



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**PRODUCCION DE NANOCOMPUESTOS
DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD
Y ARCILLAS MODIFICADAS POR
EXTRUSION UTILIZANDO UN CABEZAL
MEZCLADOR ESTATICO**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO

PRESENTA:
MARTIN MEMBRILLO FLORES



MEXICO, D. F.

2006



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 esta 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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Q. BENJAMIN RUIZ LOYOLA
VOCAL: M. en C. MINERVA ESTELA TELLEZ ORTIZ
SECRETARIO: DR. ANTONIO SANCHEZ SOLIS
1ER SUP.: DR. Ma. DE LOS ANGELES VARGAS HERNANDEZ
2DO SUP.: DR. FEDERICO GOMEZ GARIBAY

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES



U.N.A.M.

DR. ANTONIO SANCHEZ SOLIS
ASESOR DEL TEMA.

MARTIN MEMBRILLO FLORES
SUSTENTANTE.

DEDICATORIAS

A DIOS LE AGRADEZCO SU INFINITA MISERICORDIA Y SABIDURIA POR HABERME DADO PACIENCIA LUCIDEZ Y TENACIDAD PARA SEGUIR EN EL CAMINO DE LA VIDA.

A MIS PADRES TERESA FLORES SERRANO Y PEDRO BIBIANO MEMBRILLO ALFARO POR SU INCANZABLE ESFUERZO, AMOR Y APOYO EN ESOS MOMENTOS DIFICILES DE LA VIDA A ELLOS LES DEBO LO QUE SOY, MAMA, PAPA GRACIAS.

A MIS HERMANOS GUADALUPE, PEDRO, GREGORIO, Y LUZ POR SU COMPRESION APOYO Y SER UN EJEMPLO A SEGUIR PARA ELLOS MI MAS SINCERO RECONOCIMIENTO Y APRECIO.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS POR SU AMISTAD Y COMPAÑIA QUE HICIERON INOLVIDABLE MI ESTANCIA EN LA UNIVERSIDAD PARA ELLOS HUGO, DAVID, PEDRO, FRANCISCO, HERBIE, CARLOS, GEORGINA, PAOLA, NORMA, OLGA, EDITH, ROSA, VALERIA, AZUCENA, VERONICA, LETICIA, MARJA, IVONNE, VICTOR, EDGAR, DANIEL, GABRIELA Y EN ESPECIAL A SANDRA, JANETH Y CITLALI

Agradecimientos

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Por ser un verdadero espacio para la educación y desarrollo de personas académicas con valor social.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

Por ser el lugar donde se me dio la oportunidad, para el desarrollo de esta tesis.

DR. ANTONIO SANCHEZ SOLIS

Por ser la persona que me brindo su gran conocimiento en polímeros, su gran experiencia en procesamiento y desarrollo de nuevos campos de estudio en polímeros, por mostrarme los caminos de la sabiduría y permitirme ser parte de su selecto grupo de alumnos, a la persona más sensata y humana mi agradecimiento.

DRA. MIRNA ESTRADA

Por ser parte del trabajo de modificación de las arcillas en laboratorio, además de ser una guía gracias.

I. Q. ERNESTO SANCHEZ COLIN, en el área de Pruebas mecánicas de materiales.

DR. ALFREDO MACIEL CERDA, en el área de Procesamiento de polímeros.

I.Q. LETICIA BAÑOS

Por las determinaciones de rayos x

Q. MIGUEL ANGEL CANSECO MARTINEZ

Por su apoyo en la realización de caracterización química, física y térmica de materiales

A el Sr. Martin Serrano en el área del Taller para la realización del cabezal

A Issis Claudette Romero Ibarra, por su ayuda y compañía para complementar el trabajo.

A Edith Zarco Silva por su ayuda en el procesamiento de polímeros.

	Pág.
1 INTRODUCCION	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Objetivos particulares	2
1.3 Hipótesis	3
2 GENERALIDADES	4
2.1 Polímeros	4
2.1.1 Clasificación de los polímeros	4
2.1.2 Fuerzas de van Der Waals	5
2.1.3 Síntesis	6
2.1.4 Copolimerización	6
2.2 Polietileno	8
2.2.1 Materias primas	8
2.2.2 Polimerización	9
2.2.3 Clasificación	9
2.2.4 Análisis por estructura	10
2.2.5 Polietileno de alta densidad	11
2.2.6 Propiedades	11
2.2.7 Aplicaciones	14
2.3 Silicatos	15
2.3.1 Estructura	16
2.3.2 Clasificación	17
2.3.3 Arcillas	18
2.3.4 Filosilicatos	18
2.3.5 Clasificación	19
2.3.6 Estructura	20
2.3.7 Grupo de las esmécticas	22
2.3.8 Montmorillonita	22
2.3.9 Estructura	23
2.3.10 Modificación química	25
2.4 Nanocompuestos	29
2.4.1 Nanocompuestos con arcillas	29
2.4.2 Síntesis de nanocompuestos poliméricos	30
2.4.3 Dispersión, intercalación y exfoliación de la arcilla	31
2.4.4 Nanocompuestos con polietileno	32
2.5 Mezcladores	35
2.5.1 Tipos de mezcladores	35
2.5.2 Mezcladores estáticos	38
2.5.3 Cabezal Mezclador Estático	39

2.6	Reología	44
2.6.1	Esfuerzo	45
2.6.2	Rapidez de corte	46
2.6.3	Esfuerzo cortante	47
2.6.4	Flujo extensional	48
2.6.5	Fluidos Newtonianos	49
2.6.6	Fluidos no Newtonianos	50
2.6.7	Fluidos dilatantes	51
2.6.8	Fluidos pseudoplásticos	51
2.6.9	Plásticos de Bingham	52
2.6.10	Fluidos tixotropicos	52
2.6.11	Fluidos reopecticos	52
2.6.12	Fluidos Viscoelásticos	52
3	PROCESAMIENTO	53
3.1	Extrusión	53
3.2	Extrusor de un husillo	53
3.3	Características de un extrusor monohusillo	54
3.4	Diseño del husillo	56
3.5	Extrusor doble husillo	57
3.6	Clasificación	59
3.6.1	Clasificación de acuerdo a la dirección de rotación y numero de tornillos	60
3.6.2	Clasificación de acuerdo al contacto de los tornillos	60
3.7	Extrusión reactiva	61
3.8	Inyección de plásticos	62
3.9	Ciclo de inyección	64
4	DESARROLLO EXPERIMENTAL	66
4.1	Materia prima y reactivos químicos	67
4.2	Equipos	69
4.3	Cálculos químicos y consideraciones	76
4.4	Desarrollo parte experimental	76
4.4.1	Preparación de la arcilla	77
4.4.2	Injerto del anhídrido maleico sobre polietileno	82
4.4.3	Preparación de nanocompuestos mediante el cabezal mezclador estático	84
4.4.4	Proceso de inyección para la obtención de probetas	85
4.5	Formulaciones	99
5	RESULTADOS Y DISCUSION	103
6	CONCLUSIONES	110
7	BIBLIOGRAFIA	112
8	APENDICE	115
8.1	Acrónimos	115
8.2	Glosario	117
8.3	Anexos	120



1.- INTRODUCCIÓN

Durante la década pasada se reportaron nuevas invenciones de una manera asombrosa en el creciente campo de la nanotecnología. Los nuevos materiales y los dispositivos hechos a escala ofrecen propiedades únicas y diversas comparadas con los producidos con procesos cotidianos, este hecho ha despertado una perceptible actividad en la investigación y desarrollo⁽¹⁾.

En esta área se está viendo un enorme crecimiento teniendo un potencial de mercado de billones de dólares; en electrónica, óptica, materiales, medicina, biotecnología y prácticamente todos los campos del conocimiento.

Los nanocompuestos son mezclas homogéneas de dos o más fases donde al menos una de ellas es de un tamaño aproximado de 1×10^{-9} m. Estos compuestos presentan mejores propiedades que los materiales separados, como esfuerzos a la tensión, a la compresión, a la flexión, al impacto, al desgarre, a la abrasión, resistencia a la flama y menor permeabilidad a los gases.

Dado que las propiedades de los nanocompuestos están directamente relacionados por el grado de mezclado existente entre sus fases, y considerando que los constituyentes por lo general son inmiscibles entre sí, obteniéndose compuestos pobremente mezclados. Por lo anterior, se diseñó y construyó un cabezal mezclador estático que produce esfuerzos extensionales para llevar a cabo una mejor mezcla de las fases y obtener mejores resultados.

En este trabajo se enfocó a la producción de nanocompuestos de polietileno de alta densidad injertado con anhídrido maleico y arcilla montmorillonita químicamente modificada con ácido 11-aminoundecanoico.



1.1 OBJETIVO

Producción de materiales nanocompuestos por extrusión de polietileno de alta densidad y arcillas modificadas utilizando un cabezal mezclador estático

1.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar la mejor relación de anhídrido maleico (MAH) y peróxido de benzoilo (BPO), para el injerto en el polietileno.
- Determinar los parámetros de procesamiento para el injerto de MAH
- Modificar químicamente las arcillas con el ácido 11-aminoundecanoico
- Determinar la mejor relación polímero/arcilla considerando la mejora de propiedades mecánicas.
- Determinar los parámetros de procesamiento para las mezclas polímero/arcilla
- Construcción de un cabezal mezclador estático para mejorar la dispersión y distribución de la arcilla en el polímero.
- Determinar los mejores parámetros de inyección de los nanocompuestos fabricados en los puntos anteriores para la obtención de probetas para caracterización mecánica
- Extender el conocimiento y área de estudio de los nanocompuestos poliméricos.



1.3 HIPOTESIS

La interacción del clorhidrato del ácido 11-aminoundecanoico en la arcilla producirá un efecto de compatibilidad de ésta con el polietileno de alta densidad injertado con anhídrido maleico.

La mezcla en fundido tendrá mejor dispersión y distribución de las laminas de arcilla al someterlo a fuerzas elongacionales en el cabezal mezclador estático.

El método producirá un nanocompuesto polimérico exfoliado con mejores propiedades físicas que el polímero precursor.



2 GENERALIDADES

2.1 POLIMEROS

La materia está constituida por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros. La palabra polímero se deriva de las palabras griegas “poli” y “meros” que significan “mucho” y “partes” respectivamente.

Los polímeros se producen por la unión de cientos o miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas.

Algunas parecen fideos, otras tienen ramificaciones, algunas más se asemejan a las escaleras de mano y otras son como redes tridimensionales.

Existen polímeros naturales de gran significado comercial como el algodón. La seda es otro polímero natural muy apreciado y es una poliamida semejante al nylon. La lana, la proteína del pelo de las ovejas, es otro ejemplo. El hule de los árboles de Hevea y de los arbustos del Guayule, son también polímeros naturales importantes.

En general, los polímeros tienen excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases, que son los puentes de hidrógeno y en cadenas grandes lo son las fuerzas de Van Der Waals. ^[4]

2.1.1 CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS

Los polímeros pueden clasificarse de diversas formas de acuerdo con:

1. Su origen: Naturales y sintéticos.
2. Su estructura molecular: Homopolímeros, copolímeros, terpolímeros, tetrapolímeros, pentapolímeros y multipolímeros.
3. La configuración de sus cadenas: Atácticos, isotácticos y sindiotácticos.
4. Su comportamiento frente al calor: Termoplásticos y termofijos.
5. Su aplicación y uso: Plásticos, fibras, textiles, elastómeros o substitutos de hule, etc. ^[5]



2.1.2 FUERZAS DE VAN DER WAALS

También llamadas fuerzas de dispersión, presentes en moléculas de muy baja polaridad, generalmente hidrocarburos. Estas fuerzas provienen de dipolos transitorios que provienen del movimiento de los electrones esto es, en cierto instante una porción de la molécula se vuelve ligeramente negativa mientras en otra región aparece una carga positiva equivalente, así se forman dipolos no permanentes. Estos dipolos producen atracciones electroestáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros formados por miles de estas pequeñas moléculas las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes, como en el caso del polietileno.

En la Tabla 1 se observa la variación de la densidad y la temperatura de fusión al aumentar el número de átomos de carbono en la serie de los hidrocarburos. Los compuestos más pequeños son gases a la temperatura ambiente. Al aumentar progresivamente el número de carbonos los compuestos se vuelven líquidos y luego sólidos, cada vez con mayor densidad y mayor temperatura de fusión, hasta llegar a los polietilenos con densidades que van de 0.92 a 0.96 g/cm³ y temperaturas de fusión entre 105 y 135 °C. [4]

Tabla 1^[4]

Hidrocarburo	Fórmula	Peso molecular	Densidad	T.Fusión
Metano	CH ₄	16	Gas	-182 °C
Etano	C ₂ H ₆	30	Gas	-183
Propano	C ₃ H ₈	44	Gas	-190
Butano	C ₄ H ₁₀	58	Gas	-138
Pentano	C ₅ H ₁₂	72	0.63	-130
Hexano	C ₆ H ₁₄	86	0.66	-95
Heptano	C ₇ H ₁₆	100	0.68	-91
Octano	C ₈ H ₁₈	114	0.70	-57
Nonano	C ₉ H ₂₀	128	0.72	-52
Decano	C ₁₀ H ₂₂	142	0.73	-30
Undecano	C ₁₁ H ₂₄	156	0.74	-25
Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	170	0.75	-10
Pentadecano	C ₁₅ H ₃₂	212	0.77	10
Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	283	0.79	37
Triacotano	C ₃₀ H ₆₂	423	0.78	66
Polietileno	C ₂₀₀₀ H ₄₀₀₂	28000	0.93	100



2.1.3 SINTESIS

Es convencional dividir la síntesis de polímeros en dos categorías. Una es polimerización de crecimiento por pasos la cual a menudo también es llamada polimerización por condensación, puesto que se refiere casi exclusivamente a las reacciones de condensación que ocurren entre las moléculas del monómero.

La polimerización de crecimiento por pasos se caracteriza por la gradual formación de cadenas del polímero que por sucesivas reacciones acopla monómeros uno a otro para formar dímeros, los cuales pueden reaccionar con otros dímeros o moléculas del monómero sin reaccionar.

La otra categoría es la polimerización por adición donde la molécula del monómero se adiciona a otra cadena creciente, al tiempo que las moléculas grandes dejan de crecer en la reacción.^[6,7]

2.1.4 COPOLIMERIZACION

Es común en la práctica tratar de incrementar las propiedades de un material por mezclado con otro material. Por ejemplo las aleaciones metálicas tienen propiedades mecánicas superiores a los de los metales puros. En el área de polímeros esto es algo más difícil de hacer. Una alternativa puede ser la síntesis de la cadena de dos o más tipos de monómeros. Los copolímeros son hechos por este método, pueden tener mejores cualidades que sus parientes los homopolímeros, pero las propiedades del copolímero son usualmente caracterizadas por el arreglo de las unidades del monómero en la cadena del polímero.

El tipo más simple de un copolímero contiene solo dos tipos de monómero. Por ejemplo, si hay dos tipos de monómero A y B los homopolímeros serán:

-A-A-A-A-A-A- ó -B-B-B-B-B-B- y los copolímeros serán:

Copolímeros al azar, formados cuando el arreglo es al azar de las unidades A y B a lo largo de la molécula

-A-B-A-A-B-A-B-B-B-A-A-B-

Ciertamente los copolímeros al azar son solo encontrados bajo condiciones específicas de polimerización.



2.2 POLIETILENO

El polietileno pertenece al grupo de los polímeros de las poliolefinas. Estas provienen de hidrocarburos simples, compuestos por átomos de carbono e hidrógeno con dobles enlaces -C-C-. Ejemplos de éstos son el etileno, propileno y el isobutileno.

En los años 1869-1879, varios científicos publicaron informes sobre los polímeros de las olefinas. Estos materiales en estado gaseoso tienen poca tendencia a polimerizar, así pasaron algunos años antes de lograrse la polimerización del etileno. En 1898, Von Pechman obtiene el primer polietileno a partir del diazometano. En 1900, Bamberger y Tschuener analizaron un producto similar, encontrado que tenía la fórmula $-(CH_2)_n$ y lo llamaron "Polimetileno".

El polietileno, fue obtenido accidentalmente por los estudios a alta presión del etileno que Michaels realizó en Amsterdam. Este fue un hallazgo afortunado que aprovechó Gibson para producir polietileno, a partir de una mezcla de etileno y benzaldehído. Para 1935 en Inglaterra, los químicos e ingenieros W. Faucett, G. Paton, W. Perrin y G. Williams polimerizaron etileno utilizando altas presiones y temperaturas. Este descubrimiento permitió a la empresa ICI la fabricación del polietileno en 1938.

En 1952 K. Ziegler, desarrolló en Alemania un procedimiento de polimerización de etileno sin presión, recurriendo a catalizadores de alquil-aluminio y otros similares. En 1954 se desarrolla el proceso Philips, con el uso de catalizadores de óxidos metálicos. Estos procesos proporcionan polímeros a bajas presiones y temperaturas, y en consecuencia se tienen algunas modificaciones en la estructura; esto se refleja en el aumento de la densidad, son más duros y tienen mayores temperaturas de ablandamiento.^[6,7]

2.2.1 MATERIAS PRIMAS

El etileno es la materia prima para la obtención del polietileno. El etileno es un gas compuesto por dos átomos de carbono unidos por un doble enlace, cada carbono presenta dos átomos de hidrógeno. Éste es incoloro y presenta un olor y sabor dulce, es ligeramente soluble en agua, alcohol y etil éter. La obtención del etileno es a partir del petróleo crudo o del gas, el craqueo de la fracción de la gasolina en la destilación primaria o mediante el craqueo del etano y propano con altas temperaturas. El producto gaseoso de estas reacciones incluye una serie de alcanos y olefinas menores.^[6,7]



2.2.2 POLIMERIZACION

Para la producción de polietileno de alta densidad se utilizan sistemas de baja presión. En estos procesos se requieren catalizadores Ziegler-Natta, que son compuestos organometálicos de aluminio y titanio. La polimerización del polietileno de alta densidad puede ser por:

- Suspensión
- Fase gaseosa

Suspensión

La polimerización se efectúa por la mezcla de etileno y disolventes de hidrocarburos en un catalizador de lecho fijo, para después separar el polímero del disolvente. Las condiciones de la reacción son de 100 a 170 °C de temperatura y de 5 a 15 kg/cm² de presión. El polietileno obtenido se caracteriza por una estructura lineal y gran densidad. Este proceso fue patentado por la compañía Philips Co.

Fase gaseosa

La polimerización en fase gaseosa comienza con la alimentación directa del etileno, que debe ser alta pureza (aproximadamente del 99.8%), y el catalizador en polvo (cromo modificado con sílice). Ambos se alimentan continuamente y el polietileno es desalojado intermitentemente del reactor a través de una cámara con sello para gases.

La polimerización ocurre a presiones entre 1 a 100 kg/cm² y de 25 a 100 °C de temperatura y se obtiene un polietileno de buenas propiedades debido a la pureza del etileno. Es económico por no requerir procesos de recuperación de solvente y catalizador. ^[6,7]

2.2.3 CLASIFICACION

En la clasificación de los polietilenos intervienen varios criterios:

- Densidad
- Contenido de monómeros
- Peso molecular
- Distribución de peso molecular
- Índice de fluidez
- Modificación



La clasificación mas empleada es la referencia a la densidad, pues este parámetro es un buen indicativo de las cualidades entre los polietilenos, donde en general densidades altas poseen mayores propiedades mecánicas.

En este aspecto, los polietilenos están clasificados en:

- Polímeros de Etileno Baja Densidad
 - Polietileno de Baja Densidad
 - Polietileno Lineal de Baja Densidad
 - Polietileno de Muy Baja Densidad
 - Etil Vinil-Acetato

- Polímeros de Etileno de Alta Densidad
 - Polietileno de Alta Densidad
 - Polietileno de Alta Densidad Alto Peso Molecular
 - Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
 -

El contenido de monómeros determina en gran medida la estructura del polímero de etileno, en particular el grado de ramificación. En este aspecto, de esto dependen las cualidades del plástico. Los polímeros de etileno por el contenido de monómeros pueden ser:

- Homopolímeros
- Copolímeros^[6,7]

2.2.4 ANALISIS POR ESTRUCTURA

El enfriamiento de un plástico es la pérdida energética de las moléculas; conforme la energía disminuye las moléculas se doblan sobre si mismas, formando estructuras planas con alto acomodo molecular, formando paquetes compactos llamados cristalitas,.

Estas últimas forman posteriormente unas superestructuras conocidas como “esferulitas” y éstas a su vez conforman los cristales. Entre las cristalitas existen ciertas zonas con menor acomodo molecular o zonas amorfas. Si el polietileno tiene menor grado de ramificación, tiende a formar más cristales, presentando menos zonas amorfas y mayor densidad.^[6,7]



2.2.5 POLIETILENO ALTA DENSIDAD

El polietileno de alta densidad homopolímero tiene una estructura lineal con pocas ramificaciones muy cortas. El tipo copolímero presenta pequeñas ramificaciones metil, etil, butil, etc. Dependiendo del monómero (propileno, buteno, hexeno, etc.); la cantidad de estas ramificaciones depende del monómero incorporado. De hecho, la adición del monómero es para controlar el grado de ramificación que presentara el polímero y por tanto, las cualidades del mismo. Los homopolímeros desarrollaran mayor grado de cristalización que los copolímeros, aunque estos a su vez, más que el polietileno lineal de baja densidad. La densidad no depende solamente del grado de ramificación, también influye en cierta medida el peso molecular, tiempo de relajamiento (vinculado con la distribución del peso molecular) y de la rapidez del enfriamiento.

Paralelamente, el punto de fusión de los polietilenos depende del espesor de las cristalitas o bien de las esferulitas. Por otro lado, las ramificaciones inhiben la cristalización, por estas razones, es de esperarse que el homopolímero tenga un punto de fusión más alto que el copolímero pero este a su vez mayor que el polietileno lineal de baja densidad. ^[6,7]

2.2.6 PROPIEDADES

FISICAS

El polietileno de alta densidad (PEAD) tiene una densidad en el rango de 0.941 – 0.965 g/cm³, presenta un alto grado de cristalinidad, un material opaco y de aspecto ceroso, la transmitancia de este plástico es de cero a cuarenta por ciento y depende básicamente de su espesor.

