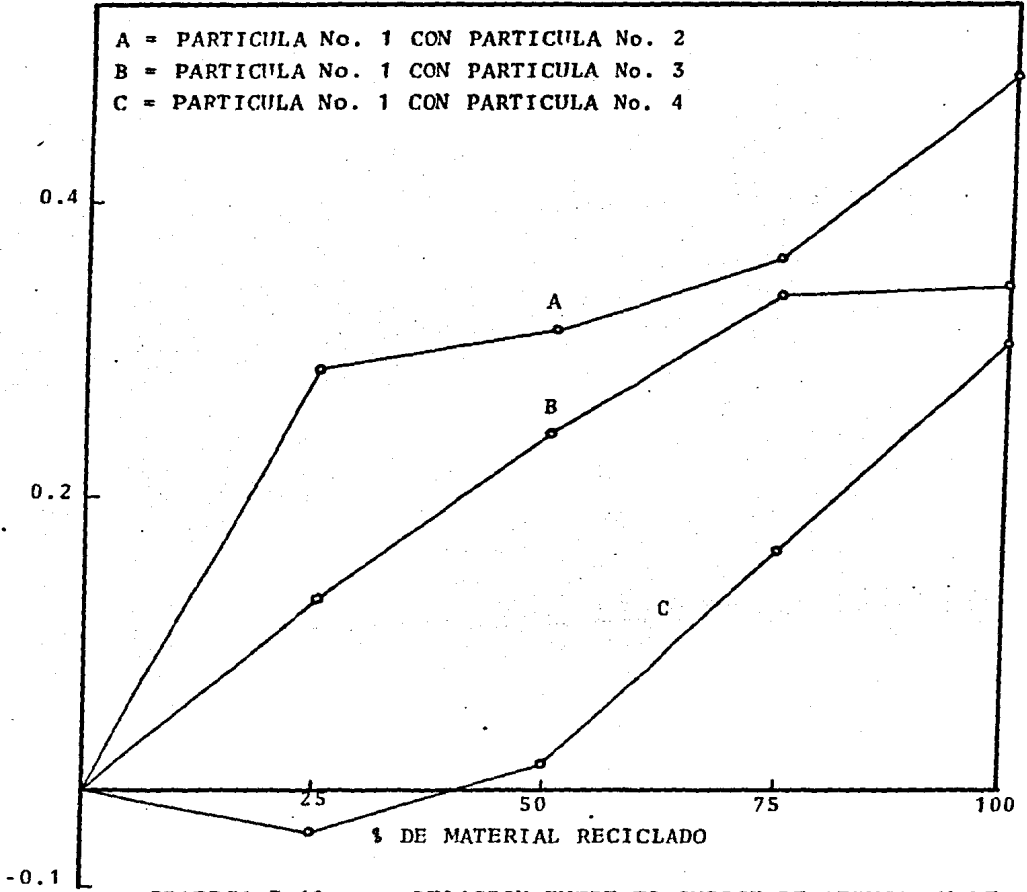
Gráficamente observamos que a medida que disminuye el tamaño de partícula, las condiciones de procesamiento mejoran, a excepción del tamaño No. 4, que presenta una forma irregular y su peso específico, comparado con los otros tipos de partícula, es mucho menor.

Con respecto a las mezclas de gránulos, con los otros tres tipos de partícula, notamos que para una concentración de material reciclado de 25 % del tipo de partícula No. 4, presentaron mejores condiciones para el procesamiento. Esto se debió a que no se presentaron problemas de flujo y, además, el material pequeño se funde más fácilmente; de ahí que, para esta concentración, el gasto de material fundido fue ligeramente superior al obtenido, utilizando gránulos.

Para una mezcla con el tipo de partícula No. 2, se presen-

tó una caída en el flujo másico bastante significativa, porque produjo el mismo efecto descrito anteriormente. En general, las mejores condiciones para el procesamiento de mezclas de material virgen y reciclado, se llevan a cabo cuando el gránulo es mezclado con el menor tamaño de partícula de resina reciclada (exclusivamente cuando la concentración de material reciclado es de 25 %).