La Tabla 2 presenta las propiedades del PEAD

Tabla 2

PROPIEDAD	UNIDADES	VALOR
Densidad	g/cm ³	0.941-0.965
Absorción de agua	mg @ 96 h	<0.5
Contracción	%	1.5-3
Resistencia	N/mm ²	18-35
Elongación punto de ruptura	%	1000
Resistencia dieléctrica	kV/cm.	>600



Este plástico, tiene una alta permeabilidad a gases, aromas y ciertos líquidos. A mayor densidad, presenta menor permeabilidad y debido a su naturaleza no-polar absorbe muy poca humedad. Presenta permeabilidad a los aceites y grasas, en particular a la esencia de pino, naranja, hierbabuena y alcanfor. En botellas, estas sustancias inducen una ligera suavización en el largo plazo y la posibilidad de fisuras bajo tensión (ESCR), especialmente en el tipo homopolímero. En la Tabla 3 se muestran las propiedades de permeabilidad.

Tabla 3

Valor para la permeabilidad de diversos gases en el PEAD

GAS	PERMEABILIDAD $\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-día -bar}$
Vapor de agua	$1\text{-}10 \text{ g}/\text{cm}^2\text{-día}$
Nitrógeno	4.30-1870
Aire	680-2670
Oxígeno	1210-4650
Bióxido de carbono	5900-18100
Hidrógeno	5000-14800

MECANICAS

La rigidez, dureza y resistencia a la tensión de los polietilenos se incrementa con la densidad. El PEAD presenta mejores propiedades mecánicas que el PEBD y el PELBD.

La mayor presencia de cristales en el polietileno de alta densidad eleva la resistencia a la tensión, manifestando menor elongación ante la misma magnitud de fuerza aplicada que un espécimen de menor densidad. Este material es muy tenaz, de esta manera demuestra alta resistencia a los impactos aún a bajas temperaturas, pues es capaz de absorber parte de la energía proveniente de los impactos mediante deformaciones.



ELECTRICAS

El polietileno de alta densidad es un excelente aislante eléctrico, por esta razón muchos productos de la industria eléctrico-electrónica están fabricados con este material.

Tiene tendencia a conservar cargas eléctricas estáticas, induciendo a la aparición de “micro” arcos eléctricos o la atracción de polvo. Para evitar estos efectos, es posible agregar algunos compuestos como amidas, etoxi-amidas, ésteres, glicerol, etc., que migran a la superficie del producto y captan la humedad del medio ambiente formando una delgada capa conductora, que disipa las cargas estáticas. Algunos compuestos contienen aproximadamente 10% de negro de humo conductivo para disipar la carga estática.

TERMICAS

El calor necesario para llegar al punto de fusión, esta relacionado con la cristalinidad, el polietileno de alta densidad muestra un punto de fusión entre 130 y 140 °C.

La temperatura máxima de servicio depende de la duración y la magnitud del esfuerzo mecánico presente durante el calentamiento; en pruebas sin carga mecánica en periodos cortos, la temperatura máxima es de 90 a 120 °C, en periodos mayores este valor desciende ligeramente al intervalo señalado entre los 70 y 80 °C. La prueba de temperatura de deflexión bajo carga, de acuerdo a Vicat método B es de 60 a 65 °C según los ensayos ISO/R75 método A y método B es de 50 y 75 °C respectivamente.

El encogimiento de los productos moldeados con polietileno de alta densidad sucede principalmente en la fase de cristalización del polímero. Este fenómeno depende de las variables de transformación, pero también de las características moleculares del plástico: peso molecular y su distribución, principalmente. El encogimiento de este material es de 1.5-4%.

QUIMICAS

La estructura no-polar del polietileno de alta densidad permite que mantenga alta resistencia al ataque de agentes químicos. En general, esta resistencia mejora con el aumento de la densidad y el peso molecular. La forma de medir este comportamiento es considerando ciertos cambios en las muestras al contacto con las sustancias en prueba; estos cambios son hinchamiento, pérdida de peso o elongación a la ruptura.

Este plástico soporta muy bien a ácidos fuertes (no oxidantes) y bases fuertes. En niveles superiores a 60 °C el material resiste muchos solventes, excepto hidrocarburos aromáticos y halogenados, aceites, grasas y ceras que inducen hinchamiento. El polietileno de alta densidad es parcial o totalmente soluble en ciertos casos extremos, por ejemplo en benceno o xileno a punto de ebullición. Los halógenos y las sustancias altamente oxidantes atacan a este plástico, por ejemplo ácido nítrico, sulfúrico, perclórico, etc.

2.2.7 APLICACIONES

El polietileno de alta densidad cuenta con un número variado de aplicaciones: en el sector de envase y empaque se utiliza en bolsas para mercancía, bolsas para basura, botellas para leche y yogurt, cajas para transporte de botellas, envases para productos químicos, envases para jardinería, detergentes y limpiadores, frascos para productos cosméticos y capilares; recubrimientos de sobres para correo, sacos para comestibles, en la industria eléctrica se usa como aislante de cable y alambre, para conexiones y cuerpos de bobina, encapsulados de chips, carcasas y un sinfín de pequeñas partes eléctricas.

El sector automotriz se usa en contenedores para aceite y gasolina, conexiones y tanques para agua, además de tubos y mangueras. También tiene otros usos como: artículos de cordelería, bandejas, botes para basura, cubetas, platos, redes para pesca, regaderas para aceites minerales y agua, tejidos técnicos y tapicerías, tinas de baño para bebe y juguetes.^[6,7] Ver Figura 1.



Figura 1



2.3 SILICATOS

Alrededor de un 95% de la corteza terrestre está constituida por silicatos. Se sabe que los silicatos están formados por cristales regulares y su unidad fundamental es el grupo tetraédrico $(\text{SiO}_4)^{4-}$. El tetraedro de silicio está formado por un ión silicio situado en el centro de cuatro oxígenos dispuestos simétricamente en la dirección de las valencias del silicio. La unión de estos elementos es de carácter covalente, siendo la distancia entre los oxígenos de 2.6 Å y entre los oxígenos y silicio de 1.62 Å. El Si^{4+} se enlaza con cuatro oxígenos. Cada oxígeno tiene dos cargas negativas, la mitad de sus requerimientos de valencia se satisface con el silicio al cual se une, y el excedente de carga puede satisfacerse:

De acuerdo con la Figura 2,

A) Con una fuente externa de cationes (K^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} u otros)

B) A partir de otro átomo de silicio perteneciente a un grupo tetraédrico adyacente.

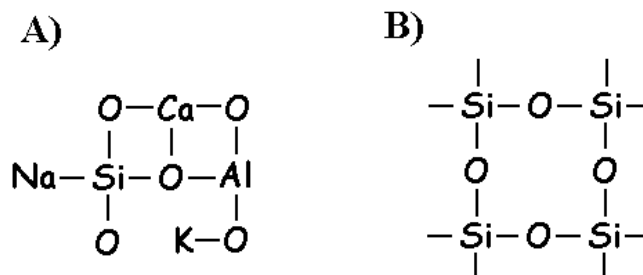


Figura 2

Existen dos reglas básicas que indican cómo unir dos o más tetraedros (reglas de Pauling):

- 1) La suma de las cargas negativas debe ser igual a la suma de las cargas positivas, de manera que la estructura sea eléctricamente neutra.
- 2) Los cationes (carga positiva) pueden enlazarse o rodearse de elementos cargados negativamente, de modo que los arreglos coordinados dependen de los tamaños entre el catión y el anión respectivo.

2.3.1 ESTRUCTURA

La unión de varios tetraedros generan hojas que se extienden, dando origen a estructuras laminares. Las puntas de los tetraedros forman un mismo plano, de igual manera los átomos de silicio situados en el centro y los oxígenos de las bases, forman una hoja tetraédrica tipo T, de acuerdo a la Figura 3.

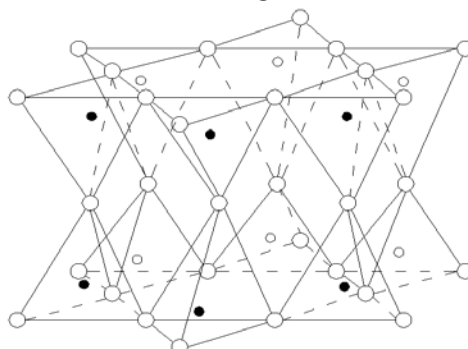


Figura 3

Similarmente se pueden formar cadenas octaédricas, formación típica de los compuestos de aluminio. Este arreglo es una hoja octaédrica tipo O, Figura 4.

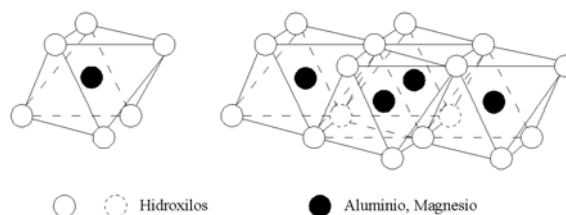


Figura 4

Ahora bien, la unión de una hoja del tipo T, con otra del tipo O, genera una lámina T-O, o lámina 1:1, Figura 5.

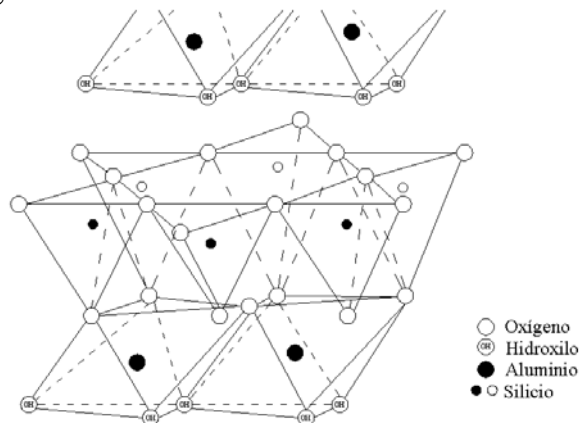


Figura 5

2.3.2. Clasificación

Tabla 4

SILICATOS	Grupos Estructurales	Representación de la estructura	Relación Si : O	Unidad	Ejemplos
NESO-SILICATOS	<i>Independientes</i>		1 : 4	(SiO ₄) ⁴⁻	Olivino
SORO-SILICATOS	Dobles		2 : 7	(Si ₂ O ₇) ⁶⁻	Akermanita
CICLO-SILICATOS	Anillos		1 : 3	(Si ₃ O ₉) ⁶⁻ (Si ₆ O ₁₈) ⁶⁻	Beriloita Berilio
INO-SILICATOS	Cadenas Simples		1 : 3	(Si ₃ O ₉) ²⁻	Piroxenos
	Cadenas Dobles		4 : 11	(Si ₄ O ₁₁) ⁶⁻	Anfiboles
FILO-SILICATOS	Hojas		2 : 5	(Si ₄ O ₁₀) ⁴⁻	Mica
TECTO-SILICATOS	Redes Tridimensionales		1 : 2	(SiO ₂) _n	Cuarzo

Las estructuras presentadas en la Tabla 4 son capaces de sustituir al átomo de silicio, situado en el centro de los tetraedros, por otro de menor carga como el Al³⁺, generando así una deficiencia de carga positiva, o un exceso de carga negativa, en el tetraedro, la cual necesita atraer a otros cationes para compensarse. Este mecanismo permite a los silicatos tener propiedades superficiales únicas de acidez e intercambio



iónico, tan importantes que a ellas se deben las propiedades catalíticas de las arcillas. Esto es un ejemplo de lo que ocurre en la parte química, es decir, los arreglos cristalinos y las sustituciones. El fundamento de las propiedades químicas de una sustancia es la física que ocurre a escala molecular. ^[8]

2.3.3 ARCILLAS

La palabra arcilla proviene del latín “argilla” y ésta del griego “*αργιλος*” o “*αργιλος*” blanco, por el color del material. Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se le humedece y consiste de un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras. Se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados. La textura de las arcillas implica no solo el tamaño de los gránulos, sino la forma como están unidos, su orientación en el espacio y compactación. Las arcillas son una rama de los silicatos y su formación obedece a tres mecanismos principales: herencia, neoformación, y transformación.

El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre (lagos y mares)^[9]. Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química. Las arcillas del tipo montmorillonita y sus formaciones más abundantes se localizan al norte del país, en el estado de Durango, aunque también existen depósitos importantes en Puebla, Zacatecas, Oaxaca, Guanajuato y Veracruz. Entre las características principales se pueden citar los siguientes:

- a) Las arcillas están formadas por cristales pequeños.
- b) Tienen capacidad de intercambiar iones.
- c) Son capaces de variar su composición química interna.
- d) Pueden alojar moléculas en el interior de su espacio interlaminar.
- e) La superficie de las láminas presenta una actividad química considerable.
- f) Los cambios físicos, por ejemplo el hinchamiento, son reversibles.

Se ha demostrado que hay varios niveles de organización en las arcillas minerales. Las partículas más pequeñas son del orden de 10 nm y están compuestas de apilamientos de placas paralelas con un promedio de diez por partícula.^[10]

2.3.4 FILOSILICATOS

De la clasificación de los silicatos solo se hará mención a los filosilicatos, minerales de arcilla, que se encuentran abundantemente representados en todos los suelos y más de la mitad de los minerales de arcilla de la corteza terrestre son illitas, seguidos en orden de abundancia relativa por la montmorillonita, minerales de capas mixtas, cloritas, caolinitas, paligorskita y sepiolita.^[11]



2.3.5 CLASIFICACION

Los filosilicatos se clasifican^[9] de acuerdo a su estructura de acuerdo a la Tabla 5.

Tabla 5

	DIOCTAEDRICOS		TRIOCTAEDRICOS	
BILAMINARES T:O 1:1		Caolinita		Antigorita
	CANDITAS	Nacrita	SERPENTINA	Crisotilo
		Dickita		Lizardita
		Halloisita		Bertierina
TRILAMINARES T:O:T 2:1	Pirofilita		Talco	
		Montmorillonita		Saponita
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita
		Nontronita		
	Vermiculitas		Vermiculitas	
	Illitas			
		Moscovita		Biotita
	MICAS	Paragonita	MICAS	Flogopita
				Lepidolita
T:O:T:O 2:1:1	CLORITAS			
FIBROSOS	Paligorskita		Sepiolita	

2.3.6 ESTRUCTURA

Los filosilicatos presentan una estructura organizada principalmente con láminas de tetraedros de silicio (SiO_4) y de octaedros de alumina (AlO_6) o $\text{Al}(\text{OH})_6$ o algún otro catión metálico. Los grupos tetraédricos (SiO_4)⁴⁻ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. La estructura de los filosilicatos se forma por apilamientos de planos hexagonales y compactos. Ver Figura 6.

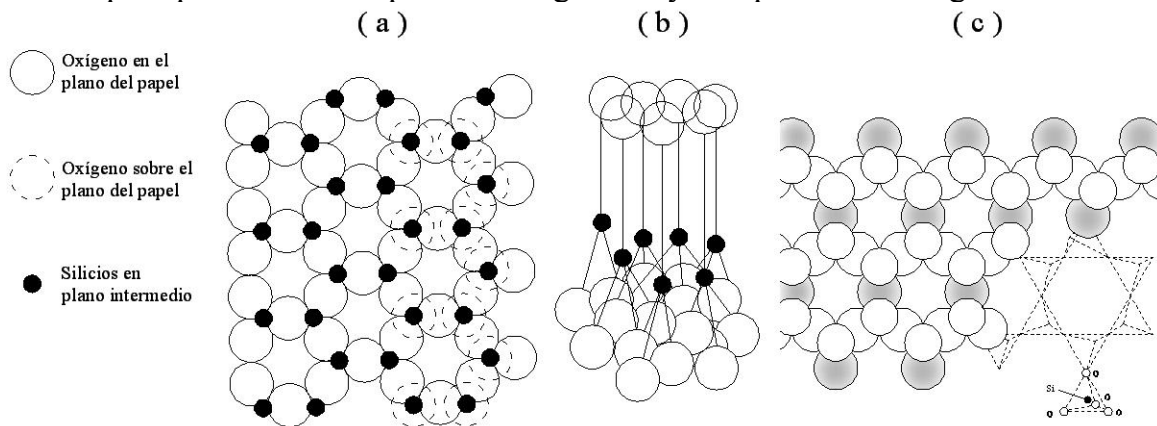


Figura 6. Representación gráfica de la estructura de los filosilicatos
a) Plano hexagonal compacto. b) Estructura formada por tetraedros.
c) Hoja de sílice

Los minerales de arcilla están constituidos por combinaciones de diferente proporción de hojas tetraédricas (T) y octaédricas (O) en relación 1:1 en las Kanditas o caolines; 2:1 en las esmécticas, vermiculitas, micas y 2:2 en las cloritas. Ver Figura 7.

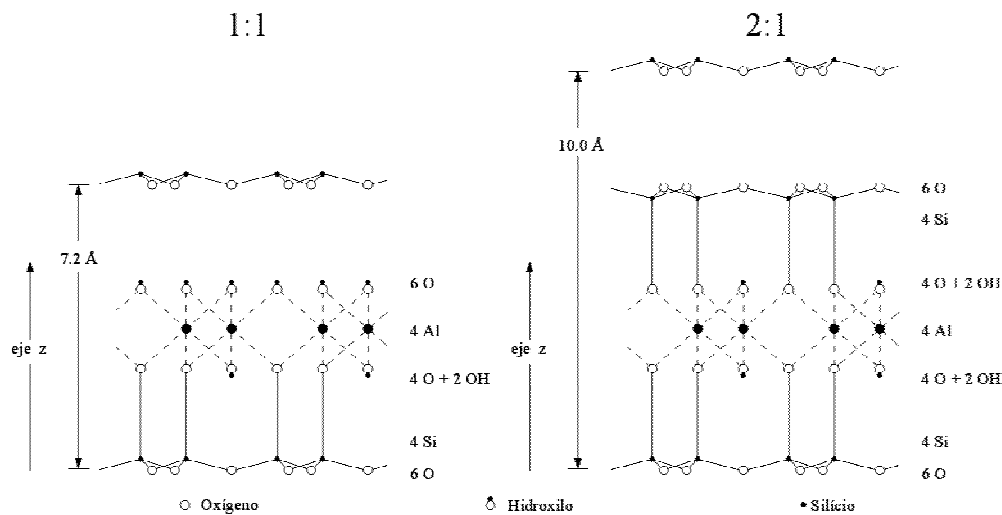
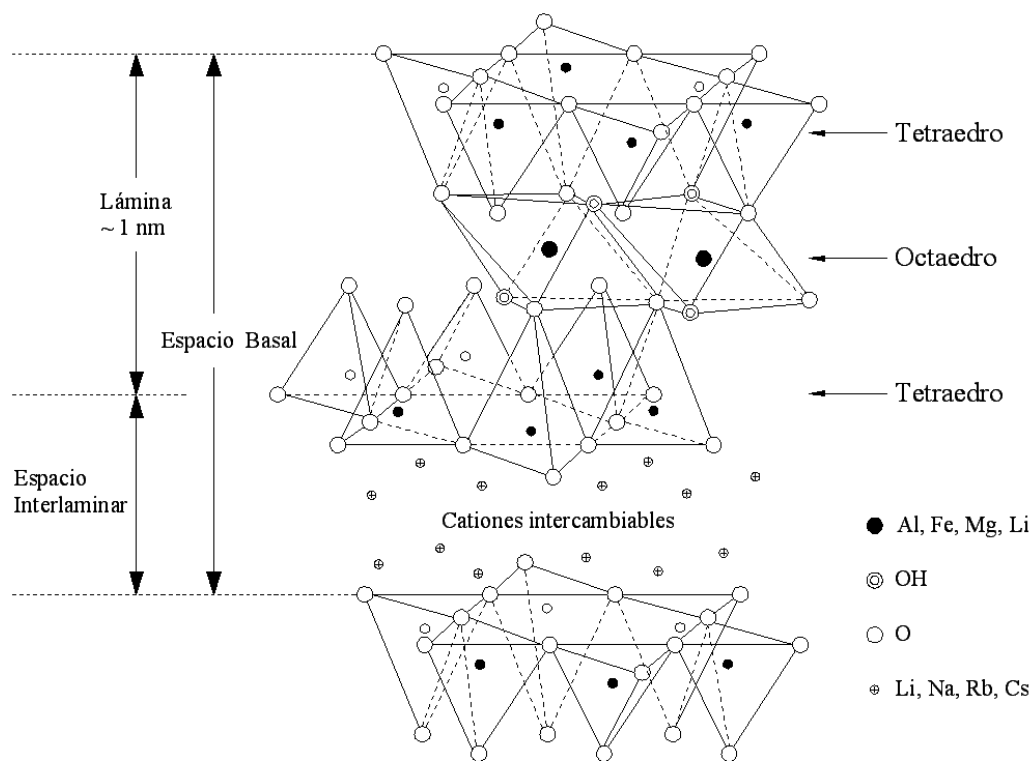


Figura 7. Representación de los grupos 1:1 de los caolines y el grupo 2:1 de las esmécticas.

Las fuerzas que asocian los constituyentes de las capas (cationes, oxígenos e hidroxilos) son de naturaleza iónica-covalente, de manera que el conjunto es muy estable. Por el contrario, las fuerzas intermoleculares que unen capas sucesivas son mucho menos intensas (fuerzas de Van der Waals y puentes de hidrógeno), hecho que permite separar las diferentes capas como láminas superpuestas.

En algunos filosilicatos (esmecticas, vermiculitas y micas) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga. El balance de cargas se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar de cationes (como ejemplo en el grupo de las micas), de cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmecticas) o de grupos hidroxilos coordinados octaédricamente.^[12] Ver Figura 8.