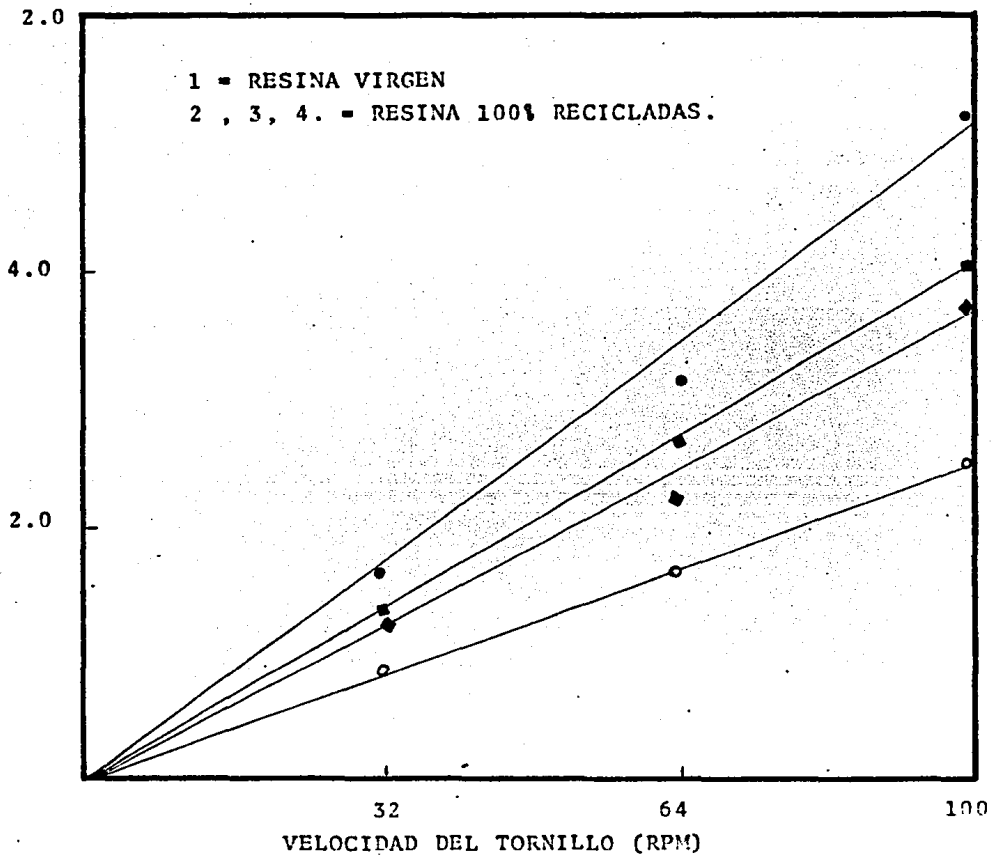
S



GRAFICA 7.18.- RELACION ENTRE EL INDICE DE REDUCCION DE FLUJO MASICO Y EL PORCENTAJE DE MATERIAL RECICLADO COMPARANDO DIFERENTES TIPOS DE PARTICULA.

REPRESENTACION GRAFICA DEL GASTO Vs. VELOCIDAD DEL
TORNILLO PARA LOS 4 DIFERENTES TIPOS DE PARTICULA.

2>3>1>4



GRAFICA 7.19.-

**TABLA 7.7.1.- ANALISIS DEL PROCESO DE EXTRUSION
 UTILIZANDO 4 TIPOS DIFERENTES DE PAR-
 TICULA.**

**PARAMETRO EN ESTUDIO: INDICE DE REDUCCION
 DE FLUJO MASICO**

No. Partfcula	V/R	S
1	100/0	0
2	75/25	0.2838
	50/50	0.3070
	25/75	0.3545
	0/100	0.4743
3	75/25	0.1305
	50/50	0.2387
	25/75	0.3347
	0/100	0.3363
4	75/25	-0.0305
	50/50	0.0231
	25/75	0.1622
	0/100	0.3000

TABLA 7.7.2.- RESULTADOS OBTENIDOS AL ANALIZAR EL PROCESO DE EXTRUSION EXPERIMENTANDO CON TIPOS DE PARTICULA DIFERENTES (1, 2, 3 y 4).