Estructura 2:1 de los filosilicatos

Figura 8

Estructura T:O:T Se muestra los cationes intercambiables de las láminas de los filosilicatos^[13]

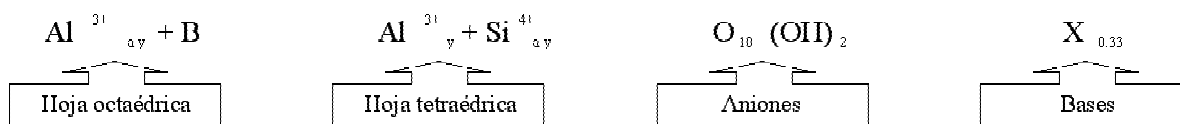


2.3.7 GRUPO DE LAS ESMECTITAS

La fórmula base para el grupo es $Al_4Si_8O_{20} (OH)^4 \cdot n H_2O$. Este grupo incluye especies dioctaédricas como la montmorillonita, la nontronita, la beidelita y trioctaédricas como la sauconita, la saponita y la hectorita. Ver Tabla 5. Frecuentemente las partículas de estos minerales son de tamaño muy pequeño (100 – 200 Å). Las unidades de esmécticas no son neutras. Existe una deficiencia de carga positiva por sustitución parcial de iones Al^{3+} por cationes divalentes en posición octaédrica o sustitución parcial de iones Si^{4+} por Al^{3+} en posición tetraédrica. Este déficit de carga es la base de la elevada capacidad de intercambio de cationes^[14].

4.3.8 MONTMORILLONITA

El nombre de montmorillonita proviene del material original, descrito por Damour y Salvétat en 1874 en la localidad de Montmorillon, Francia^[11]. Es una arcilla pegajosa y plástica, su densidad varía desde 1.6 a 2.7 g/cm³, de acuerdo al grado de hidratación. La composición química de una arcilla esméctica, tipo montmorillonita es:



B = catión: Fe, Mg, Cr, Mn, Li

2.3.9 ESTRUCTURA

La estructura de la montmorillonita la determino un grupo de investigadores alemanes, entre ellos Hofman.^[14] Ver Figura 9.

La estabilidad de los aluminosilicatos está muy relacionada al tamaño del ion que llena el espacio dejado por el apilamiento de los oxígenos en la red cristalina.

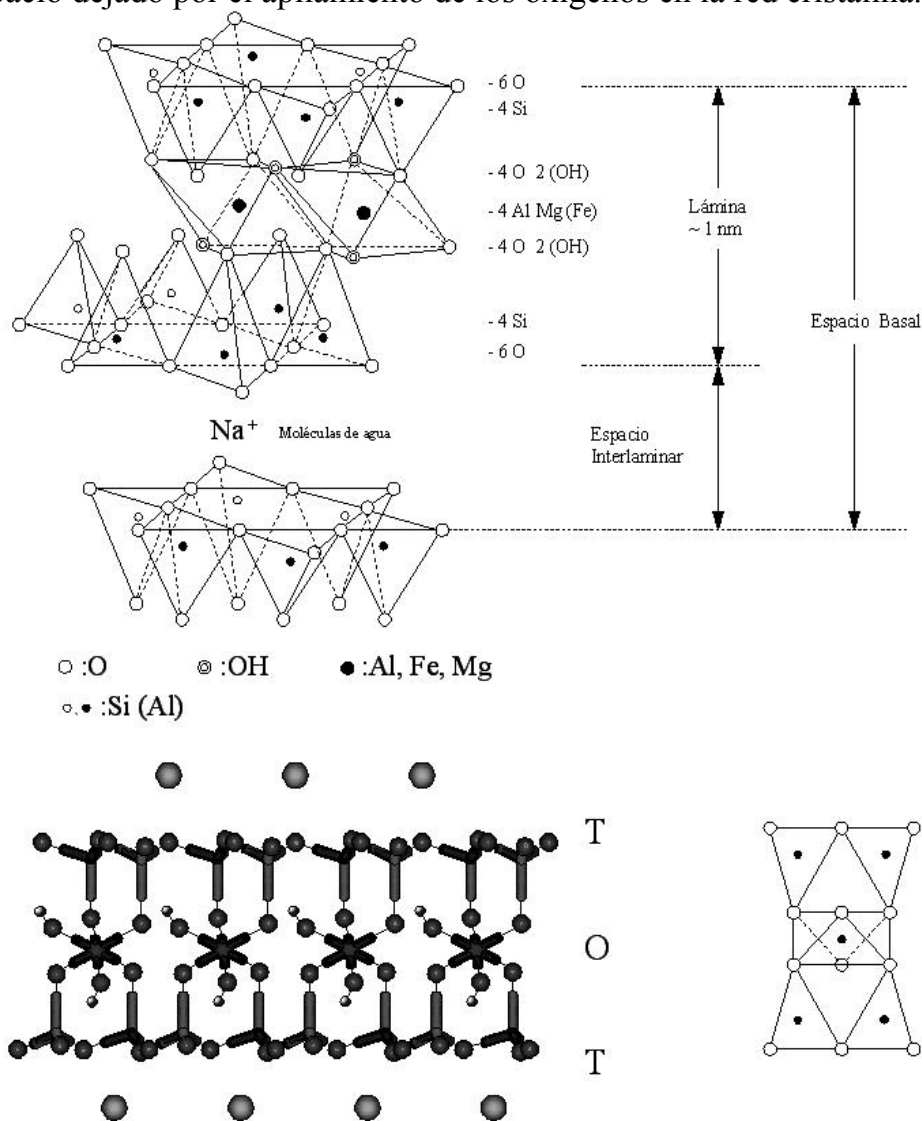


Figura 9. Representación estructural de la montmorillonita. Las hojas tetraédricas se combinan de tal manera que uno de los oxígenos del tetraedro y los dos planos de OH⁻ forman un plano común.^[32]

La sustitución de aluminio (hoja O) y silicio (hoja T) por un catión de menor carga eléctrica, origina una deficiencia de carga eléctrica responsable de algunas de las propiedades superficiales más importantes de las arcillas: La capacidad de intercambio



iónico se puede definir como la suma de todos los cationes de intercambio que un mineral puede absorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas.

- 1) Por sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- 2) Por enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- 3) Por disociación de los grupos hidroxilo accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80% de la carga neta de la partícula, además, es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los otros dos tipos varían en función del pH y de la actividad iónica y corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20% de la carga total de la lámina. La Tabla 6 muestra los valores de capacidad de intercambio en miliequivalentes para las distintas arcillas presentadas.

Tabla 6. Capacidad de intercambio de algunas arcillas.

Arcilla	CII (meq / 100 g.)
Caolinita	3 - 5
Halloisita	10 - 40
Illita	10 - 50
Clorita	10 - 50
Vermiculita	100 - 200
Montmorillonita	80 - 200
Sepiolita/Paligorskita	20 - 35

Capacidad de absorción

La absorción de moléculas polares como el agua, así como otros compuestos orgánicos, por ejemplo las aminas, causan el hinchamiento de la estructura laminar. Por lo tanto la estructura y el grado de sustitución catiónica determinan en gran medida las propiedades de la arcilla. La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características morfológicas (superficie específica y porosidad) La absorción de agua es mayor del 100% con respecto al peso de arcilla. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento (vence la atracción electrostática). Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmécticas tienen una gran capacidad de hinchamiento.

La sustitución de cationes se lleva a cabo mediante mecanismos muy sencillos. Este mecanismo se genera al introducirse moléculas polares en el espacio interlaminar, dando lugar a la expansión de las capas. Ver Figura 10.

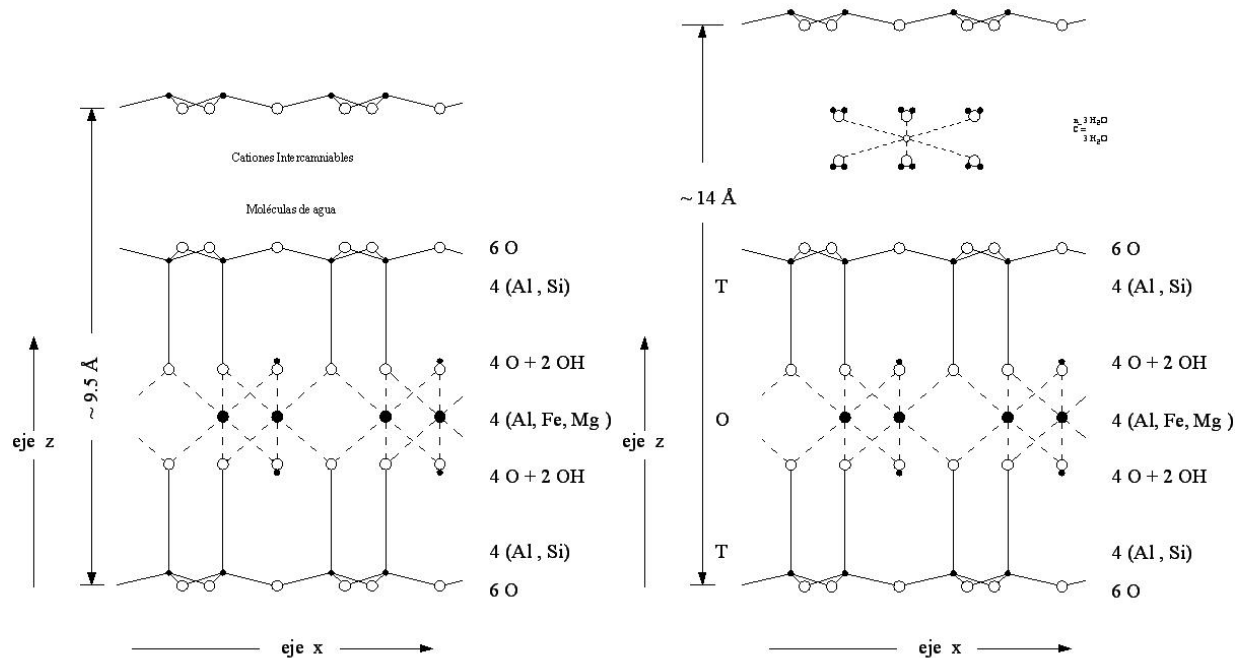


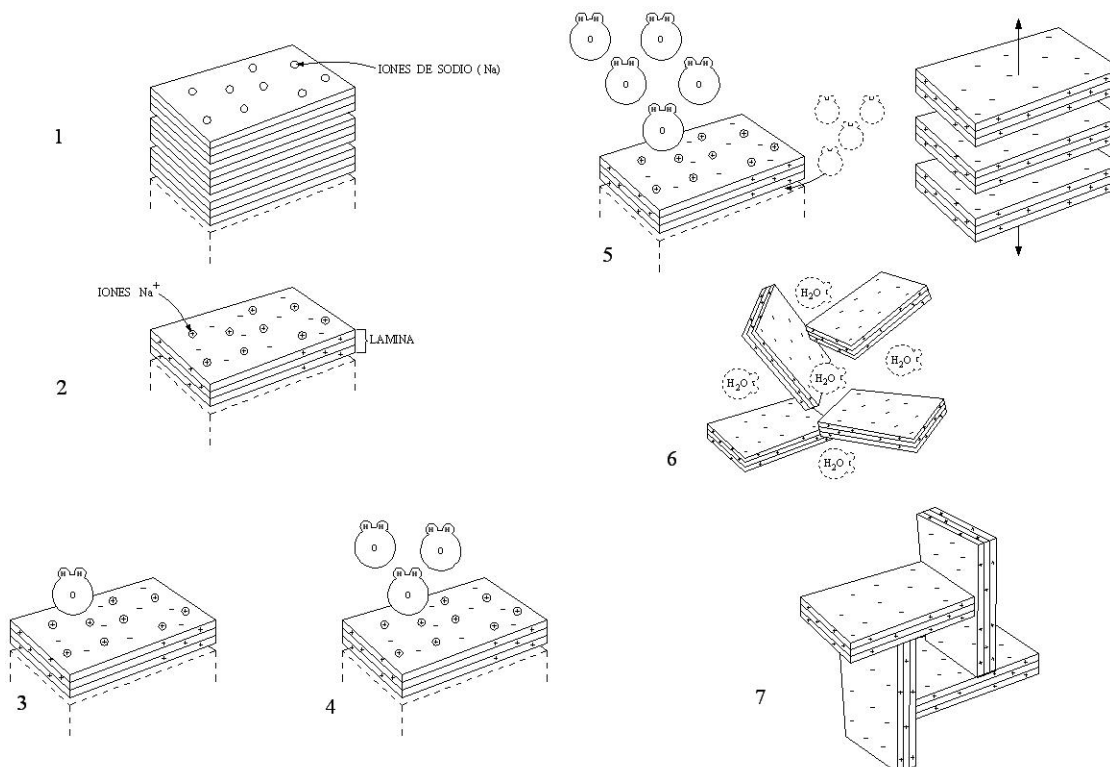
Figura 10. Expansión de las capas de una esméctica. La admisión de moléculas polares entre las capas, determina una expansión en la dirección z, que es función del tamaño de la molécula introducida. [15]

2.3.10 MODIFICACION QUIMICA

Numerosas son las bondades y aplicaciones de la arcilla, producto de las modificaciones que sufre la estructura laminar al ponerse en contacto con otras especies químicas, por ejemplo el agua, las moléculas orgánicas y los polímeros inorgánicos de tamaño variable.

Agua como especie química intercalante

El agua se asocia fácilmente a la superficie de las láminas de arcilla, logrando una densidad y una viscosidad aún mayor que la del agua en estado natural y extendiéndose en varias capas (hinchamiento). Por lo anterior la arcilla presenta el fenómeno de tixotropía. Ver Figura 11.



La Figura 11 muestra las etapas secuenciales de intercalación. En el estado deshidratado algunos cationes son adsorbidos electrostáticamente en el espacio interlamilar Figura 11.1. Las cargas negativas en la arcilla se acumulan en las superficies planas de las laminillas Figura 11.2. Las moléculas de agua son atraídas hacia la superficie Figura 11.3 y 11.4. Las láminas se repelen entre sí separándose y expandiendo el espacio interlamilar, originando el hinchamiento (repulsión electrostática) Figura 11.5. Las moléculas de agua continúan llenando el espacio interlamilar, luego el agua es eliminada mediante algún procedimiento de secado, lo cual origina una contracción de volumen de las hojuela Figura 11.6. Alcanzado el equilibrio de hidratación, la estructura interna hace coincidir los bordes cargados positivamente con las caras planas cargadas negativamente Figura 11.7.

Compuesto orgánico como especie química intercalante

Las arcillas son usadas como aditivos por que son materiales que están compuestos por placas de silicato que pueden ser intercaladas por moléculas orgánicas^[15,16]. Las especies orgánicas que penetran en el espacio interlamilar son abundantes y se ha visto que las moléculas orgánicas se acomodan entre las láminas de la arcilla produciendo un efecto de expansión que varía según el tamaño de la cadena orgánica (el número de átomos de carbono y los cationes). Por ejemplo, a partir de una estructura como la esméctica sódica, cuyo espacio interlamilar tiene una separación inicial entre los centros de las dos láminas contiguas de 9.5 Å aprox., es decir, se encuentra colapsado en el estado anhidro, entonces habrá una modificación de la distancia interlamilar al

intercalar moléculas orgánicas. La separación interlaminar varía según la molécula intercalante. ^[17,18] Los cationes de amonio cuaternario son los principales intercalantes. Ver Tabla 7.

TABLA 7

Molécula	Separación interlaminar (Å)
$(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+$	12.0
$(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+$	12.2
$(\text{CH}_3)_3\text{NH}^+$	13.0
$(\text{C}_{11}\text{H}_{23})_4\text{N}^+$	13.5

Valores de la distancia interlaminar al intercalar diferentes moléculas orgánicas.

La expansión del edificio laminar de una arcilla al intercalarse una molécula orgánica depende de la carga eléctrica de la lámina. Ver Figura 12.

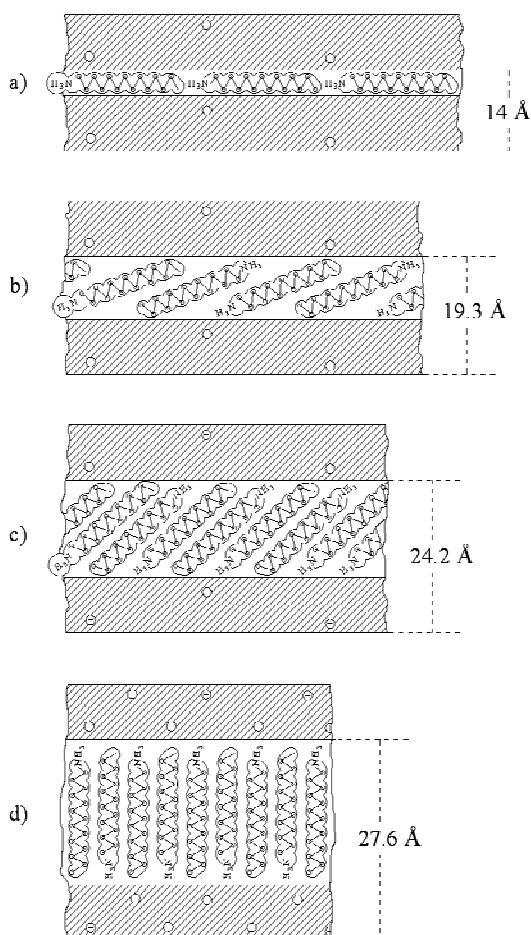


Figura 12. Orientación de las moléculas orgánicas en función de la carga eléctrica creciente ^[18]

La posición de la molécula varía según la carga laminar de la arcilla. Así cuando la carga es baja la molécula orgánica se acomoda con sus partes planas dispuestas paralelamente a las láminas de la estructura, mientras que si se incrementa la densidad de la carga entonces la cadena puede llegar a colocarse perpendicularmente a las láminas, la cual favorece la estabilidad, ya que forma enlaces por los dos extremos mediante los átomos de hidrogeno del grupo NH_3^+ y los átomos de oxígeno que se encuentran en los anillos de seis miembros de la capa tetraédrica de la arcilla. Esto permite explicar que no siempre las moléculas de gran tamaño inducen una variación considerable en la distancia interlaminar, mientras que otras provocan variaciones importantes que no siempre corresponden a su tamaño y configuración. Se ha encontrado varias aplicaciones como la resistencia a la descomposición, ya que la molécula intercalada, y algunos complejos orgánicos, adquieren gran estabilidad^[18].

Aprovechando la capacidad de intercambio iónico que poseen las arcillas, es fácil el intercambio de los iones interlaminares por iones de amonio. Así, en este caso, la montmorillonita- Na^+ puede sufrir un intercambio iónico con $\text{RNH}_3^+\text{Cl}^-$ para producir montmorillonita modificada. Al intercalar los cationes de la arcilla, por los cationes de alquilamonio, se incrementa el espacio interlaminar.

El proceso de intercalación es un proceso de equilibrio químico lento:



Recientemente, las arcillas modificadas con iones alquilamonio han sido utilizadas como membranas artificiales, sensores químicos y como refuerzos en compuestos de matrices poliméricas. En todas estas aplicaciones el comportamiento y las propiedades de los híbridos dependen, en gran medida, de la estructura y del entorno molecular de la fase orgánica entre las láminas.^[20] Ver Figura 13.

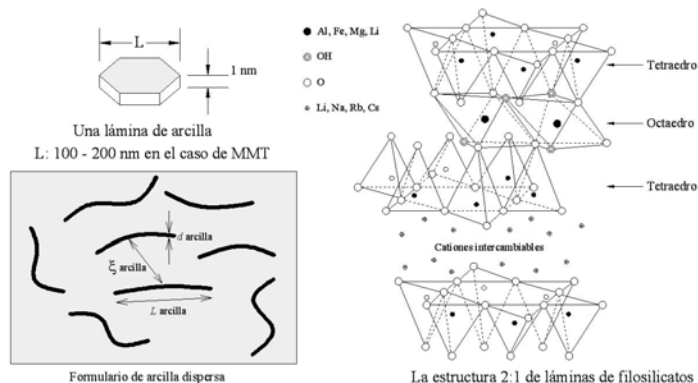


Figura 13



2.4 NANOCOMPUESTOS

Los nanocompuestos han atraído la atención en años recientes porque sus características eléctricas, mecánicas, ópticas, y otras fisicoquímicas pueden a menudo ser modificadas favorablemente debido a las interacciones interfaciales a nivel atómico y a efectos cuánticos^[21].

Los nanocompuestos son una combinación de dos o más fases que contienen diferentes composiciones o estructuras, donde al menos una de las fases está en escala nanométrica. Su comportamiento se debe principalmente al pequeño tamaño de la unidad estructural y su relación superficie-volumen. Dependiendo de la naturaleza de la matriz los nanocompuestos pueden clasificarse en tres grupos principales:

- Poliméricos
- Metálicos
- Cerámicos.

Las nanopartículas se pueden clasificar en: lamelares, fibrilares, esféricas y otras.

2.4.1 NANOCOMPUESTOS CON ARCILLAS

Los nanocompuestos poliméricos con arcillas son nuevos materiales que incluyen en su composición arcillas minerales con el fin de lograr superficies suaves y propiedades mecánicas mejoradas, además de mostrar resistencia a la flama y al desgaste. La estructura de los nanocompuestos depende del grado en el cual los compuestos orgánicos e inorgánicos son transformados en compatibles. Teniendo interacciones entre el polímero y silicio se producen materiales con propiedades mecánicas superiores^[18].

Factores estructurales, como dimensionalidad, composición y propiedades de la interfase tienen gran influencia en su comportamiento. El primero de estos factores, la dimensionalidad, implica el tamaño y la distribución, así como la morfología. La composición química de las fases se relaciona directamente con el uso final de los materiales que requieren un manejo y proceso específicos. En el comportamiento del material también se deben tomar en cuenta la composición y la pureza de las fases, así como la estequiometría en la combinación de las mismas. El tercer factor estructural consiste en el número y la naturaleza de las interacciones entre las fases constituyentes, ya que el número de interfases en materiales nanoestructurados suele ser elevado.

Todos estos factores se deben tomar en cuenta en la síntesis de estos materiales.

2.4.2 SINTESIS DE NANOCOMPUESTOS POLIMERICOS

La síntesis de nanocompuestos involucra un proceso de varios pasos. El paso crítico en la elaboración de nanocompuestos con una dispersión homogénea es la comprensión de la química de superficies e interfases, cuyo propósito es lograr compatibilidad (afinidad) entre las fases.

Existen muchos procesos y métodos de síntesis que han sido utilizados para la elaboración de nanocompuestos. Actualmente la técnica para preparar nanocompuestos polímero-cerámicos es insertar cadenas poliméricas entre pequeñas láminas de arcillas o en materiales laminados.

Las arcillas se usan como alternativa de componentes inorgánicos para la construcción de nanocompuestos híbridos ya que poseen enlaces Si-O estables y relaciones de longitud espesor muy altos. La superficie de sus láminas puede ser modificada y su galería puede ser intercalada por polímeros^[22]. La clave de la tecnología es el método de intercalación de la arcilla y principalmente el proceso de exfoliación de los tactoides de la arcilla.

Los silicatos que han sufrido intercambio catiónico no son fácilmente dispersables en matrices orgánicas y pueden formar nanocompuestos de dos tipos: estructuras intercaladas en las cuales la separación entre las capas de silicato se incrementa pero es relativamente constante y/o nanocompuestos exfoliados en los cuales capas de silicato y apilamientos están dispersos a través de todo el polímero, con orientación al azar^[23]. Las síntesis de nanocompuestos con polímeros es un método con el que se puede mejorar las propiedades de los polímeros y extender sus aplicaciones. Ver Figura 14.

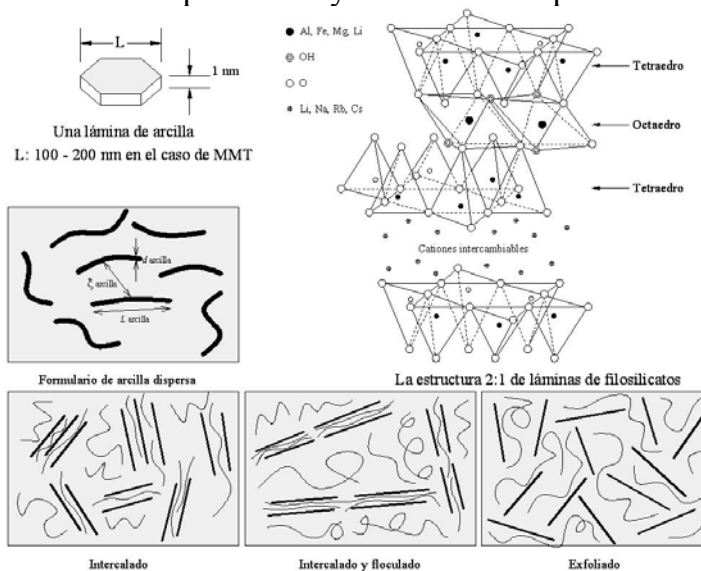


Figura 14

2.4.3 DISPERSION, INTERCALACION Y EXFOLIACION DE LA ARCILLA

La dispersión de arcillas en una matriz polimérica puede dar como resultado la formación de tres tipos de materiales compuestos^[24,25]. El primer tipo es el compuesto convencional, es decir, el que contiene arcilla en forma de tactoides que son capas o láminas aglomeradas de arcilla, sin intercalación. En este caso, los tactoides se dispersan como una fase segregada, obteniéndose propiedades mecánicas pobres del material resultante^[26]. El segundo tipo es un nanocompuesto intercalado polímero-arcilla el cual se forma por la inserción de una o más capas moleculares del polímero en la galería de la arcilla, en éste, la distancia entre las capas de silicato se incrementa pero se mantiene relativamente constante. Ver Figura 15.

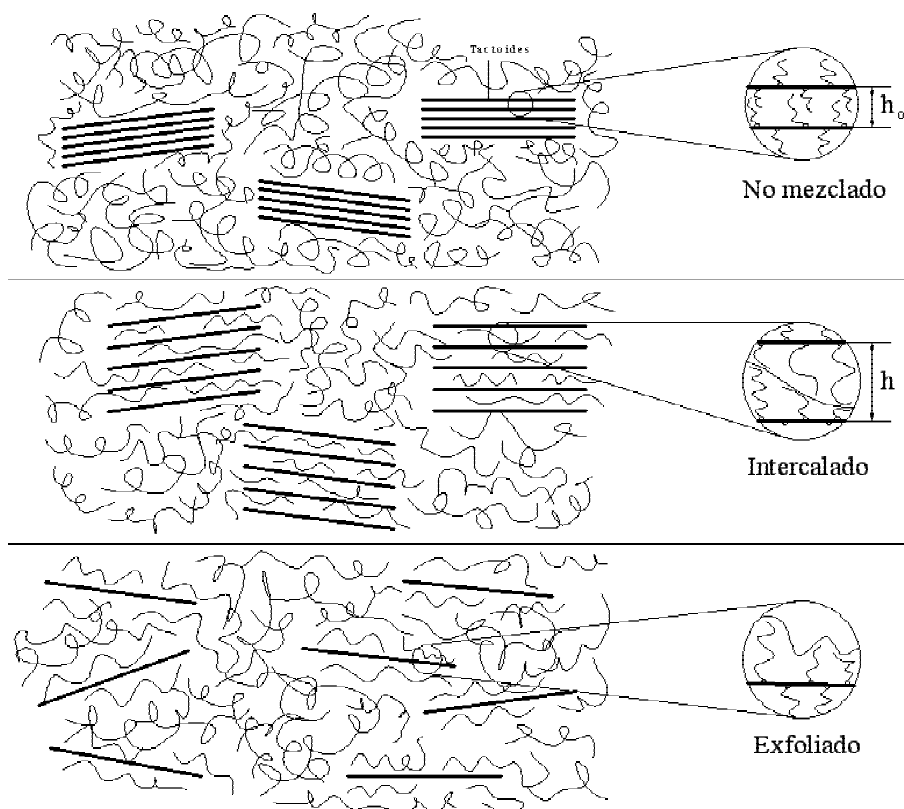


Figura 15. Tipos de dispersión de nanocompuestos polímero-arcilla^[27].

Las cadenas extendidas del polímero están intercaladas entre las capas de silicato de una manera repetitiva lo que produce un compuesto bien ordenado, aunque estas estructuras ordenadas tienen un ancho de pocas capas moleculares. Las capas de silicato de un nanocompuesto exfoliado están separadas por distancias promedio que dependen de la concentración de la misma.^[27] El tercer tipo es un nanocompuesto polímero-arcilla exfoliado, en el cual las láminas de arcilla están altamente dispersas en



la matriz polimérica, con una distancia y orientación al azar. El nanocompuesto exfoliado mejora las propiedades, debido a la dispersión homogénea de la arcilla y el área interfacial que se logra entre el polímero-arcilla^[28,29,30].

La exfoliación de las arcillas puede producirse por alguno de los siguientes procesos:

- Polimerización de un monómero en la presencia de una arcilla modificada.
- Formulación de polímeros en estado fundido con una arcilla modificada.
- Suspensiones exfoliadas, seguido de su polimerización o formulación en fundido.
- Condiciones del proceso de extrusión.
- Otros métodos.

La purificación de la arcilla es indispensable ya que sus propiedades son modificadas por partículas extrañas. Se recomienda que la arcilla tenga menos de 5% en peso de impurezas, ya que un porcentaje mayor afecta de manera negativa las propiedades^[31].

La compatibilidad entre las capas de arcilla y la matriz polimérica se alcanza a través de reacciones de intercambio iónico. Esto incrementa la organofilidad de la superficie de la capa de la arcilla y mejora el mojado con la matriz polimérica, lo cual favorecerá la dispersión y exfoliación originando mejores propiedades en los materiales y en su procesamiento. La eficiencia del nanocompuesto está basada en la uniformidad de la dispersión de las placas a través de la matriz^[32].

2.4.4 NANOCOMPUESTOS CON POLIETILENO

El primer nanocompuesto de polímero-arcilla fue exitosamente sintetizado con un polímero que poseía un grupo polar que permitió que las partículas de arcilla se dispersaran rápidamente.^[33]

La mayoría de los polímeros comunes de olefinas (PP, PE), sin un grupo polar, han recibido relativamente poco interés debido a que la arcilla orgánicamente modificada no se dispersa bien en los polímeros no polares, solo hasta el injerto de un grupo reactivo en la cadena del polímero, por ejemplo; los grupos anhídridos en presencia de peróxidos orgánicos^[34] logran hacer que las arcillas se dispersen mejor en la matriz polimérica.

Tres métodos se han sugerido para la producción de nanocompuestos del grupo de las olefinas; polimerización in situ, el método de la solución y el método de intercalación en fundido. Ver Figura 16.

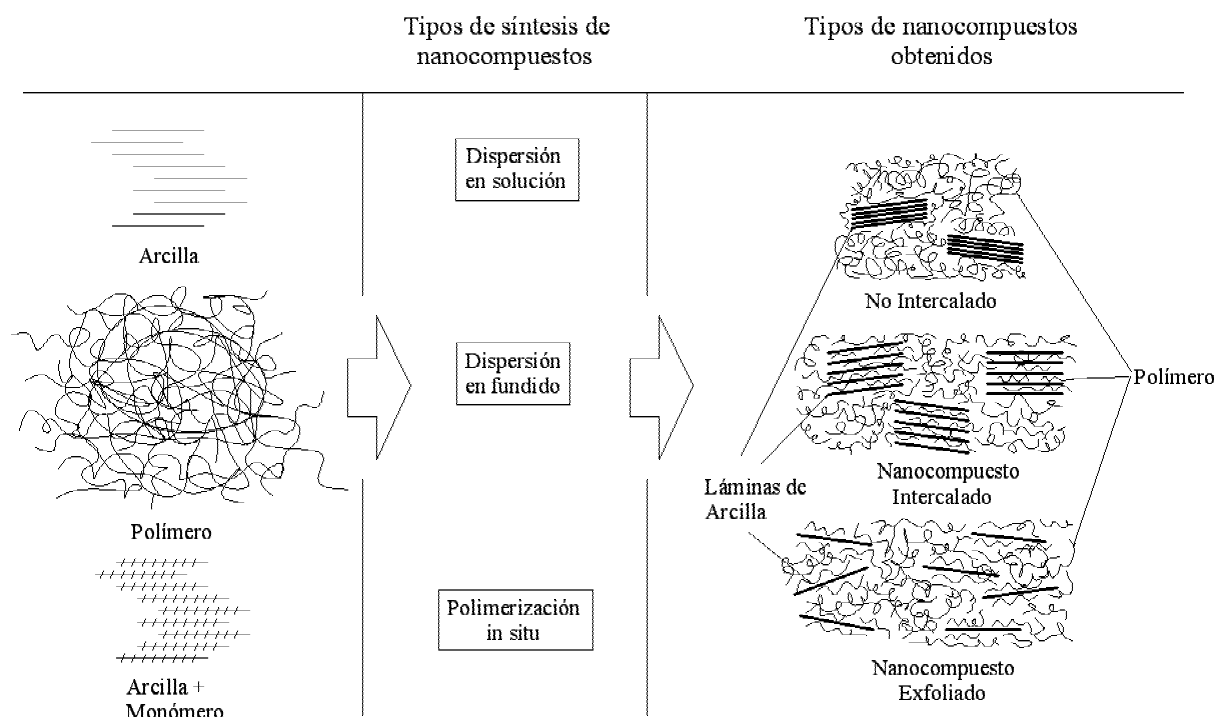


Figura 16. Representación esquemática de la síntesis de nanocompuestos poliméricos con arcillas. ^[57]

Los nanocompuestos de polímero/arcilla pueden ser preparados en polimerización in situ, donde se puede controlar la cantidad de polímero polimerizado, ya que la presencia de un iniciador o catalizador en las galerías de la arcilla lo regula. ^[35-40] Con este método la intercalación o exfoliación puede ser fácilmente controlada o regulada por la cantidad de polímero polimerizado. ^[41]

Alternativamente, el método en solución ha sido aplicado a nanocompuestos de polietileno/arcilla, sin embargo, presenta una gran deficiencia debido a que se necesita una gran cantidad de disolvente, lo cual causa dificultades en la fabricación así como problemas ambientales.

Por el contrario, poca investigación se ha centrado en la intercalación en fundido del polietileno/arcillas por la relativa dificultad de preparar nanocompuestos usando este método, pero es más rentable para sintetizar nanocompuestos.



Por ejemplo, Wang ^[42] estudio la preparación de nanocompuestos de polietileno/arcilla usando mezclas en fundido. El uso de hexadecil trimetil bromuro de amonio como un reactivo compatibilizante en la mezcla en fundido permitió obtener mejoras en la intercalación.

También Zhang y Wilkie ^[43] sintetizaron nanocompuestos por intercalación en fundido usando polietileno injertado con anhídrido maleico como compatibilizador. Sus resultados indican que el polímero se intercala en una mínima cantidad. ^[44,45]

La necesidad de investigar el mecanismo de intercalación y exfoliación de las partículas de arcillas en esta clase de polímeros no polares ha dado como resultado algunas propuestas novedosas. ^[46-50]

Así, recientemente Wang, et al, han reportado nuevas técnicas de preparación de nanocompuestos de PE/arcilla usándola en su forma natural y con una sal de amonio como reactivo compatibilizante. Encontró que se mejora el intercalado del polímero en la arcilla, obteniéndose un mejor nanocompuesto. ^[51]

Las interacciones dipolo dipolo y enlaces de hidrógeno entre los grupos funcionales injertados sobre el polietileno de alta densidad se estudió y se concluyo que el grado de injerto repercute en una mejor exfoliación de la arcilla. El comportamiento viscoelástico de estos nanocompuestos difiere significativamente del que presenta el polímero puro. La presencia de la arcilla dispersada altera la dinámica de formación de la red exhibiendo una dependencia de las propiedades reológicas. Esta red estructural es fuertemente sensible a la presencia de arcilla montmorillonita. ^[52]

Aplicando una técnica similar fueron sintetizados nanocompuestos de polietileno-arcilla con mezclas de polipropileno y polietileno injertados con maleico. La arcilla utilizada también fue modificada. Estos compuestos fueron intercalados en fundido, encontrando que con 7% de arcilla, el módulo de tensión se incrementa alrededor de un 49% y la deformación se incrementa alrededor de 15%. ^[53]

Otro estudio sobre nanocompuestos PE/arcilla se realizó utilizando el hexadecil trimetil bromuro de amonio (C16) como reactivo compatibilizante. Se encontró que los compuestos se queman de la misma manera que el material virgen pero con una reducción de 32% del calor liberado. ^[54]

La introducción de la funcionalidad, por el grupo anhídrido, en nanocompuestos de PE-arcilla resulto en un incremento sustancial de la viscosidad y elasticidad en fundido. ^[55]



Un último estudio, utilizando catalizadores de metalloceno, de polimerización in situ de PE-arcillas mostró que estos nanocompuestos exhibían temperaturas de cristalización más altas mostrando un efecto de nucleación por la montmorillonita. Además, se concluyó que la energía de activación para la cristalización de las muestras intercaladas es ligeramente menor que las muestras exfoliadas.^[56]

2.5 MEZCLADORES

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse agitación y mezcla, no son sinónimos.

La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente de manera circulatoria dentro de un tipo de contenedor. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas.

El término mezcla, o mezclado, se aplica a una gran variedad de operaciones que difieren ampliamente en el grado de homogeneidad del material.

El mezclado es una operación importante, incluso fundamental en casi todos los procesos químicos y físicos. La mezcla de líquidos, sólidos secos y de pastas viscosas se parecen en cierto modo al mezclado de líquidos de baja viscosidad. Ambos procesos implican la interposición de dos o más componentes separados para formar un producto más o menos uniforme. Sin embargo, hay diferencias significativas entre los dos procesos. La mezcla de líquidos depende de la creación de corrientes de flujo que transportan el material no mezclado hasta la zona de mezcla adyacente al agitador. En el caso de pastas viscosas o masas de partículas sólidas no se producen tales corrientes y el mezclado tiene lugar por otros procedimientos. En consecuencia, normalmente se requiere mucho más energía para el mezclado de pastas y sólidos secos que para la mezcla de líquidos.^[58]

2.5.1 TIPOS DE MEZCLADORES

Los límites entre los campos de aplicación de los distintos tipos de mezcladores no son nítidos. Los mezcladores de agitación que se describen no se utilizan cuando la viscosidad es superior a 2000 Poise, especialmente si el líquido es no newtoniano.



Los mezcladores que se describen a continuación son de cubetas intercambiables, amasadoras, dispersoras y masticadores, mezcladores extrusores, rodillos mezcladores, mezcladores de moletas y cubeta, y batidoras.

Mezcladores de cubetas intercambiables.

Estos dispositivos pueden mezclar líquidos o pastas ligeras como ocurre en el procesado de alimentos o en la fabricación de pinturas. Una cubeta intercambiable, de 20 a 400 litros de capacidad, contiene el material objeto de mezclado, un agitador que consta de varias placas verticales o dedos, unidas con un cabezal rotatorio y situadas cerca de la pared de la cubeta, las placas están ligeramente alabeadas. El agitador va montado excéntricamente con respecto al eje de la cubeta, que a su vez está sujeta a un soporte que gira en dirección contraria a la del agitador, de tal forma que en la operación todo el líquido o pasta contenidos en la cubeta son llevados hasta las placas para ser mezclados. Cuando la mezcla ha terminado, se levanta el cabezal del agitador retirando así las placas fuera de la cubeta. Se limpian entonces las placas y se sustituye la cubeta por otra que contiene una nueva carga.

Batidora.

En la batidora el vaso o cubeta son estacionarios. El agitador tiene un movimiento planetario. A medida que gira también se desplaza de forma que recorre todas las partes del vaso. Las batidoras se diseñan de forma que las paletas pasan muy cerca de las paredes y del fondo del vaso de mezclado.

Amasadoras, dispersores y masticadores.

El amasado es un método de mezclado que se utiliza con sólidos plásticos o deformables. Aplastan la masa, la remueven sobre si misma y la aplastan nuevamente. La mayor parte de las amasadoras también desgarran y cortan la masa por la acción de una pala móvil y una superficie estacionaria. La amasadora de dos brazos se utiliza para tratar suspensiones, pastas y masas plásticas ligeras. El dispersor es de construcción más robusta y admite mas potencia que una amasadora; se emplea para incorporar aditivos y colorantes en materiales espesos. Un masticador o masticadora es todavía más robusto y admite más potencia. Puede desmenuzar trozos de goma y tratar las masas plásticas más duras que puedan presentarse. Las masticadoras se denominan con frecuencia mezcladores intensivos.

En todos estos tipos de aparatos el mezclado se realiza por medio de dos robustas palas dispuestas paralelamente sobre ejes horizontales que giran cerca de un fondo con forma de silla de montar. Las palas o brazos giran uno en sentido contrario al otro en la parte superior arrastrando la masa hacia abajo, donde sufre un efecto de cizalla entre las palas y el fondo. Los círculos de rotación de las palas son generalmente



tangenciales, de forma que pueden girar a distintas velocidades con una relación deseada.

En muchas amasadoras la cubeta está abierta, pero en algunos diseños, llamados mezcladores internos, la cámara de mezclado está cerrada durante el ciclo de operación. Por lo tanto, se puede utilizar una tapadera cuya cara inferior se ajusta al volumen barrido por las palas.

Mezcladoras continuas.

Los aparatos descritos hasta ahora operan por cargas con cantidades de material relativamente pequeñas. Cuanto más difícil resulta la mezcla del material, más pequeña tiene que ser la carga. Muchos procesos industriales son continuos, con flujo continuo estacionario de entrada y salida de las unidades; en tales procesos no se puede incorporar fácilmente equipos que operen en discontinuo. Las mezcladoras continuas pueden operar con materiales ligeros o no muy duros. En un diseño típico, la mezcladora continua contiene un eje horizontal, que gira lentamente en una cámara de mezclado, dispone en su superficie varias filas de dientes en forma de espiral, que favorece el desplazamiento del material a través de la cámara. Los dientes del rotor pasan muy próximos a los dientes fijos de la pared de la carcasa.

Mezcladores-extrusores.

Si la abertura de carga de la mezcladora se cierra cubriéndola con una boquilla de extrusión, Las palas inclinadas del rotor genera una presión considerable en el material. La mezcla es cortada y doblada mientras permanece en la cámara de la mezcla y está sometida a una cizalladura adicional a medida que fluye a través de la boquilla. Otros mezcladores-extrusores funcionan de la misma forma, contienen uno o dos ejes horizontales, con movimiento rotatorio, que no de vaivén, si no que llevan una hélice o bien palas situadas en disposición helicoidal. La presión se genera reduciendo el diámetro de la cámara de mezclado, o bien por ambos efectos: los mezcladores-extrusores operan de forma continua con materiales termoplásticos, pastas, arcillas y otros materiales difíciles de mezclar. Algunos están provistos de un encamisado para calefacción y de conexiones de descarga para permitir retirar agua o disolventes procedentes del material sometido a proceso.

Mezcladores de rodillos.

Otra forma de someter las pastas y sólidos deformables a un intenso esfuerzo cortante consiste en hacerlos pasar entre los rodillos metálicos lisos que giran a velocidades diferentes. Mediante pasos repetidos entre tales rodillos de mezcla se pueden dispersar correctamente aditivos sólidos en materiales pastosos o plásticos duros.

Mezcladores de moletas.

Una mezcladora de moletas produce una acción de mezclado diferente a la de los demás aparatos. El moleteado es una acción de frotamiento similar a la que tiene lugar en un mortero. En el tratamiento a gran escala esta acción es efectuada por los anchos y pesados volantes. En este particular diseño de moleteadora el recipiente es estacionario y el eje vertical central es móvil, dando lugar a que los volantes de la moleteadora rueden en un recorrido circular sobre una capa de sólidos situados en el fondo del recipiente. La acción de frotamiento se produce como consecuencia del deslizamiento de los volantes sobre los sólidos. ^[58]

2.5.2 MEZCLADORES ESTATICOS

Los trabajos más difíciles de mezclado se llevan a cabo mediante mezcladores sin movimiento, que son aparatos comerciales en que los elementos estacionarios dividen y recombinan sucesivamente partes de la corriente del fluido. En el mezclador de la Figura 17 cada uno de los elementos helicoidales cortos divide la corriente en dos, la hace girar un ángulo de 180° , y la descarga en el elemento siguiente que está colocado formando un ángulo de 90° con el borde trasero del primer elemento. El segundo elemento divide nuevamente la corriente ya dividida y la gira 180° en sentido contrario. Por lo tanto, para n elementos hay 2^n divisiones y recombinaciones, o sea, más de un millón en un mezclador de 20 elementos. La caída de presión típica es de unas cuatro veces mayor que en la misma longitud de tubería vacía. La mezcla aun para materiales altamente viscosos, es excelente después de 6 a 20 elementos. Los mezcladores estáticos se utilizan para el mezclado de líquidos, dispersión de gases y líquidos, reacciones químicas y transmisión de calor. Son especialmente eficaces para el mezclado de fluidos de baja viscosidad. ^[58] Ver figura 17.