Tipo de - partícula	V/R	S	U_G/N %/RPM	ϵ	$\bar{\mu}/N$ gm/RPM	E Kg/KW/hr.
1	100/0	0	0.0731	0.1909	0.2878	54.052
2	75/25	0.2838	0.556	0.2283	0.2464	45.18
	50/50	0.3070	0.3625	0.2618	0.2734	39.41
	25/75	0.3545	0.1096	0.2766	0.2691	37.29
	0/100	0.4743	0.2489	0.4117	0.3263	29.95
3	75/25	0.1305	0.075	0.2429	0.3063	42.46
	50/50	0.2387	0.1121	0.2518	0.2787	40.97
	25/75	0.3347	0.5362	0.2859	0.2760	36.08
	0/100	0.3363	0.0967	0.287	0.2762	35.96
4	75/25	-0.0305	0.0037	0.288	0.4718	35.83
	50/50	0.0231	0.0216	0.257	0.3940	40.09
	25/75	0.1622	0.045	0.241	0.3217	40.73
	0/100	0.300	0.108	0.277	0.3073	37.27

TABLA 7.7.3.- ANALISIS DEL PROCESO DE EXTRUSION UTILIZAN-
DO 4 TIPOS DE PARTICULAS DIFERENTES.
PARAMETRO EN ESTUDIO: GASTO MASICO.

No. partfcula	N(RPM)	Gasto=Kh/Hr
1	32	1.6675
	64	3.1716
	100	5.1804
2	32	0.8766
	64	1.600
	100	2.4847
3	32	1.340
	64	2.684
	100	4.080
4	32	1.22
	64	2.29
	100	3.737

CAPITULO O C H O

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo matemático, propuesto en el presente trabajo, se ajustó - de manera cualitativa - a nuestros resultados, pues tanto la resina virgen, como la resina reciclada, presentan una tendencia similar a la obtenida, - usando el modelo. Cuantitativamente no podríamos predecir con certeza que el procesamiento de PEAD se ajuste al mismo modelo, ya que el intervalo de caída de presión, de la curva teórica, con respecto a las dos curvas experimentales, difiere grandemente. Dentro de las medidas de caída de presión, se tuvieron limitaciones, ya que las medidas que registró el transductor de presión, presentaban intervalos de variación demasiado grandes, pequeñas discontinuidades en la alimentación, etc.

Tomando como referencia los valores obtenidos de -- modulo a la tensión para resina virgen, las mezclas de ésta con diferentes concentraciones de material reciclado, así como la resina 100 % reciclada, presentaron una conducta - casi similar, lo que nos lleva a determinar que la resistencia mecánica del material, no se ve afectada. Sería recomendable que, en trabajos posteriores, se estudiaran otras propiedades mecánicas (Resistencia al impacto, Tracción etc.) para determinar, cuál de ellas es más sensible al ma

terial y corroborar los resultados anteriores.

Comparado con la extrusión del material virgen, la concentración óptima de material reciclado determinada, fué de 25 %. Los parámetros obtenidos y analizados con ésta concentración, son los que se asemejan más a los obtenidos al ex-truir tal resina. Por ejemplo, dada la caracterización reológica obtenida, la viscosidad del material virgen, así como la del material reciclado, fué casi idéntica, lo que indica que el procesar material reciclado no se afecta la eficiencia del proceso de extrusión. Por otra parte, al analizar el índice de reducción de flujo másico, el valor obtenido para esta concentración, presentó la menor caída en el gasto y, además, el consumo de energía menor. Conforme se aumentaba la concentración de material reciclado, las condiciones para el procesamiento se ven afectadas en forma directa. La razón de esto se debe a que la morfología irregular de las partículas provoca espacios vacíos en la tolva de alimentación, conduciendo esto a una alimentación discontinua que repercute en el gasto de material --fundido. Además, la eficiencia, tanto desde el punto de vista de la cantidad de material obtenido por hora (gasto), como también desde el punto de vista del consumo de potencia.