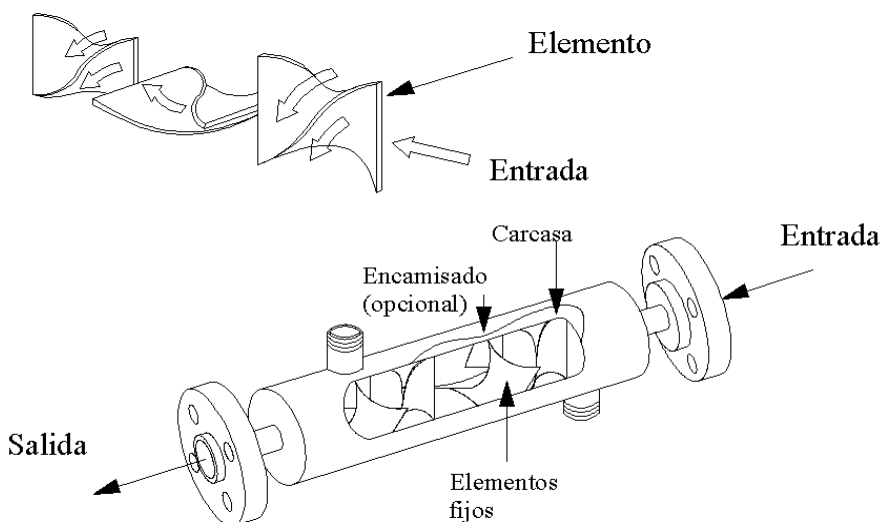


Figura 17. Mezclador sin movimiento (estático).

2.5.3. CABEZAL MEZCLADOR ESTÁTICO

El cabezal mezclador estático tiene como función mezclar un fluido altamente viscoso con sólidos mediante flujos elongacionales. Esta compuesto de zonas de compresión y expansión sucesivas para producir una mezcla bien dispersa y distribuida.

El modelo primario del cabezal se puede apreciar en las Figuras 18 y 19.



Figura 18



Figura 19

El cabezal está diseñado para colocarlo justo al final de la etapa de dosificación del extrusor y antes del dado. Figura 20.



Figura 20

El cabezal tiene 6 elementos sucesivos de compresión-expansión.

La mejor abertura para el paso del material fundido dentro del cabezal esta relacionado con la caída de presión y aumento de torqué. El cabezal cuenta con dos partes, como se muestra en la Figura 21.



Figura 21

El sistema va unido mediante una rosca y cuerda lo cual permite una manipulación de la abertura donde pasará el polímero fundido y arcilla. Ver Figura 22 y 23.



Figura 22



Figura 23

El material a la salida del extrusor entra al cabezal por un orificio que dirige el fluido en cuatro salidas a las cámaras del mezclador, en las cuales empieza su recorrido por las etapas sucesivas de compresión y expansión. A lo largo de estas etapas la velocidad del flujo aumenta debido a que disminuye el diámetro del área circular transversal por donde debe pasar el fluido. Ver Figura 24



Figura 24

El cabezal esta provisto de un sistema de calentamiento por resistencias eléctricas y tiene un orificio para colocar un termopar. Ver Figuras 25 y 26



Figura 25



Figura 26

Se le implementaron zonas de sujeción para llaves, la cual permite variar la abertura del cabezal. Ver Figura 27.



Figura 27

Al terminar de pasar por la última etapa todo el material coincide en una corriente única y entonces pasa al dado de donde saldrá el material ya mezclado. Ver Figura 28.



Figura 28

2.6 REOLOGIA

La reología es la ciencia que estudia la forma en que los materiales se deforman cuando se les aplica una fuerza. Es decir, “la ciencia del flujo y la deformación”, que estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas y materiales cristalinos. Por lo tanto el campo de la reología se extiende, desde la mecánica de fluidos newtonianos por una parte, hasta la elasticidad de Hooke por otra. La región comprendida entre ellas corresponde a la deformación y flujo de todos los materiales pastosos, suspensiones y plásticos fundidos.

El flujo de plásticos en procesos reales es un mecanismo muy complejo que involucra flujo en tres dimensiones bajo condiciones no-isotérmicas y no estacionarias. En muchos casos es razonable aproximar el comportamiento modelado del flujo como una serie de flujos visco métricos ideales simplificados. ^[59]

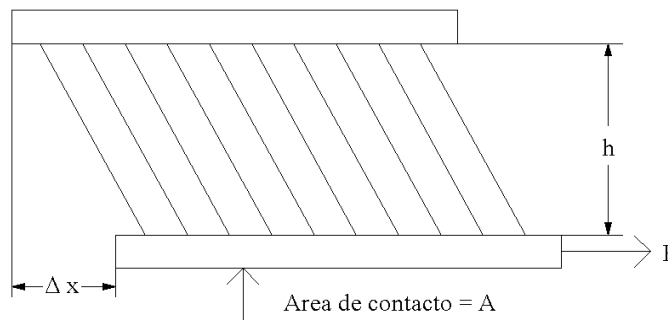
2.6.1 ESFUERZO

Al describir el comportamiento reológico de un material en una forma cuantitativa, es necesario establecer medidas definidas de fuerza y deformación, por ejemplo, definir constantes reológicas del material tales como la viscosidad de un flujo, o funciones del material como el módulo de relajación de un hule. Dos tipos de fuerza pueden actuar sobre un elemento de fluido. Una fuerza corporal actúa directamente en la masa del elemento como resultado de un campo de fuerza. Generalmente solo la gravedad necesita ser considerada, pero un campo magnético puede generar también una fuerza corporal. Otro tipo de fuerza es la superficial, que es el resultado del contacto de un elemento fluido con una pared sólida o con los elementos de fluido circundante. Son las fuerzas superficiales las que son de interés en la reología.

El esfuerzo es la fuerza que actúa sobre un cuerpo dividida entre el área sobre la que actúa.

$$\sigma = F/A$$

Los esfuerzos compresivos y los tensionantes son dos tipos de esfuerzos normales llamados así porque la dirección de la fuerza es normal (perpendicular) a la superficie sobre la que actúa. Además, existen esfuerzos de corte; en este caso, la dirección de la fuerza es tangencial a la superficie sobre la que actúa, como se muestra en la Figura 29



La Figura 29 muestra la deformación de corte simple, en la cual la muestra está contenida entre dos platos planos con un espacio entre ellos (h). El plato inferior se mueve en una dirección paralela a su mismo plano mientras que el plato superior permanece inmóvil. El esfuerzo de corte es la fuerza de corte dividida entre el área tangencial, para referirse al esfuerzo de corte en una deformación cortante simple.

$$\sigma = \text{Fuerza cortante} / \text{Área tangencial}$$

Este esfuerzo cortante se ilustra en la Figura 30. En la guillotina la hoja de acero no corta a través del papel como lo haría un cuchillo, sino que lo corta al aplicar suficiente fuerza. Ver Figura 30b.

El papel se separa en dos piezas por la acción de un plano deslizante. La resistencia al corte es proporcionada por las fuerzas cohesivas que mantienen juntas a las fibras del papel. Cuando se aplica suficiente fuerza a la cuchilla, la resistencia creada balanceara la fuerza aplicada. Esta resistencia, o esfuerzo de corte, es inversamente proporcional al área cortada y directamente proporcional a la fuerza aplicada

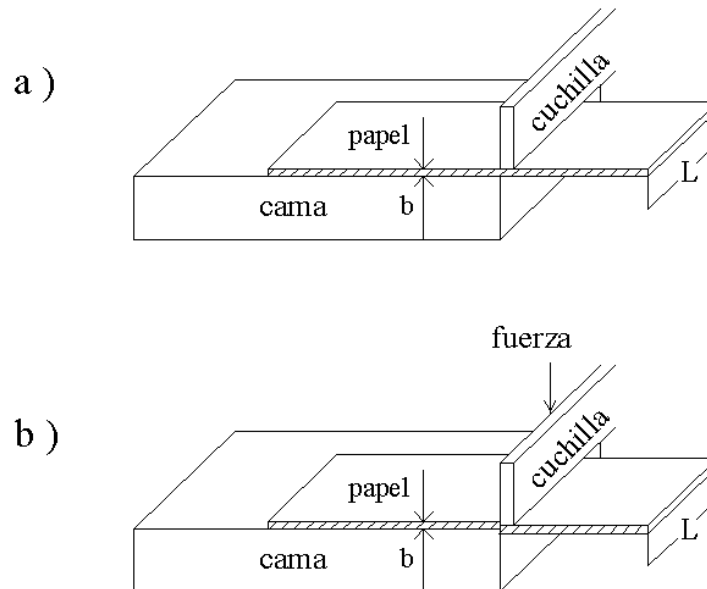


Figura 30a y 30b

El esfuerzo cortante tiene las mismas unidades que la presión pero difiere de esta en dos aspectos. La presión es una fuerza aplicada por unidad de área, mientras que el esfuerzo cortante es una resistencia a una fuerza aplicada. La presión actúa normal a la superficie sobre la que actúa, mientras que el esfuerzo cortante reacciona en el plano de la superficie que esta cortándose.^[59]

2.6.2 RAPIDEZ DE CORTE

Cuando un material está siendo cortado, las capas de material se mueven a diferente rapidez. La rapidez relativa de movimiento de las capas es solamente un factor en la rapidez de corte. El otro factor es la distancia entre los planos de corte. Por ejemplo, si se engrasa una sartén con los dedos, la superficie de los dedos es un plano y la sartén es otro. La rapidez de corte dependerá de la velocidad de los dedos y la distancia entre los dedos y la superficie del sartén, esto es, el espesor de la grasa, entre mas grande sea la

rapidez de movimiento de los dedos, mas grande será la rapidez de corte. También, entre menos sea el espacio entre los dedos y el trasto, mas grande será la rapidez de corte. Esto puede ser expresado como:

$$\text{Rapidez de corte} = \text{Velocidad/Espacio entre los planos}$$

Uno de los principales estudios de la reología es determinar la relación entre la rapidez de corte y el esfuerzo de corte. ^[59]

2.6.3 ESFUERZO CORTANTE

En la deformación cortante una fuerza “F” es aplicada tangencialmente a un elemento de volumen como se muestra en la Figura 31 de tal forma que la lámina superior es desplazada una distancia “u”. El desplazamiento relativo de las dos capas es la deformación cortante simple

$$(\gamma) \gamma = u/h$$

El esfuerzo de corte esta dado por:

$$\tau = F/A$$

Para el flujo viscoso es más usual considerar la rapidez de deformación, o rapidez de corte, que esta dada por:

$$\dot{\gamma} = v/h \text{ ó } dv/dx$$

Donde v es la velocidad en la dirección z^[59]

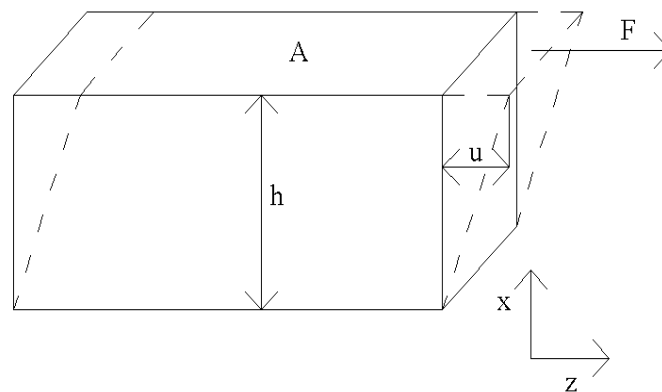


Figura 31

2.6.4 FLUJO EXTENSIONAL

La manera mas simple de podernos imaginar para generar una extensión uniaxial es la de asir una barra liquida de cada lado y dar un tirón al final de ella. Esto se logra aplicando una fuerza normal a las caras opuestas del elemento como se indica en la Figura 32. El esfuerzo tensionante (σ) y la deformación están dadas por

$$\sigma = F/A$$

$$\varepsilon = l - l_0/l_0$$

Donde “ l_0 ” es la longitud inicial de la muestra y “ l ” es la longitud a un tiempo “ t ”. De igual forma, podemos definir una rapidez de deformación elongacional ($\dot{\varepsilon}$), que esta dada por:

$$\dot{\varepsilon} = dv/dz$$

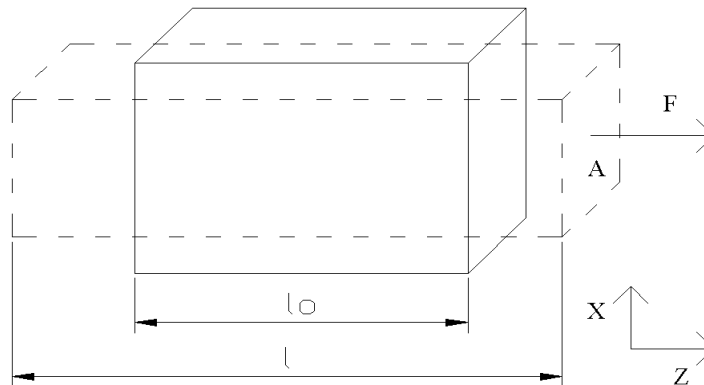


Figura 32. Geometría de flujo elongacional

Los flujos extensionales son de importancia en los procesos y es bien sabido que son más fuertes que los flujos cortantes en el sentido del grado de deformación extensional de cadenas individuales.

Una importante regla es que la viscosidad extensional uniaxial es tres veces más que la viscosidad cortante para un fluido newtoniano.

$$\text{Nu} = 3\eta^{[60]}$$

2.6.5 FLUIDOS NEWTONIANOS

Consideremos un fluido (líquido o gas) contenido entre dos grandes láminas planas y paralelas, de área “A”, separadas entre sí por una distancia muy pequeña “Y”, ver Figura 7. Supongamos que el sistema está inicialmente en reposo, pero que al cabo del tiempo “t” = 0, la lámina inferior se pone en movimiento en la dirección del eje “x”, con una velocidad constante “V”. A medida que transcurre el tiempo el fluido gana cantidad de movimiento, y finalmente se establece el perfil de velocidad en régimen estacionario, que se indica en la Figura 33. Una vez alcanzado dicho estado estacionario de movimiento, es preciso aplicar una fuerza constante “F” para conservar el movimiento de la lámina inferior. Esta fuerza viene dada por la siguiente expresión (suponiendo que el flujo es laminar): $F/A = \mu V/Y$

Es decir, que la fuerza por unidad de área es proporcional a la disminución de la velocidad con la distancia “Y”. La constante de proporcionalidad “ μ ” se denomina viscosidad del fluido.

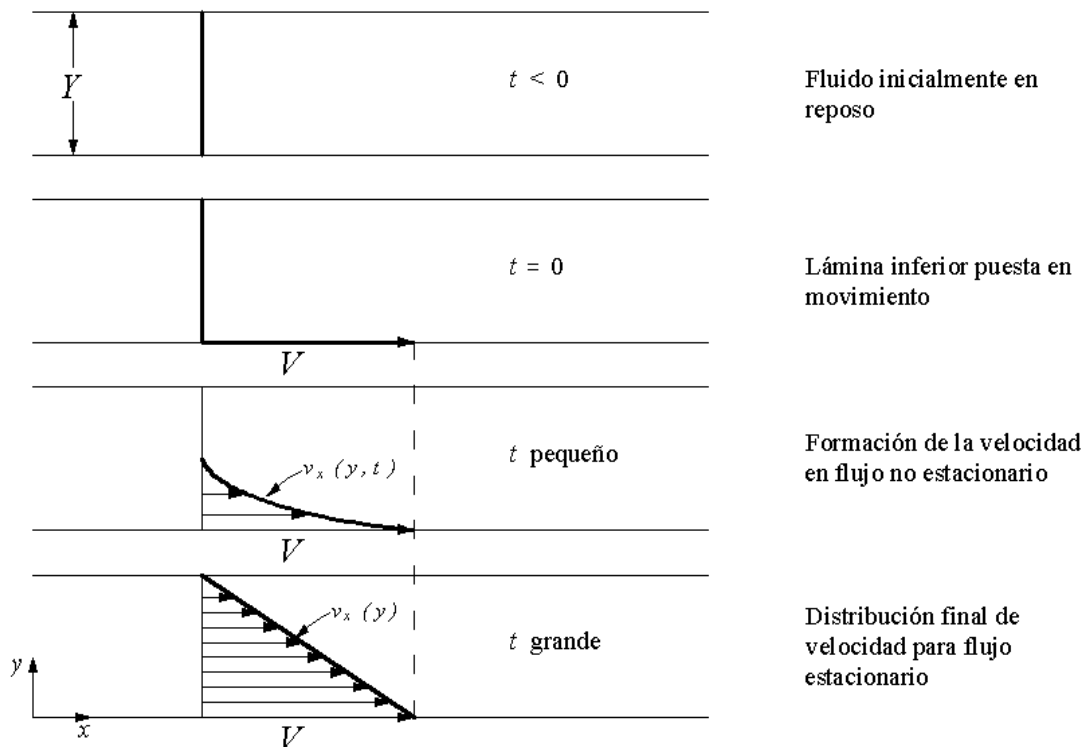


Figura 33

$$F/A = \mu V/Y$$

(Ecuación 1)



Para la posterior utilización de la ecuación 1 es conveniente expresarla en una forma más explícita. El esfuerzo cortante que se ejerce en la dirección “x” sobre la superficie de un fluido, situada a una distancia constante “Y”, por el fluido existente en la región donde “Y” es menor, se designa por “ τ_{yx} ,” y el componente “x” del vector de velocidad del fluido, por “ v_x .” Téngase en cuenta que “ v_x ” no es igual a $\partial v/\partial x$; De acuerdo con estos símbolos, La ecuación 1 queda de la siguiente forma:

$$\tau_{yx} = - \mu \, dv_x/d_y \quad (\text{Ecuación 2})$$

Es decir, que la fuerza de cizalla por unidad de área es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local. Ésta es la ley de Newton de la viscosidad, y los fluidos que la cumplen se denominan fluidos Newtonianos. En otras palabras los fluidos newtonianos se caracterizan por una viscosidad constante que es independiente de la rapidez de corte.

Resulta también conveniente interpretar la ecuación 2 en esta otra forma. En las intermediaciones de la superficie que se mueve, donde $y = 0$, el fluido adquiere una determinada cantidad de movimiento en la dirección del eje “x”. Este fluido comunica a su vez, parte de su cantidad de movimiento a la capa adyacente de líquido, dando lugar a que se mantenga en movimiento en la dirección “x” a través del fluido en la dirección “y”, por consiguiente, “ τ_{yx} ” puede interpretarse también como la densidad de flujo viscoso de cantidad de movimiento “x” en la dirección “y”. Esta interpretación está en íntima relación con la naturaleza de los procesos de transporte de cantidad de movimiento, y se corresponde para el transporte de materia y energía. ^[61]

2.6.6 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

De acuerdo con la ley de la viscosidad de Newton (ecuación 2), al representar gráficamente τ_{yx} , frente a $-(dv_x/d_y)$ para un fluido determinado, debe de obtenerse una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, y cuya pendiente es la viscosidad del fluido a una cierta temperatura y presión. En efecto, la experiencia demuestra que para todos los gases y los líquidos homogéneos no polimerizados τ_{yx} , es directamente proporcional a $-(dv_x/d_y)$. Sin embargo, existen algunos materiales industrialmente importantes que no se comportan de acuerdo con la ecuación 2. Se conoce a estas sustancias con el nombre de fluidos no newtonianos

En estado no estacionario pueden existir otras formas de comportamiento no newtoniano, El estudio cuantitativo de estos y otros tipos de, de comportamientos no newtonianos dependientes del tiempo, es uno de los importantes campos de la

mecánica de fluidos que todavía está muy poco desarrollado. La Figura 34 es una descripción grafica del comportamiento reológico de los modelos. Téngase presente que estas ecuaciones no son más que formulas empíricas de ajuste de curvas, y por consiguiente, es muy aventurado emplearlas fuera del intervalo de los datos experimentales utilizados en su obtención. ^[61]

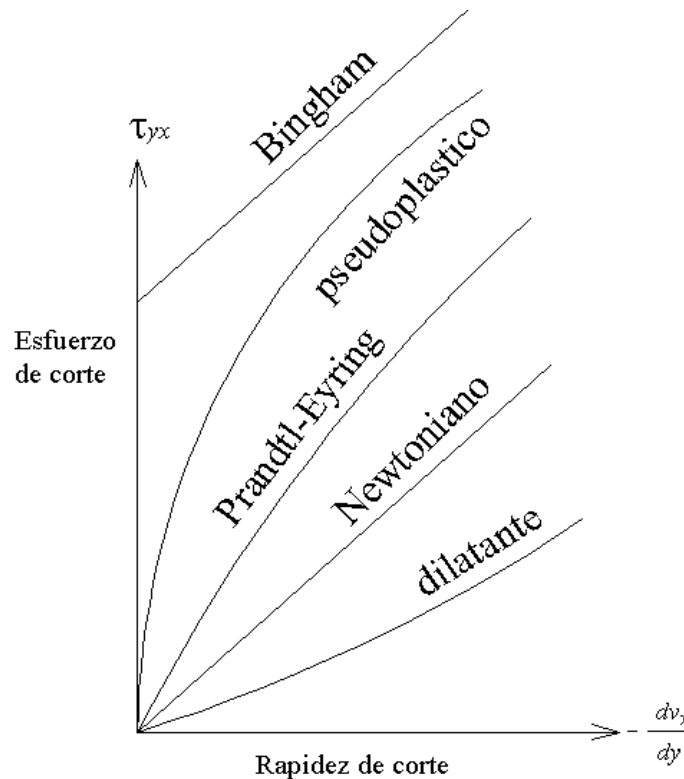


Figura 34 Tipos de fluidos. ^[61]

2.6.7 FLUIDOS DILATANTES

Son los fluidos donde la viscosidad aumenta al aumentar la rapidez de corte. Ciertos plastisoles de PVC presentan este comportamiento en un cierto intervalo de rapidez de corte.

2.6.8 FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS

Para estos materiales la viscosidad disminuye al aumentar la rapidez de corte. Esta es la respuesta más común para los fundidos de polímero y no se puede especificar la viscosidad del material sin especificar la rapidez de corte y la temperatura.



2.6.9 PLASTICOS DE BINGHAM

Los materiales de este tipo no se deforman debajo de un cierto esfuerzo umbral. Arriba de este esfuerzo de cedencia, el modelo se comporta como un fluido newtoniano. Este modelo resulta suficientemente exacto para muchas pastas, plastilinas y suspensiones finas son ejemplos de materiales que pueden ser descritos como plásticos de Bingham .

En estado no estacionario pueden existir otras formas de comportamiento no newtoniano

2.6.10 FLUIDOS TIXOTROPICOS

Por ejemplo, los fluidos que presentan una disminución limitada de viscosidad con el tiempo, al aplicar repentinamente un esfuerzo cortante se denominan tixotrópicos

2.6.11 FLUIDOS REOPECTICOS

Los fluidos reopécticos son los que dan lugar a un aumento de viscosidad con el tiempo en estas condiciones de estado no estacionario.

2.6.12 FLUIDOS VISCOELASTICOS

Los fluidos que recobran parcialmente la forma original al cesar el esfuerzo cortante se denominan viscoelásticos.^[61]



3 PROCESAMIENTO

3.1 EXTRUSION

El proceso de extrusión es la técnica de procesado de polímeros más importante. La extrusión se puede definir como el proceso en el cual el material es forzado a fluir de una manera continua a través de un barril, el cual le da forma para producir un producto. La combinación tornillo-barril es el componente central de todo un grupo de máquinas de procesado, las cuales incluyen el extrusor, inyectoras, y máquinas de moldeo. En todos los casos el tornillo o husillo esta convirtiendo continuamente el polímero sólido en fundido, el cual tiene muy alta viscosidad, bombeándolo a través de un dado a presiones altas. El polímero sólido está generalmente en forma de gránulo ó polvo, el cual es alimentado a la tolva del extrusor, pueden alimentarse homopolímeros, copolímeros o mezclas de polímeros, los cuales pueden estar formulados con aditivos tales como plastificante, antioxidantes, pigmentos, lubricantes, agentes espumantes, etc. Los aditivos afectarán sus características y propiedades.

El polímero sólido es fundido, homogenizado y bombeado a través del dado a presiones y temperaturas altas, en este caso el extrusor efectúa un trabajo de plastificación y hace las veces de una bomba y además suministra energía calorífica para fundir el polímero. La energía calorífica proviene del barril caliente, el cual es equipado con resistencias que suministran la energía por conducción al polímero y mediante la energía mecánica de rotación del tornillo, la cual es introducida y convertida por disipación viscosa a energía térmica. Además de transportar el polímero hacia el dado y fundirlo, el tornillo debe mezclar y homogenizar el fundido; una medida de la calidad del producto es la uniformidad de la temperatura y la homogeneidad del fundido que sale del extrusor. El mezclado debe ser hecho por el tornillo a pesar del tiempo de residencia relativamente corto del polímero en el extrusor, esto para prevenir la degradación térmica del polímero. ^[62]

3.2 EXTRUSOR DE UN HUSILLO

El extrusor de un solo husillo, es básicamente un tornillo girando dentro de un barril y no puede por si mismo empujar el material hacia delante. De hecho, si por una cierta razón el material que llena los canales del tornillo se pega al tornillo, este último se convierte en un cilindro que rota sin la acción de la expulsión. Para ser empujado hacia delante, el material no debe de rotar con el tornillo o debe rotar a una velocidad menor a la del tornillo.

La única fuerza que hace avanzar el material a lo largo del barril es la fricción contra la superficie interna del barril. Una mayor fricción, dará el mayor movimiento de avance del material. Para incrementar la superficie de fricción la longitud del barril se aumenta. El cociente de la longitud del barril con respecto al diámetro del tornillo (L/D) es de gran importancia para el extrusor de un solo husillo, un gran cociente (L/D) significa mas fricción, lo cual, en consecuencia, significa mas acción propulsora del material bajo las mismas condiciones de extrusión. Ver Figura 35.

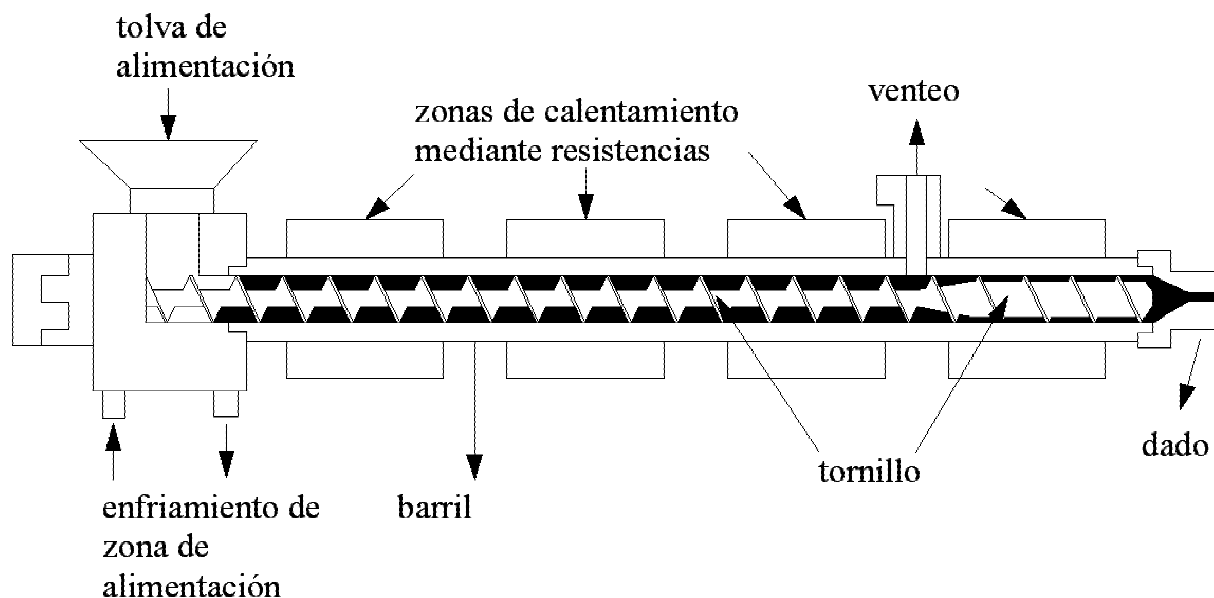


Figura 35. Partes que componen un extrusor

El desempeño del extrusor depende en gran parte del diseño del tornillo y de las condiciones de operación. Una de las principales variables geométricas del tornillo es la profundidad del canal.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE UN EXTRUSOR MONO-HUSILLO

El husillo de un extrusor tiene una o dos hélices a lo largo y el diámetro de la hélice exterior es constante en toda la longitud para permitir el cierre del barril. La base, sin embargo, es de diámetro variable, así el canal del espiral varía en profundidad. En general, la profundidad del canal disminuye desde la alimentación hasta el dado. A consecuencia del decrecimiento de la profundidad del canal se incrementa la presión a lo largo del extrusor y esto es lo que lleva al polímero al derretido al dado.

El extrusor se divide en tres zonas, también esta la zona del dado la cual se examina aparte.

Zona de Alimentación: su función es precalentar el polímero y transportarlo a las zonas subsecuentes. La profundidad del husillo es mayor, permitiendo a los sólidos avanzar a la misma velocidad que en las otras secciones del husillo. La longitud de esta zona es para asegurar una alimentación adecuada. Esta zona variará dependiendo del polímero para optimizar el desarrollo. ^[62]

Zona de Compresión: en la segunda zona ha disminuido la profundidad del canal. Se describen muchas funciones para esta zona, usualmente llamada de “compresión” o “transición”. Primero, se extrae el aire atrapado entre los gránulos o pellets. Posteriormente, la transferencia de calor desde las paredes del barril caliente se mejora conforme el grueso del material disminuye. A continuación, la densidad cambia conforme se va derritiendo el material. Nuevamente, existen variaciones en cada diseño para diferentes polímeros. Para un polímero con un derretido gradual, por ejemplo, Polietileno de baja densidad, un husillo como se muestra en la Figura 36, se divide uniformemente en tres zonas. Husillos de este tipo usualmente se refieren a husillos para polietileno. Si el derretido del polímero es relativo, se utiliza un periodo corto de compresión.

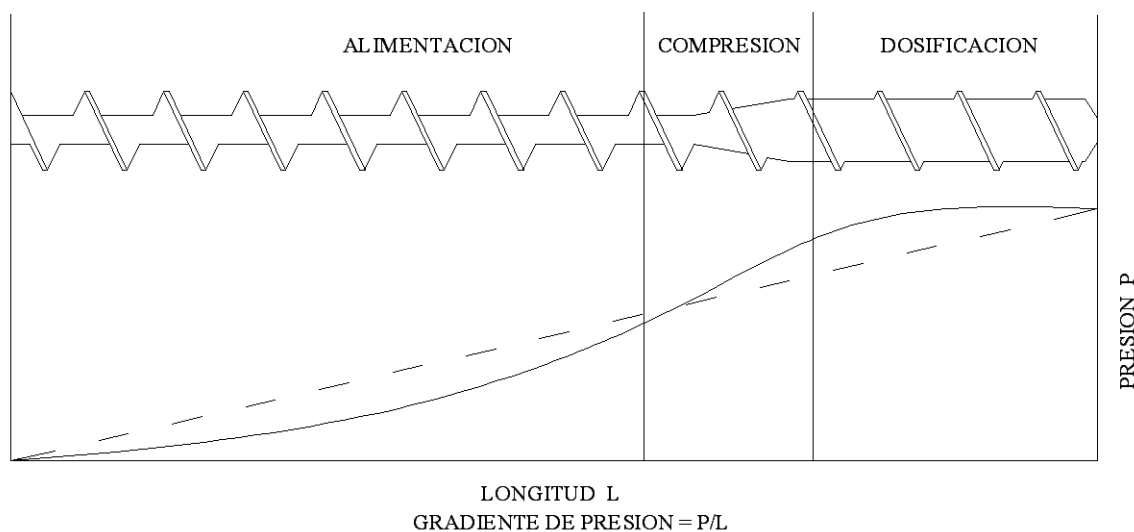


Figura 36. Zonas de un husillo

Zona de Dosificación: la función es homogenizar el derretido y por lo tanto la alimentación a la región del dado sea de calidad homogénea a temperatura y presión constante.

Zona del Dado: la última zona del extrusor es la del dado. Lo que se localiza en esta zona es una malla de empaque. Esta comprime un plato perforado de acero llamado plato rompedor y un empaque perforado de dos o tres capas de alambre.

3.4 DISEÑO DEL HUSILLO

En el procesamiento de un material polimérico el tiempo de residencia y la cantidad de esfuerzos aplicados al material es de suma importancia, ya que de ella depende que el material mantenga todas sus propiedades iniciales y además le sean agregadas otras como colorantes, cargas, aditivos o se hagan compuestos con otros materiales, por ello el husillo como parte principal del proceso de alimentación, fundido, mezcla y dosificación, debe mantener ciertos parámetros para su diseño. Ver Figura 37.

Las principales variables a considerar en un diseño son:

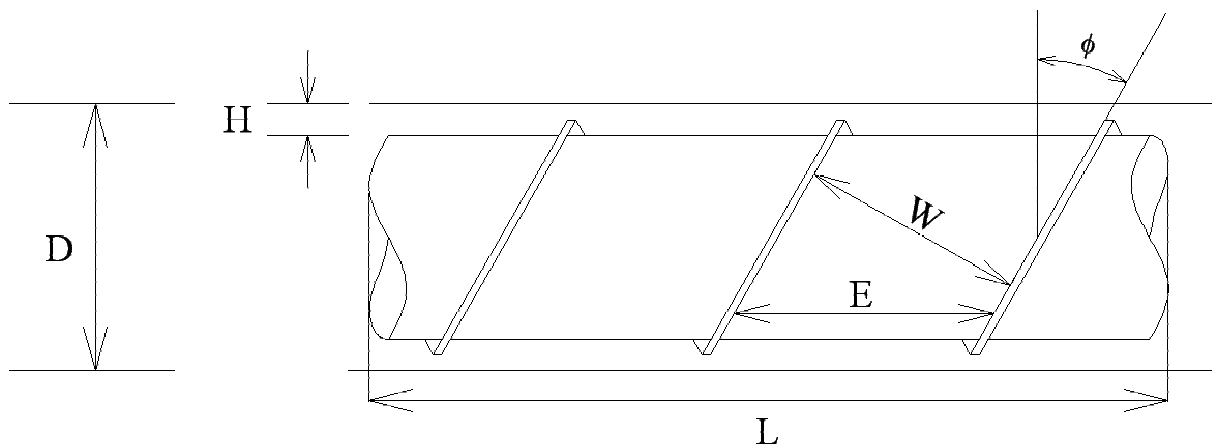


Figura 37. Geometría del tornillo de un extrusor.

Donde:

H = Profundidad del canal

W = Ancho del canal

L = Longitud del tornillo

D = Diámetro del barril

E = Distancia en dirección axial entre 2 hélices del tornillo

ϕ = Ángulo de la hélice

La relación Longitud / Diámetro, L/D es una característica dimensional importante para el tornillo, la anchura de la hélice es aproximadamente 0.1D para la forma estándar.

Una separación normal de Husillo / Barril es de ($\cong 0.2$ mm).

La relación de compresión es probablemente el termino mas usado en el diseño de tornillos, la mayoría acepta la definición de acuerdo a la Figura 38.

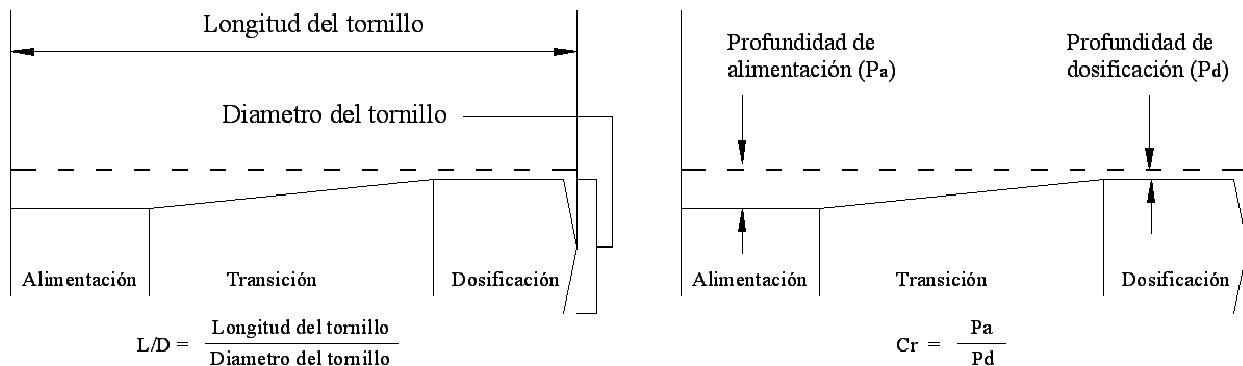


Figura 38

Como ejemplo, considérese que un tornillo de 2.5" tiene una profundidad de alimentación (P_a) de 0.3" y una profundidad de dosificación de (P_d) de 0.1". La relación de compresión se determinaría como $Cr = 0.3"/0.1" = 3:1$. Pero adicionalmente, podría tenerse un tornillo de 2.5" con una profundidad de alimentación (P_a) de 0.45" y una profundidad de dosificación de (P_d) de 0.15". Entonces la relación de compresión sería equivalente a; $Cr = 0.45"/0.15" = 3:1$

Ambos tornillos tienen una relación de compresión de 3:1, pero son totalmente diferentes. El primero tiene una tasa de corte mucho mayor y entregará apenas 2/3 del flujo másico del segundo. El segundo tornillo, además de tener mayor capacidad de procesamiento, operará con menores tasas de corte y por tanto podrá procesar materiales sensibles a esfuerzos cortantes.

3.5 EXTRUSOR DOBLE HUSILLO

El principio básico del extrusor de doble husillo para material termoplástico fue concebido en Italia en los últimos años de los 30's cuando se estaba trabajando con un problema de mezcla de acetato de celulosa sin el uso de un disolvente. Entonces se diseñó un sistema de tornillos interdentados corrotativos, lo cual probó ser efectivo para el caso. Ya en 1939, un grupo de estas máquinas fueron vendidas.

La primera patente del extrusor de doble husillo corrotativo fue obtenida en Italia (I.pat. 370578) el 6 de febrero 1939. Este nuevo concepto fue encontrado inmediatamente muy interesante por varias compañías adquiriendo los derechos de estas patentes.

Un poco después, se diseñó un extrusor adoptando y patentando el extrusor de doble husillo contrarrotativo (B.pat. 677945). Desde entonces los extrusores se han desarrollado en un alto grado y con diferentes tipos de husillos, cada fabricante encontró su propia solución a cada uno de los varios requerimientos del proceso de extrusión.

Bajo el nombre general de extrusores de doble husillo son usualmente agrupadas máquinas que examinadas a fondo resultan tener amplias y diferentes características. Entre estos extrusores, podemos distinguir varias categorías básicas. Dejando a un lado los extrusores con múltiples tornillos, extrusores con uno, dos o más tornillos adicionales al tornillo principal y otras configuraciones que son sobretodo experimentales, nos referiremos a los extrusores con sólo dos tornillos de igual longitud colocados dentro del mismo barril. Ver Figura 39, 40, 41 y 42.

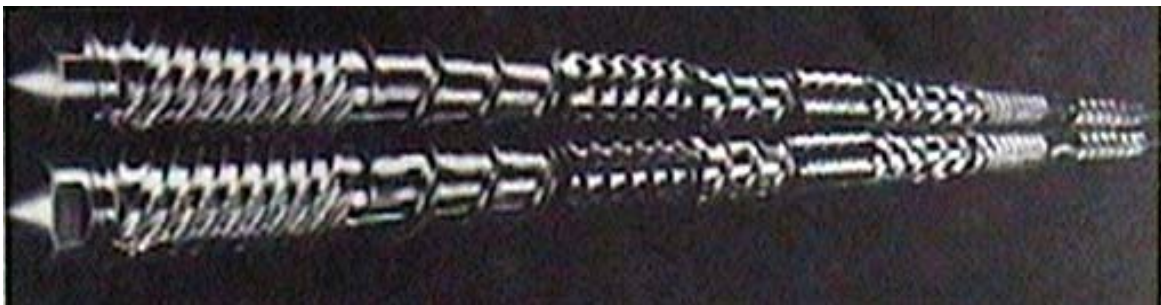


Figura 39



Figura 40



Figura 41

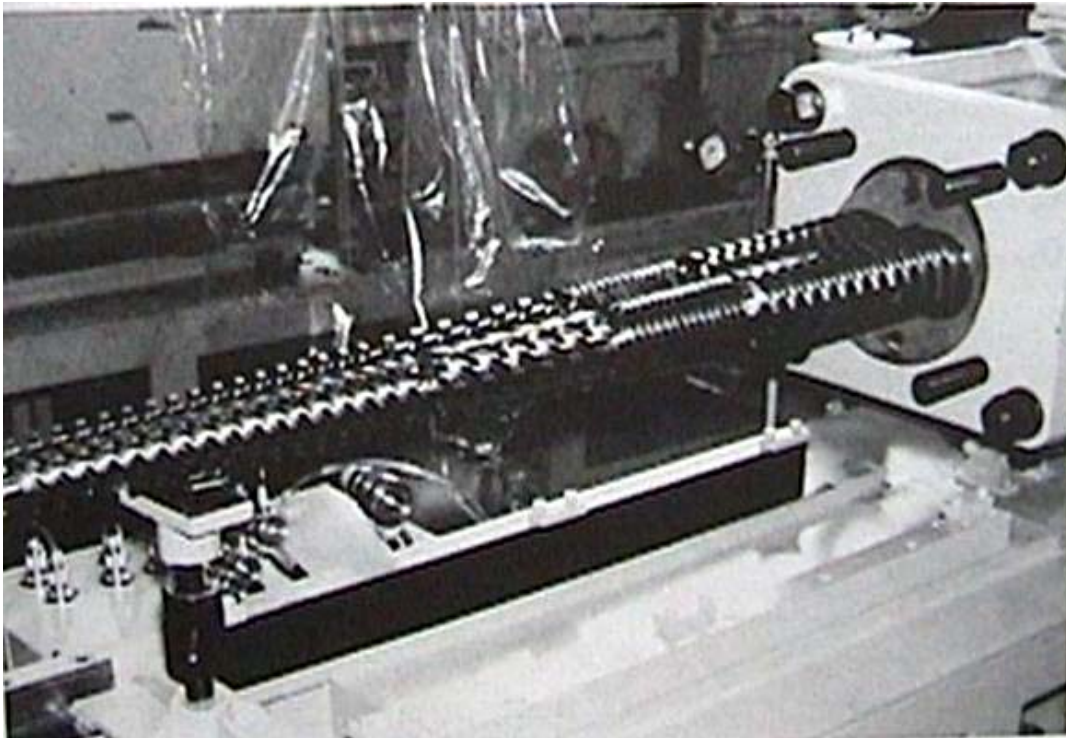


Figura 42. Extrusor doble husillo^[63]

3.6 CLASIFICACION

El primero que organizó los tipos de extrusores de doble husillo fue Erdmenger; él los dividió de acuerdo al posible camino del material entre los tornillos a lo largo y a través de la dirección del canal;

- 1.- Longitudinalmente abierto – En estos extrusores el material tiene un camino abierto de la entrada a la salida moviéndose de los canales de un tornillo a los canales del otro.
- 2.- Transversalmente abierto – En estos extrusores hay un área común en los dos tornillos un camino a través de los alabes en donde el material se mueve por el canal de un tornillo a dos diferentes canales del otro.

Es difícil decidir a cual categoría pertenece un extrusor de doble husillo ya que la dirección del flujo del material no solo depende de la dirección de rotación del tornillo (corrotativo o contrarrotativo) sino también de la forma del alabe y del canal.

3.6.1 Clasificación de acuerdo a la dirección de rotación y número de tornillos

La más obvia clasificación en estas maquinas es la rotación. En la misma dirección o contraria rotación de los tornillos, corrotativo y contrarrotativo son respectivamente de gran importancia industrial y son fabricados en todo el mundo. Ver Figura 43.