Los datos obtenidos por envejecimiento acelerado, muestran que nuestro material, sujeto a exposición natural, podría durar aproximadamente 2 años sin dañar seriamente sus propiedades mecánicas. Esto nos indica que cualquier producto que se haga con una concentración de material reciclado de 25 %, pue-

de permanecer el tiempo suficiente en exposición natural sin causar problemas de apariencia, color, etc., siempre y cuando se utilicen estas mismas formulaciones con las mismas materias primas con que se experimentó. (Dato comparativo con material virgen especificado en la Tabla 7.3.1.-).

Con respecto a la importancia que tiene la morfología y tamaño de partícula sobre el proceso de extrusión, se determinó que éstas características juegan un papel muy relevante -- sobre éste. Se ha descubierto que las mejores condiciones obtenidas para tal proceso, se presentaron cuando se utilizó el tamaño de partícula más pequeño y, además, con una forma más regular.

Analizando los resultados obtenidos, se puede decir de una manera concreta, que el material en estudio puede ser reciclado. Esta posibilidad puede contribuir a solucionar en -- gran parte los daños ecológicos que produce la disposición de materiales plásticos, en vista de su no degradabilidad. Además, el ahorro energético que esto representa, es de mucha importancia, considerando la situación económica actual en nuestro país. (Ahorro en consumo de materias primas y de la energía necesaria para polimerizar el material).

Por otra parte es conveniente tener en cuenta las limitaciones que tiene el reciclar del material específico de todo un conjunto de plásticos y, aún más, de toda la basura en general. En suma, el proceso de purificación viene a ser el punto que determina la rentabilidad del proceso. El proceso de puri-

ficación podría facilitarse, si hicieramos algunas recomendaciones tales como:

- a) Hacer campañas para concientizar a la sociedad sobre la importancia de la separación y clasificación de materiales plásticos al desecharlos en la basura.
- b) Proponer una iniciativa económica para que el mismo consumidor colecte algunos tipos de plásticos separadamente.

* Development of a New Composite Material from Waste Polymers, Natural Fiber and Mineral Fillers.

Amando Padilla Ramírez and Antonio Sánchez Solís
Journal of Applied Polymer Science, Vol. 29, 2405-2412, 1984.

A P E N D I C E I

A P E N D I C E I

DESCRIPCION DEL INSTRUMENTO BASICO DE CARACTERIZACION.

Después de la discusión sobre el objetivo de la reología, consideramos la unidad mediante el cual opera éste. Se usó una INSTRON STANDARD para pruebas de tensión, tal como se muestra en la figura 1.1, modelo TT, que cubre escalas de carga de 2 g a 4,540 kgs.

Sencillamente, el probador de tensión consiste en un sistema de medición de carga que posee una alta sensibilidad y un puente de medida (deformímetro). Usa un servo-motor y monitor para mover el cabezal y un sistema de graficación de precisión, empleando un registrador modificado LEEDS & NORTHRUP. La pluma horizontal registra trazos para la carga y el movimiento vertical del papel. Está sincronizadamente manejada en forma proporcional al movimiento del cabezal. (31).

El papel importante de esta unidad es que el movimiento del cabezal, es decir, su velocidad, puede mantenerse absolutamente constante. Los cambios de velocidad pueden ser efectuados oprimiendo un botón. La carga puede ser medida con una desviación del $1/2\%$ para cada uno de los rangos. Cada celda de carga tiene 6 rangos de escala en la relación 1 : 50. En resumen, un Switch de sensibilidad alta puede incrementar ésta, en cualquier rango, por un factor de 5. Los circuitos de control del cabezal pueden mover éste hacia arriba ó hacia abajo ó parar la máquina y, ajustando las perillas, puede ser automatizada, parando la

máquina, escogiendo una posición inferior ó superior al cabezal.

EXTRUSION EN EL REOMETRO Y CONTROL DE LA TEMPERATURA

El reómetro consiste en un barril de 40/40.7 cm de largo y un diámetro de 0,952 cm, forrado por un calentador en la parte superior, media e inferior y tiene también adaptado un anillo calentador en la parte superior para balancear las pérdidas de calor en la parte superior del barril. Un émbolo conectado en la parte superior por una esfera, conectada a la parte inferior de la celda de medición de carga, forzando el extrudado, a través de un capilar enroscado en la parte baja final del barril. El interior del barril está pulido con una exactitud como para eliminar fugas entre el émbolo y el barril, donde el capilar tiene adaptado un O'ring para prevenir fugas. 4 termopares a lo largo del barril, taladrado a una profundidad de 0.152 cm hacia el interior, permiten la inserción de un termopar para medir el perfil de temperaturas a lo largo del barril. La región media del intercambiador es usada para propósitos de control. El ensamble de extrusión es sostenido por un marco que ha sido previamente alineado. (32).

Los cables de potencia del calentador son conectados a una serie de enchufes en la parte posterior del ensamblamiento completo. Diferentes capilares son usados con diámetros en un rango de 0.05 cm a 0.152 cm y unas longitudes de 1.27 cm a 10.1 cm, dando un rango general de relaciones L/D.

El sistema de control de temperatura consiste en un indicador LEEDS NORTHRUP SPEEDOMAX H, usado en conjunción con un control

lador C.A.T. Este sistema tiene un control proporcional, rate y un reset, es decir, la energía eléctrica es alimentada por los calentadores, de acuerdo a la cantidad de temperatura que ha sido fijada, así como en proporción al rate, el cual ha sido variado desde una posición con el control proporcional, durante un tiempo cuando la variación ocurre. El resultado es -- que, en teoría, las variaciones de temperatura pueden ser controladas exactamente con una variación de $\pm 1/2^{\circ}\text{C}$, aunque, en la práctica parecen ser del orden de uno ó dos grados.

Para realizar el control preciso de los perfiles de temperatura a lo largo del barril, la parte superior e inferior de los calentadores pueden ser variadas separadamente por medio de un reostato. El calentador de anillo es alimentado con un porcentaje fijo de voltaje que alimenta la mitad del calentador.

Todos los calentadores son normalmente alimentados a través de conectores y amplificadores magnéticos. El control de giro es regulado por el indicador de temperatura y por la unidad de control C.A.T.

Por otra parte, para dar un calentamiento inicial rápido en la parte superior, se lleva a cabo un precalentamiento. Esto se hace automáticamente con un interruptor sobre el controlador de temperatura. Este trabaja de 10 a 345°C .

OPERACION DEL REOMETRO

La celda de carga es primero calibrada colgando pesos conocidos y puesta en cero, balanceando y calibrando los controles -

del probador de tensión, de tal manera que la celda es lineal para tensión y compresión. Enseguida, el controlador de temperatura es fijado a la temperatura deseada, permitiendo su estabilización. Si queremos trabajar a temperatura ambiente, esto puede -- llevar de 20 minutos a una hora.

La muestra, usualmente en forma de polvo ó gránulos de polímero, es cargada dentro del barril (una pequeña cantidad a un -- tiempo) y es apisonada hacia abajo con un brazo especial provisto de una varilla, para evitar la posibilidad de oclusión de aire en el fundido que dará un trazo de fuerza errática.

Ciertos tipos de muestras pueden ser directamente fundidas - en recipientes, tomando usualmente de 3 a 5 minutos. Esto se lleva a cabo insertando el émbolo y forzando hacia abajo por medio - del movimiento del cabezal. Para prevenir torceduras del émbolo, es aconsejable iniciar con bajas velocidades del cabezal, resultando fuerzas bajas, hasta que el émbolo ha pasado una buena distancia del barril (33).