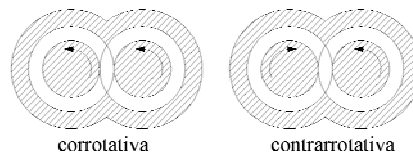


Figura 43

Los extrusores de múltiples tornillos también tiene corrotación o contrarrotación o mezcla de estas situaciones.^[63] Ver Figura 44.

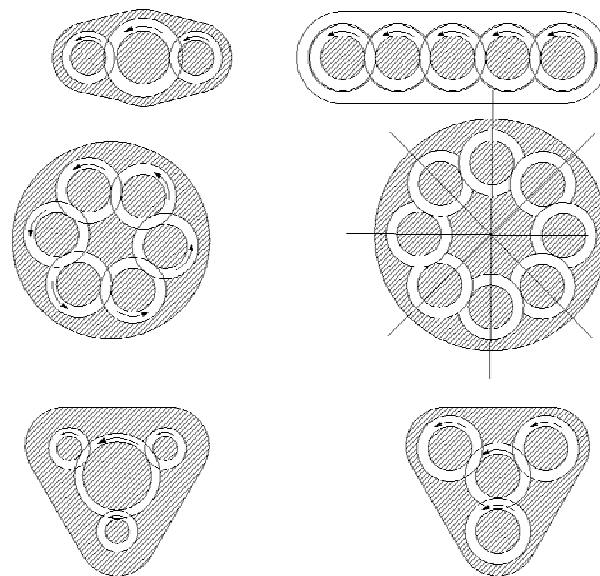


Figura 44

3.6.2 Clasificación de acuerdo al contacto de los tornillos

La subdivisión básica mas importante depende de la posición del tornillo en relación al otro.

Estos extrusores son:

1.- Tornillos no interdentados en los cuales los tornillos están uno cerca del otro, pero como el nombre lo indica estos no se acoplan o se enganchan a la otra rosca, la cual es solo tangencial.

2.- Tornillos interdentados en los cuales los tornillos están cerca el uno del otro. El diseño interdentado puede ser posteriormente dividido en parcialmente interdentado y totalmente interdentado.

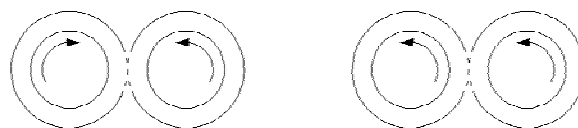
3.- Tornillos separados en los cuales los tornillos están totalmente separados el uno del otro

Todos estos tipos de clasificación pueden ser corrotativos o contrarrotativos.^[62] Ver Figura 45.

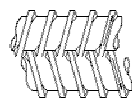
a) separados



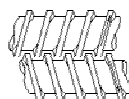
b) tangencial



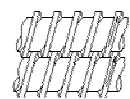
c) interdentados



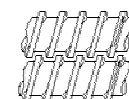
totalmente



parcialmente



totalmente



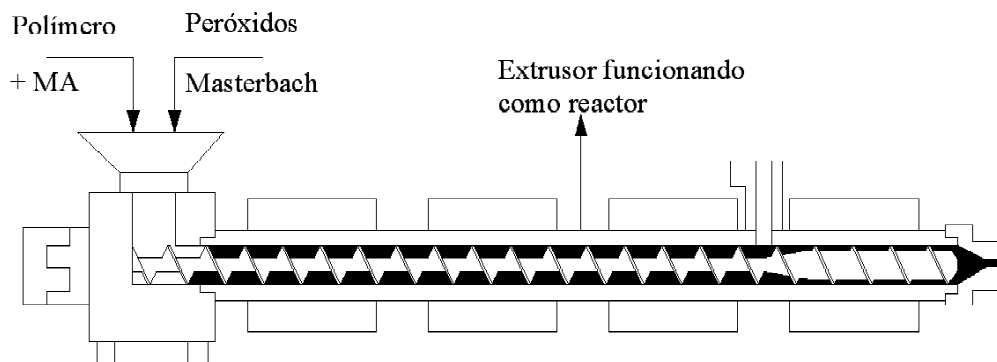
parcialmente

Figura 45. Clasificación de los tornillos de acuerdo al contacto^[63]

3.7 EXTRUSION REACTIVA

Es una técnica, que utiliza el extrusor como si fuera un reactor, en donde se llevan a cabo transformaciones fisicoquímicas de los reactivos.

La primera aplicación patentada fue de I.G. Farbeindustrie en la década de los 40's y adjudicada a BASF.^[64] Ver Figura 46.

Figura 46^[64]

3.8 INYECCION DE PLASTICOS

El fundamento es inyectar un polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde solidifica para dar el producto. La pieza moldeada se recupera al abrir el molde para sacarla.

Una máquina de moldeo por inyección tiene dos secciones principales:

1. La unidad de inyección
2. La unidad de cierre, o prensa, que aloja al molde

La Unidad de Inyección

La unidad de inyección es fundamentalmente un extrusor de un solo tornillo, en general, se puede decir que la unidad de inyección consta de un tornillo de Arquímedes que gira dentro de un barril o camisa con una distancia mínima entre la pared del barril y el hilo del tornillo. El barril tiene calentadores de cincho que lo rodean. La profundidad del canal del tornillo disminuye desde el extremo de alimentación hacia el extremo de salida para favorecer la compresión del contenido. Los gránulos de polímero frío se cargan en el extremo de alimentación y el polímero fundido sale por el extremo de salida. El calentamiento se debe en parte a los calentadores del barril y en parte a la disipación viscosa que ocurre conforme el polímero fundido se bombea a lo largo del tornillo. A diferencia de un extrusor sencillo de un solo tornillo, el tornillo de una máquina de moldeo por inyección tiene un movimiento de vaivén para efectuar la inyección. Además, hay una boquilla que conecta esta unidad con el molde y una válvula que está cerrada mientras se inyecta material para evitar el flujo de retroceso del mismo después de pasar el hilo del tornillo, y está abierta cuando gira el tornillo para permitir la acumulación de la nueva carga. En la Figura 47 se muestran estas posiciones de la válvula. ^[66]

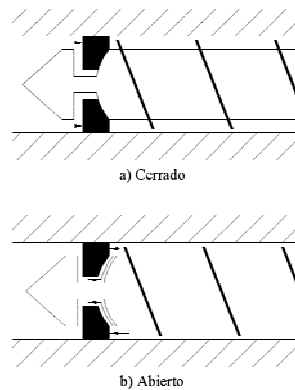


Figura 47. Válvula de no retroceso (válvula check), abierta y cerrada.

La boquilla conecta las dos mitades de la máquina para dejar pasar el material fundido desde la etapa de plastificación hacia el molde

Por lo común, las boquillas se calientan por medio de una banda calefactora, pero también se genera el calentamiento viscoso, ya que en este punto el canal se estrecha y por lo tanto la velocidad de corte es más alta. La viscosidad disminuye entonces; esto, a su vez, facilita la inyección.

La Unidad de Cierre

Es básicamente una prensa que se cierra con un sistema de presión hidráulico o mecánico. La fuerza de cierre disponible debe ser bastante grande para contrarrestar la resistencia que genera el material fundido cuando se inyecta. El molde se sujeta mecánicamente en la unidad de cierre, pero es intercambiable para permitir el moldeo de diferentes productos. Las características fundamentales de un molde son:

1. La cavidad o impresión, en la cual se moldea el producto. Una herramienta puede contener una cavidad simple o varias.
2. Los canales, a lo largo de los cuales fluye el material fundido al inyectarse. Estos son el canal de alimentación, que es el conducto que sale de la boquilla, y los “bebederos”, que van del canal de alimentación a las cavidades individuales. El bebedero se hace más estrecho y tiene una compuerta a la entrada de la cavidad.
3. Los canales de enfriamiento, a través de los cuales se bombea el agua de enfriamiento para eliminar el calor del material fundido. El tamaño y localización de éstos es muy especial para que haya enfriamiento uniforme de las piezas moldeadas.
4. Los pernos expulsores, los cuales sacan la pieza moldeada de la cavidad. Funcionan automáticamente al abrir el molde.

En la Figura 48 se muestra el diagrama de los fundamentos del moldeo por inyección.

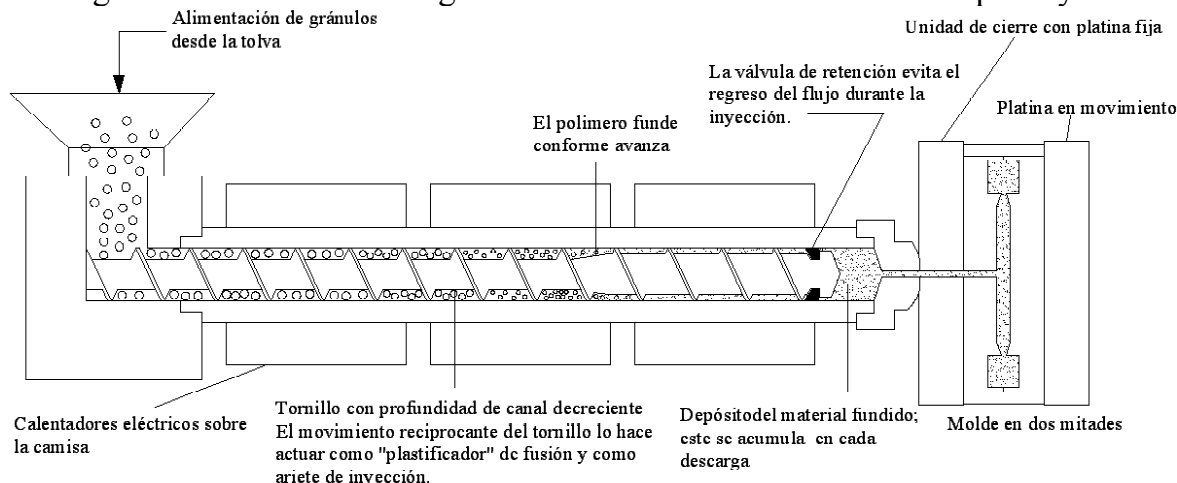


Figura 48

3.9 EL CICLO DE INYECCION

La secuencia de operación para producir piezas moldeada por inyección es como sigue:

1. El molde está cerrado. En esta etapa el molde está vacío. La unidad de inyección está llena de material fundido.
2. Se inyecta el material. La válvula abre y el tornillo, que actúa como un pistón, fuerza el paso del material fundido por la boquilla hacia el molde.
3. Etapa de "retención", donde se mantiene la presión mientras el material se enfría para evitar la contracción. Una vez que se inicia la solidificación, puede eliminarse la presión.
4. La válvula cierra y se inicia la rotación del tornillo. La presión se aplica a la boquilla cerrada y el tornillo se mueve hacia atrás para acumular una nueva carga de material fundido frente a él.
5. Mientras tanto, la pieza moldeada se enfría en el molde; cuando está lista, la prensa y el molde se abren y se bota la pieza moldeada.
6. El molde cierra de nuevo y se repite el ciclo.

Presión de Inyección

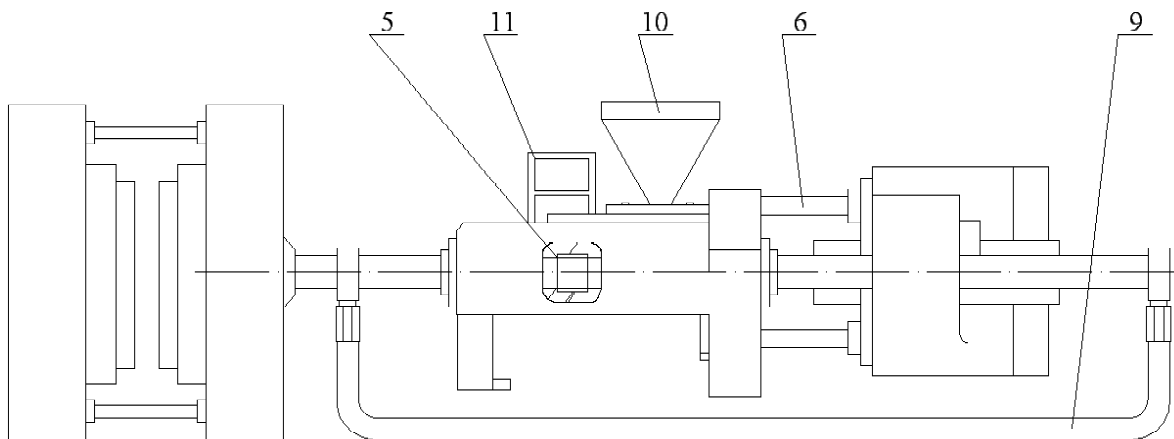
La alta presión que se necesita para inyectar se debe a la alta viscosidad de los polímeros fundidos. Esta se aplica por medio del tornillo, que para esta función no gira, mediante un sistema que empuja al tornillo como si fuera un embolo. Para generar esta presión se necesita un sistema hidráulico.

El diámetro del cilindro hidráulico es de 10 a 15 veces el del tornillo, el cual eleva la presión hasta alcanzar la necesaria para inyectar el material fundido viscoso. [66]

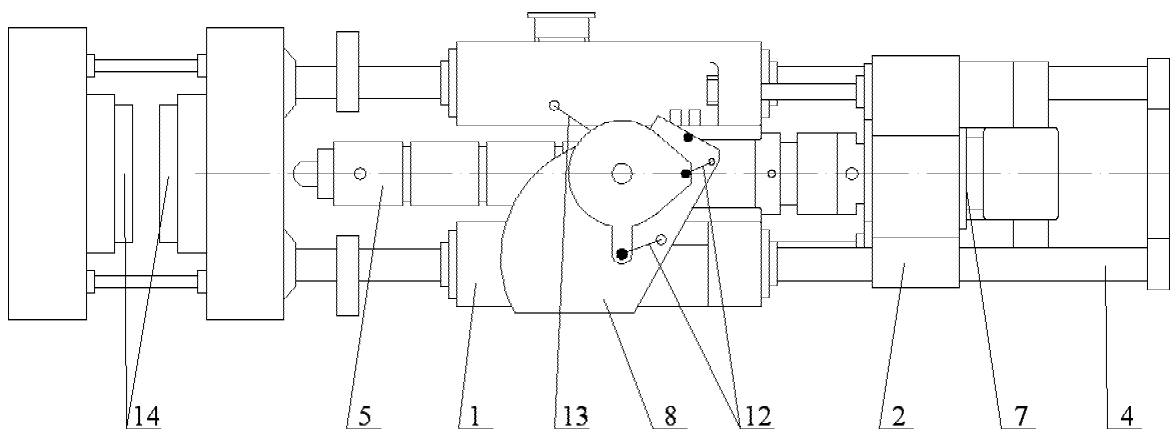
La estructura de la unidad de inyección se muestra en las Figuras 49 y 50

UNIDAD DE INYECCION

Estructura mecánica de la unidad de inyección



Figuras 49. Unidad de inyección vista de perfil.



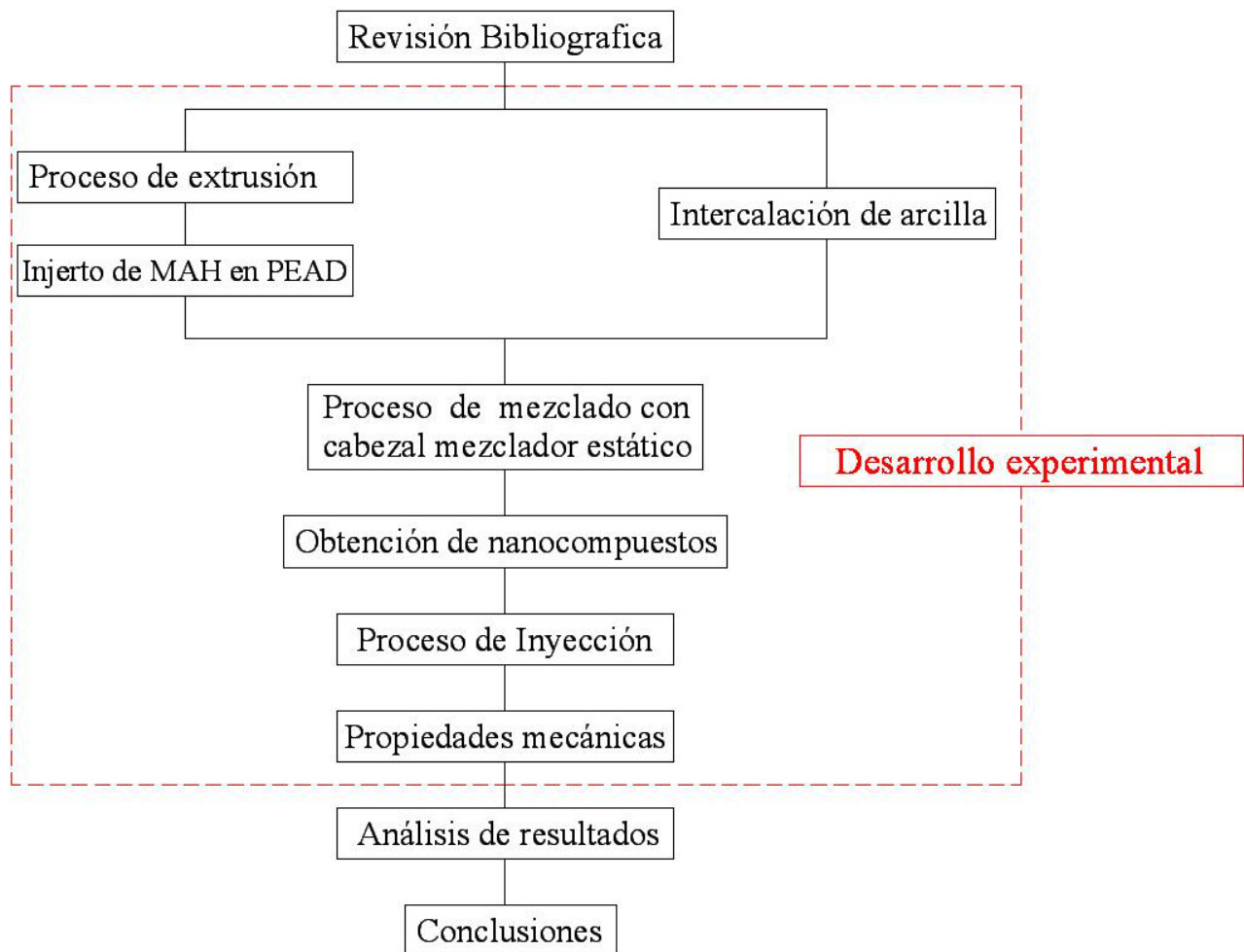
1.- Cilindro de desplazamiento	8.- Alimentación de material
2.- Carcasa del engranaje	9.- Soporte
3.- Unidad de plastificación	10.- Tolva
4.- Columna	11.- Interfase termopar y resistencias
5.- Vástago	12.- Palanca de bloqueo
6.- Cilindro de inyección	13.- Palanca de giro
7.- Accionamiento y alojamiento	14.- Molde

Figura 50. Unidad de inyección vista desde arriba y las partes que lo componen.



4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Diagrama esquemático por etapas para la realización del experimento.





4.1 MATERIA PRIMA Y REACTIVOS QUÍMICOS

Polimero

- Polietileno de alta densidad (PEAD) en forma de gránulos, adquirido a PEMEX, con las siguientes propiedades según el fabricante.

PADMEX 60120

USO: MOLDEO POR INYECCIÓN

PROPIEDADES TÍPICAS DE LA RESINA:

ADITIVOS:

Contiene antioxidante primario, agente lubricante y neutralizante.

Tabla 8. Propiedades Típicas de la Resina

PARAMETRO	UNIDAD	METODO DE PRUEBA	VALOR TÍPICO
Densidad	g/cm ³	ASTM D-1505	0.9615
Índice de fluidez	g/10 min.	ASTM D-1238	12
Resistencia máxima a la tensión	MPa	ASTM D-638	27
Alargamiento máximo	%	ASTM D-638	650
Impacto IZOD (ranurado)	kg-cm/cm	ASTM D-256	10
Módulo de flexión	MPa	ASTM D-790	1500
Dureza Shore	TIPO D	ASTM D-1706	70
Temp. de ablandamiento (VICAT)	°C	ASTM D-1525	124
Temperatura de Fragilidad	°C	ASTM D-746	-70

Características:

Polímero con excelente procesabilidad, buena capacidad para mezclarse con polímeros de baja densidad, de peso molecular estrecho, especial para moldeo por inyección de ciclos de producción rápidos, cumple con los requerimientos: FDA Título 21.CFR 177.1520 para artículos que estén en contacto con alimentos.

**Aplicaciones:**

Se recomienda su uso en el moldeo por inyección de diversos productos de uso general como: Artículos para el hogar (Vajillas domésticas), recipientes para alimentos, juguetes en general, etc.

- Arcilla Montmorillonita (PGN) de la compañía Nanocor, Inc. con características en Tabla 9

Tabla 9

Propiedades de la arcilla montmorillonita	
Tamaño de partícula en estado seco	16-22
Relación diámetro/espesor	300-500
Color	Canela
Humedad %	12
pH	9-15
Capacidad de intercambio catiónico	135 meq/100 g

La composición química de la arcilla montmorillonita se determino por medio de la técnica de EFX. Ver Tabla 10

Tabla 10

Elemento	% átomos
O	55.1
Si	21.5
Al	10.2
Na	5.5
Ca	0
C	3.1
Mg	2.1
Cl	1.6
K	0.5
F	0.3

Silicato	% mol
Montmorillonita	94.8
Cristobalita	0
Albita	0
Cuarzo	5.2
Calcita	0



- Arcilla bentonita de sodio

La composición química de la arcilla bentonita de sodio se determinó por medio de la técnica de EFX. Ver Tabla 11

Tabla 11

Elemento	% átomos
O	57.3
Si	24.7
Al	7.8
Na	2.1
Ca	0.4
C	4.8
Mg	2.3
Cl	0
K	0
F	0
Fe	0.2
N	0.4

Silicato	% mol
Montmorillonita	94.8
Cristobalita	0
Albita	0
Cuarzo	5.2
Calcita	0

REACTIVOS

- Anhídrido Maleico
- Acido 11-aminoundecanoico con masa molecular de 201.31 g/mol
- Peróxido de Benzoilo (BPO) de la compañía Promotores y Catalizadores Orgánicos de México, con masa molecular de 242.23 gramos/mol y punto de fusión de 104-106°C.
- Acido Clorhídrico (HCl) con una densidad de 1.19 g/ml y concentración al 37%

4.2 EQUIPOS

- Extrusor TW-100 Haake Rheocord 90 con doble husillo cónico contrarrotatorio, con longitud de husillo de 331mm, diámetro inicial de 31.1mm y diámetro final de 19.7mm, barril con diámetro inicial de 31.7mm, diámetro final de 20mm y diámetro exterior de 34.9mm. Ver Figuras 51, 52 y 53.