Las perillas más bajas son movidas para que el instrumento - automáticamente pare de trabajar, cuando la base del émbolo ha - llegado hasta 5.08 cm de la entrada del capilar. Usando el botón selector de velocidad, el cabezal puede ser manejado hacia abajo, incrementando las velocidades, una vez que las cargas registradas han sido estabilizadas. 8 ó más esfuerzos cortantes pueden, usualmente, ser cubiertos con una muestra de carga en el barril. Una - vez que el émbolo ha llegado a la posición más baja, puede fácilmente ser retirado, regresando el movimiento del cabezal.

MEDICION Y EVALUACION DE RESULTADOS

Básicamente por cada carga extruída, una curva es obtenida. Cada nivel de carga representa un cierto esfuerzo cortante y corresponde a una rapidez de deformaci3n dada. La rapidez es calculada por la velocidad a la que el émbolo es manejado dentro del barril. El extrudado puede también ser obtenido para cada rapidez de deformaci3n, haciendo mediciones. Las ecuaciones básicas son mostradas a continuaci3n:

ESFUERZO CORTANTE:

$$S = \frac{F}{4A_p(L_c/d_c)}$$

donde:

- S = Esfuerzo de corte lb/in²
F = Fuerza del émbolo lb
A_p = Area del émbolo in²
L_c = Longitud del capilar in
d_c = Diámetro del capilar in

RAPIDEZ DE DEFORMACION:

$$D = 2/15 \frac{V_{xh} d_p}{d_c^3}$$

- D = Rapidez de deformaci3n 1/min.
V_{xh} = Velocidad del cabezal cm/
d_p = Diámetro del émbolo cm
d_c = Diámetro del capilar

Viscosidad Aparente = S/D. Ciertos nomogramas son aprovechados para facilitar el cálculo de la rapidez de deformaci3n y esfuerzo cortante de una velocidad de cabezal dada y fuerza del émbolo medida para L/D del capilar dado. (34).

CORRECCION DE ERRORES

1) Con respecto a la relación L/D de los capilares.

El aspecto de la relación L/D del capilar puede tener un efecto pronunciado sobre la viscosidad del fundido. Una cierta cantidad de energía es requerida para transportar el material del barril largo del reómetro al capilar pequeño y provoca que la caída de presión, la entrada del capilar, sea más grande que la esperada para un flujo, en estado estacionario, en el capilar. Este error puede ser corregido con relaciones L/D grandes del capilar. El efecto puede ser corregido en conjunto, cuando la L/D es más grande que 20.

2) FRICCIÓN:

Normalmente la fuerza de fricción del émbolo es despreciada, comparada con la caída de presión a través del capilar. Esto puede, sin embargo, ser medido fácilmente, haciendo una corrida sin carga a varias velocidades de cabezal, sustrayendo la lectura, si es significativa de la lectura de la celda de carga.

3) COMPRESIBILIDAD:

Algunos fluidos son compresibles para un grado significativo. La caída, en presión hidrostática a lo largo del capilar, resulta en un decremento en la densidad del fluido y, consecuentemente, de un incremento en la rapidez de deformación a lo largo del capilar.

4) EFECTOS DE TEMPERATURA:

La temperatura de la muestra puede aumentar a lo largo del capilar, debido a la fricción intermolecular a la alta rapidez de deformación. Este efecto es normalmente corregible por un factor de corrección que puede ser aplicado para la viscosidad medida, considerando el marcador de temperatura a la entrada y a la salida.

5) ERROR DEL CAPILAR LARGO:

Para capilares cortos de diámetro grande, la caída de presión en el barril puede llegar a ser significativamente relativa a la caída de presión en el capilar. Bajo condiciones isotérmicas, la caída de presión de materiales newtonianos varía como:

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{L_1}{L_2} R_2/R_1^4$$

donde los sufijos 1 y 2 se refieren al barril y capilar respectivamente.

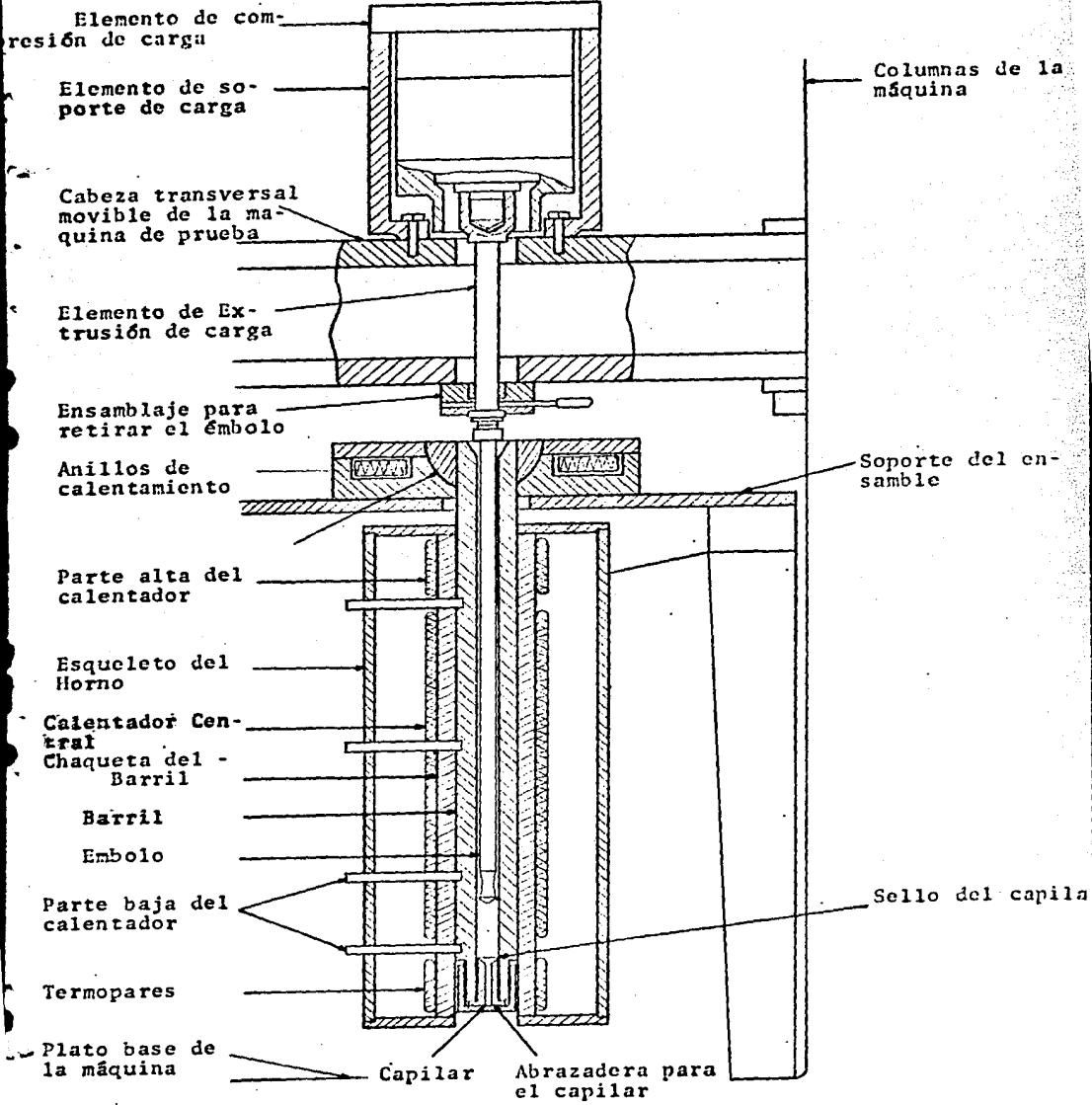
La fórmula para rapidez de deformación puede requerir un factor de corrección aplicado para materiales no newtonianos.

$$F = A D^n.$$

La potencia constante provee el criterio para corregir la rapidez de deformación aparente en las paredes de la rapidez de deformación no newtoniana. La ecuación anterior debe ser multiplicada por $(3n+1)/4n$, de acuerdo a la ecuación de RABINOWITSCH.

(35).

FIG 3.2 ENSAMBLE DEL PISTÓN DE EXTRUSION



CAPITULO NUEVE

BIBLIOGRAFIA

- (1) Ramón Anguita Delgado
Extrusión de Plásticos
Parte 1° Teoría y Equipos
H. BLUME EDICIONES
Madrid, 1977-
- (2) O. Laguna Castellanos y R. Arganza
Estudio para el aprovechamiento de los residuos de materiales
plásticos
Plasti-noticias
Agosto 1981
- (3) C. Rangel Nafaile, A. García Rejón, L. López Latorre, A.
García León.
Polyethylene products Manufactured with well-characterized
recycled resins.
Chem. Eng. Commun. Vol. 24; pp. 147-161
U.S.A. 1983
- (4) Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. IPN.
Seminario de Ecología Humana
Coordinación de Educación del canal 11
Agosto 1984
- (5) Dr. G. Bunder, Marl
- (6) Las propiedades del material como expresión de la constitu-
ción química. Poliolefinas.
Kunststoffe. Plásticos 1973.

- (7) Dr. H. Glaser, Ludwigshafen
Lewis F. Hatch y Saml Matar
Poliiolefinas. Kunststoffe Plásticos 1973
From Hydrocarbons to Petrochemicals parts 15, 16, 17.
Hydrocarbon Processing, Sept. 1979
- (8) I N F O T E C
- (9) Polietileno de Alta densidad (PEAD)
- (10) Fuente: ANIQ, PEMEX.
- (11)
- (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18)
Plásticos Universales.
El Mercado de Materiales Plásticos en Europa Occidental.
Servicio Tecnológico de la revista alemana "Kunststoffe".
Plásticos, 1980.
- (19) CYDSA, POLICYD, S.A.
Como elegir una máquina para la extrusión de Termoplásticos
S/N.
Blvd. Cervantes Saavedra No. 255, México 17, D.F. s/año
- (20) C. Rangel, L. López Latorre, A. García Rejón.
Importancia del comportamiento termomecánico de resinas
termoplásticas. Relación con el proceso de Extrusión.
I.I.M. U.N.A.M.
México, 1983.
- (21) Ramón Anguita Delgado
Extrusión de Plásticos
Parte 1º Teoría y Equipos
H. Blume, Ediciones.
Madrid, 1977
- (22) Middleman, S.
Fundamentals of Polymer Processing
John Wiley and Sons, N.Y. 1979

- (23) Dr. Andrés García Rejón
Introducción a la Reología de los Polímeros
Plasti-noticias
Septiembre 1981.
- (24) Carlos Rangel Nafaile
Los Plásticos: materiales del siglo XX.
Colección: Imágenes de la Naturaleza.
S.E.P. U.N.A.M. México (en prensa)
- (25) C. Hall
"Polymer Materials"
The MacMillan Press Ltd.
Hong Kong, 1981
- (26) Delarme J.
Seminario sobre Plásticos
Hule Mexicano y Plástico
Año 21, No. 250
1966, Pag. 23-25
- (27) Wallder, J.T. et. Al.
Weathering studies un PE Ind. Eng.
Chemical Engineering, Vol. 42, No. 1
1950, Pag. 20, 23, 27.
- (28) Douglas M. Grossman
Manual del Intemperómetro
The QUV, Accelerated Weathering Tests.
The Q, Panel Co.
15610, Industrial Pkwy, Cleveland, Ohio, 44135
- (29) F.H. Winslow and L. Hawkins
Some Wheathering Characteristics of Plastics,
No. 4, pags. 29-39, 1967
APPLIED POLYMER SYMPOSIA

(30) Christopher Hall
Polymer Materials
An Introduction for Technologists and scientists
Chapter 5.7 - Foto-oxidation, pags. 126, 127
MA, D, Phil (Oxford) M.R.I.C.
Lecturer in Building
University of Manchester Institute of Science and
Technology.

(31) (32) (33) (34) (35)
George G. Zahler y G. Roger Murfit
Manual del Reómetro Capilar
Instron Limited, High Wycombe, Bucks