Figura 51



Figura 52



Figura 53

- Extrusor monohusillo Figura 54.

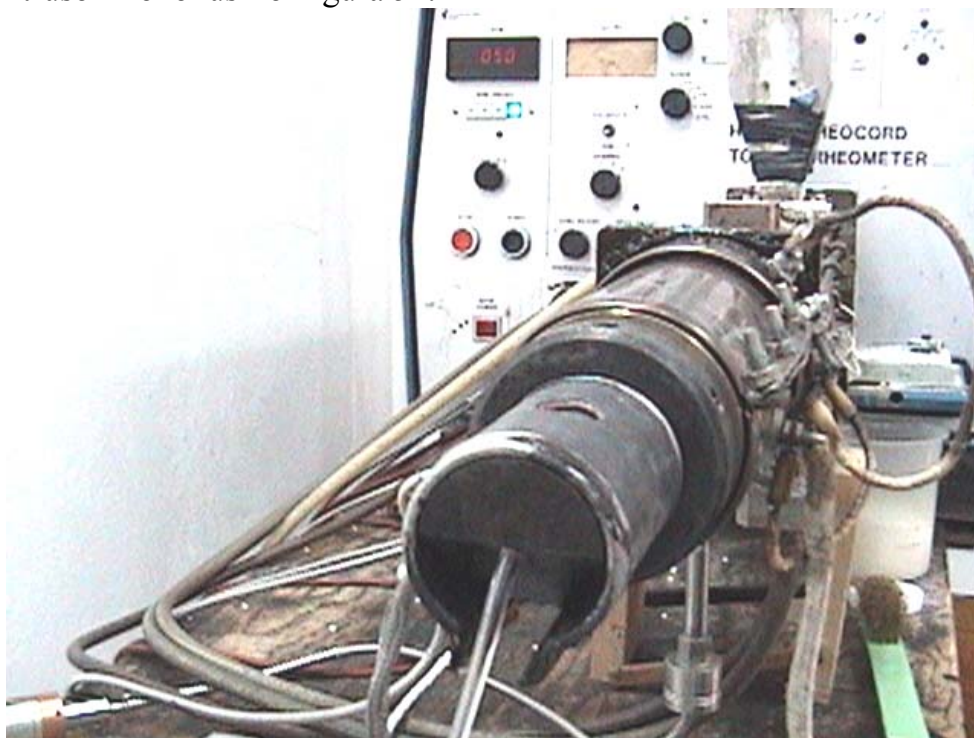


Figura 54

- Cabezal mezclador estático. Ver Figura 55.



Figura 55

- Máquina de moldeo por inyección de la marca MANNESMAN DEMAG, modelo ERGOtech 50 – 200 compact con un diámetro de husillo de 25mm y una relación L/D=20. Ver Figura 56 y 57.



Figura 56 y 57



- Deshumidificador marca Pagani Leeson Latinoamericana provisto de malla molecular, Mod. DHF-25. Ver Figura 58.



Figura 58

- Máquina de pruebas universales, INSTRON, modelo 1125. Ver Figura 59.



Figura 59

- Equipo de difracción de rayos X marca Bruker AXS. Modelo D8 Advance, con monocromador de grafito, software DIFF. plus B_S 200.
- Calorímetro diferencial de barrido de la marca Dupon Instruments, modelo 910 Differential Scanning Calorimeter.
- Molino de cuchillas de baja velocidad de la marca Colortronic, modelo M82L.
- Equipo de análisis termogravimétrico, Dupon Instruments, modelo 915 Thermogravimetric Analyser.
- Máquina peletizadora. Ver Figura 60.

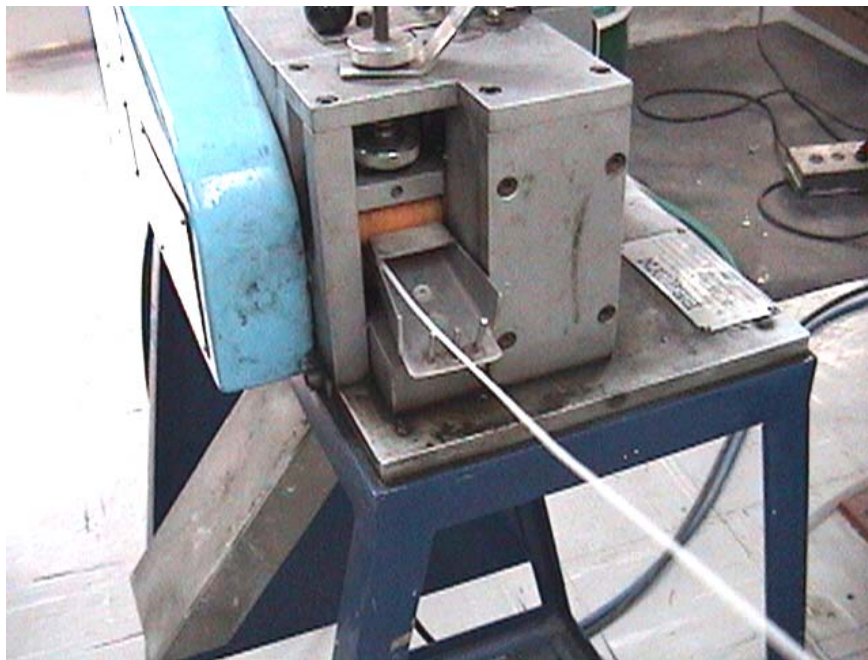
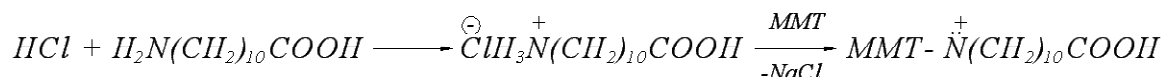


Figura 60



4.3 CALCULOS QUIMICOS Y CONSIDERACIONES

La modificación química de las arcillas se basa en la siguiente reacción:



Teniendo en consideración lo anterior, para preparar 20 gramos de arcilla modificada de montmorillonita se realizaron los siguientes cálculos:

$$20 \text{ g MMT} \left(\frac{135 \text{ meq.}}{100 \text{ g MMT}} \right) \left(\frac{1 \text{ eq.}}{1000 \text{ meq.}} \right) = 0.027 \text{ eq.}$$

Para saber la cantidad necesaria de ácido 11-aminoundecanoico a reaccionar:

$$0.027 \text{ eq.} \left(\frac{1 \text{ mol.}}{1 \text{ eq.}} \right) \left(\frac{201.31 \text{ g.}}{1 \text{ mol.}} \right) = 5.43 \text{ g. amino}$$

Y también la cantidad de HCl para formar el clorhidrato del aminoácido

$$0.027 \text{ eq.} \left(\frac{1 \text{ mol.}}{1 \text{ eq.}} \right) \left(\frac{36.5 \text{ g.}}{1 \text{ mol.}} \right) \left(\frac{100 \text{ g. sol.}}{37 \text{ g.}} \right) = 2.66 \text{ g. HCl}$$
$$D_{sol.} = 1.19 \frac{\text{g.}}{\text{ml.}} \quad \therefore 2.66 \text{ g. HCl} \left(\frac{1 \text{ ml.}}{1.19 \text{ g.}} \right) = 2.3 \text{ ml HCl}$$

Para la modificación química de bentonita se tomo el valor de 135 meq. por 100 g. de arcilla.

4.4 DESARROLLO PARTE EXPERIMENTAL

Se determinaron los siguientes parámetros de proceso para la extrusión del polietileno de alta densidad. Perfil de temperaturas, tiempo de residencia, RPM's del husillo y velocidades de alimentación del dosificador.

El perfil de temperaturas experimental fue: Alimentación =140°C; compresión =170 °C; dosificación = 190 °C y dado=190 °C.



4.4.1 Preparación de la arcilla.

La modificación química de la arcilla se llevo a cabo de acuerdo al siguiente procedimiento.

Procedimiento:

- En un recipiente con agua destilada (1 litro por cada 10 g. de arcilla) se dispersan 20 gramos de arcilla bajo intensa agitación y calentamiento a una temperatura entre 80 - 88 °C. Ver Figura 61 y 62.



Figura 61

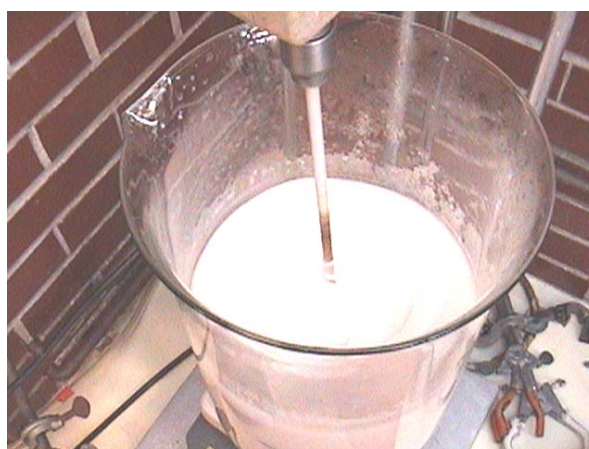


Figura 62

- Se pesa la cantidad de ácido 11-aminoundecanoico necesaria. Ver Figura 63 y 64.



Figura 63



Figura 64

- En otro recipiente con agua, agitación y calentamiento se adiciona el ácido 11-aminoundecanoico a una temperatura aproximada de 85 °C. Ver Figura. 65, 66, 67 y 68.



Figura 65



Figura 66

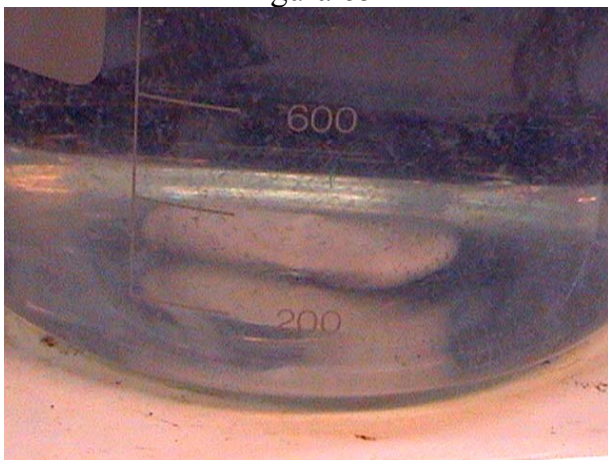


Figura 67

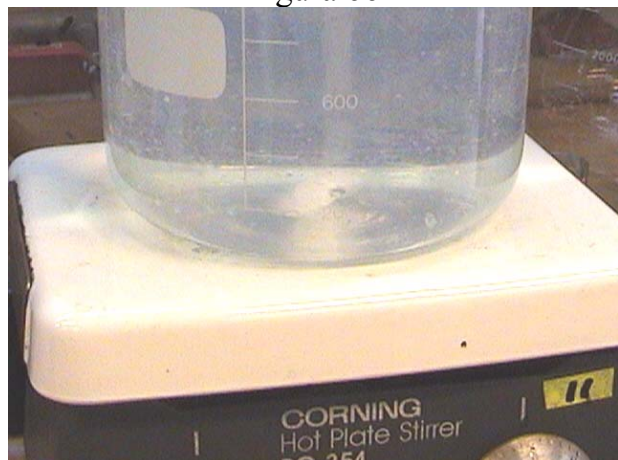


Figura 68

- Al recipiente con el ácido 11-aminoundecanoico se agrega HCl para formar el clorhidrato del aminoácido, para poder solubilizarlo en el agua. ver Figura 69 y 70



Figura 69



Figura 70

- Una vez disuelto el clorhidrato del ácido 11-aminoundecanoico se agrega a la arcilla dispersa en agua del otro recipiente en agitación. Ver Figura 71 y 72.



Figura 71

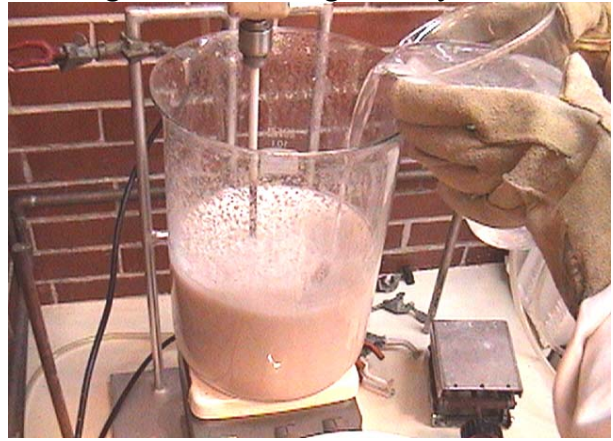


Figura 72

- Se deja con agitación vigorosa por un lapso de 30 minutos. Ver Figura 73 y 74.



Figura 73



Figura 74

- Se instala un sistema de filtrado asistido por vacío con trampas de vapor enfriadas con hielo. Ver Figura 75 y 76.



Figura 75



Figura 76

- Una vez terminada la reacción se procede a filtrar la arcilla. Ver Figura 77, 78, 79 y 80.



Figura 77



Figura 78



Figura 79

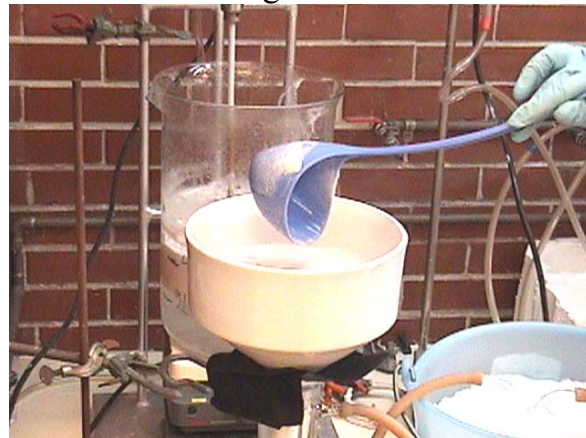


Figura 80

- Una vez filtrada la arcilla se lava con agua destilada. Ver Figura 81 y 82.



Figura 81



Figura 82

- Para comprobar que la arcilla está libre de cloro, se toma una muestra de 5 ml del filtrado y se le agregan dos gotas de nitrato de plata. Si hay precipitado, cloruro de plata, se repite el proceso de lavado hasta que no exista precipitado.

- Después de haber eliminado el exceso de agua la arcilla se coloca en recipientes los cuales son puestos en una estufa para su secado a una temperatura aproximada de 40 °C, asistido con vacío. Ver Figura 83 y 84.



Figura 83



Figura 84

- Una vez seca la arcilla se procede a la molienda y tamizado de ésta. Ver Figura 85, 86 y 87.

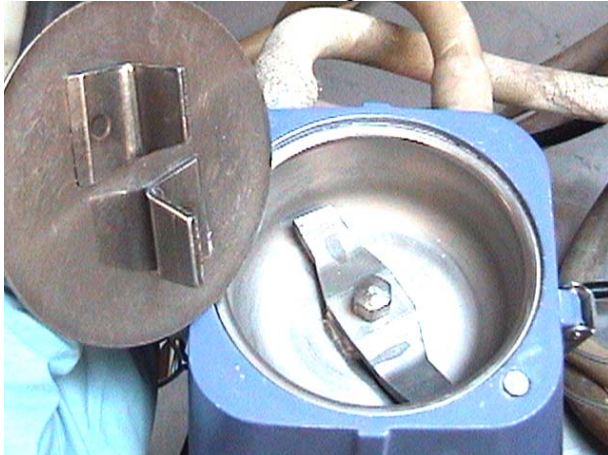


Figura 85



Figura 86



Figura 87

4.4.2 Injerto del anhídrido maleico sobre polietileno

Para el injerto del polietileno con anhídrido maleico el perfil de temperaturas fue: Alimentación =170 °C; compresión =190 °C; dosificación = 210 °C; dado=210 °C.

- Se disuelve la cantidad de anhídrido maleico y peróxido de benzoilo de acuerdo al porcentaje requerido en un recipiente de vidrio con acetona anhidra.
- Se mezcla perfectamente con el polietileno y se deja evaporar la acetona. Se alimenta el polímero con el anhídrido maleico adherido directamente al extrusor. Ver Figura 88.

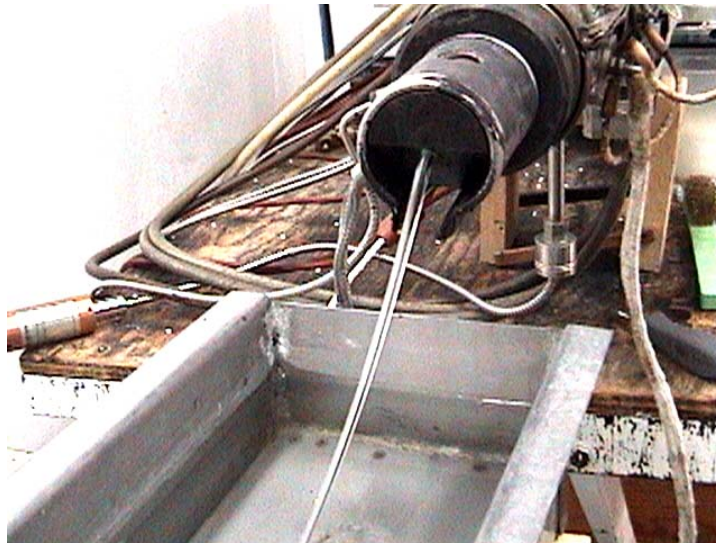


Figura 88

- El hilo resultante pasa por una tina de enfriamiento por agua y después a una maquina peletizadora para su corte en pequeños trozos para su posterior inyección. Ver Figura 89.

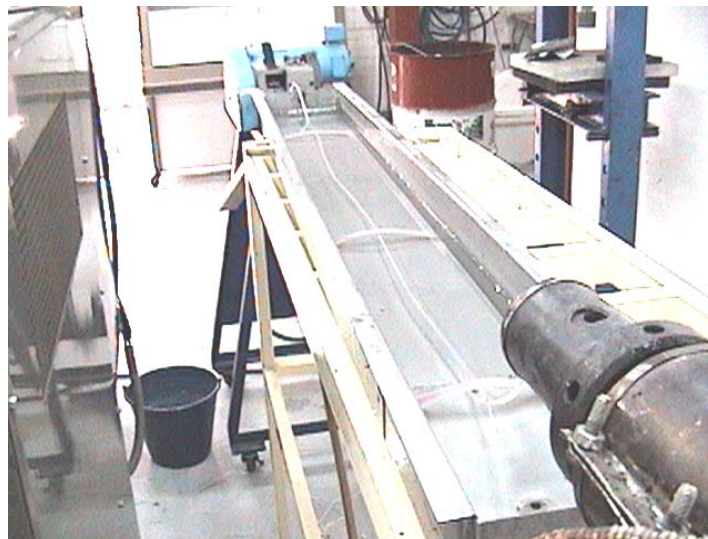


Figura 89

- Las mezclas del polietileno injertado con anhídrido maleico y arcillas modificadas se mezclan y se alimenta directamente al extrusor y se peletiza. Ver Figura 90 y 91.

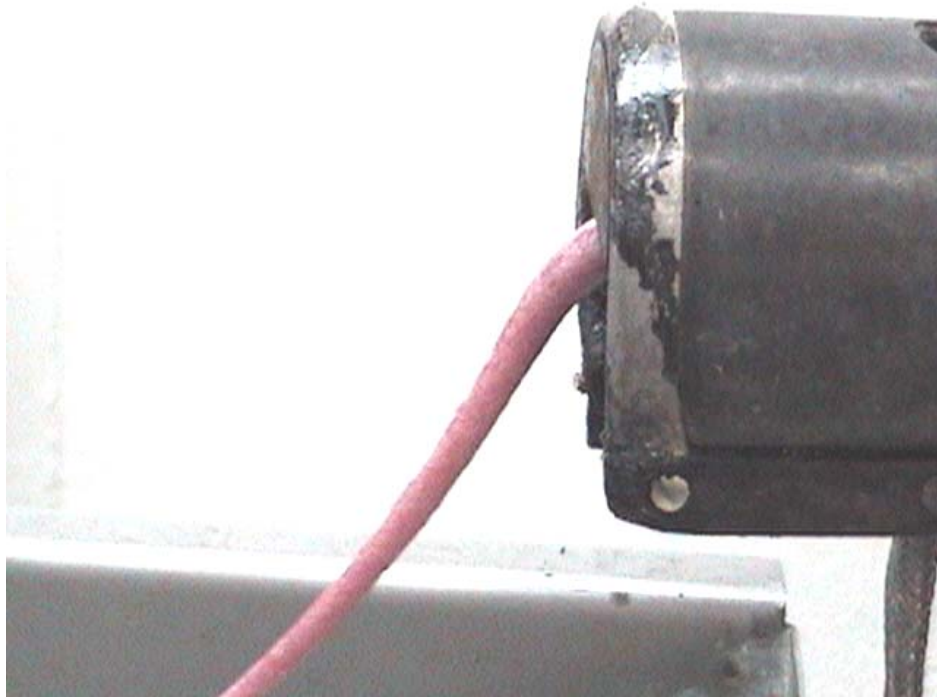


Figura 90



Figura 91

4.4.3 Preparación de nanocompuestos mediante el cabezal mezclador estático.

Para la formulación de nanocompuestos polietileno/arcilla el perfil de temperaturas experimental fue: Alimentación = 170 °C; compresión = 185 °C; dosificación = 200 °C; Cabezal = 200 °C y dado = 200 °C a 50 rpm.

- Las mezclas del polietileno injertado con anhídrido maleico y arcillas modificadas se obtuvieron procesándolos con el cabezal al final de la zona de dosificación y antes del dado. Ver Figura 92.



Figura 92

- Para ajustar la abertura del cabezal es necesario sujetar una parte del y mover la otra mediante la ayuda de llaves fabricadas para este propósito. Ver Figura 93.

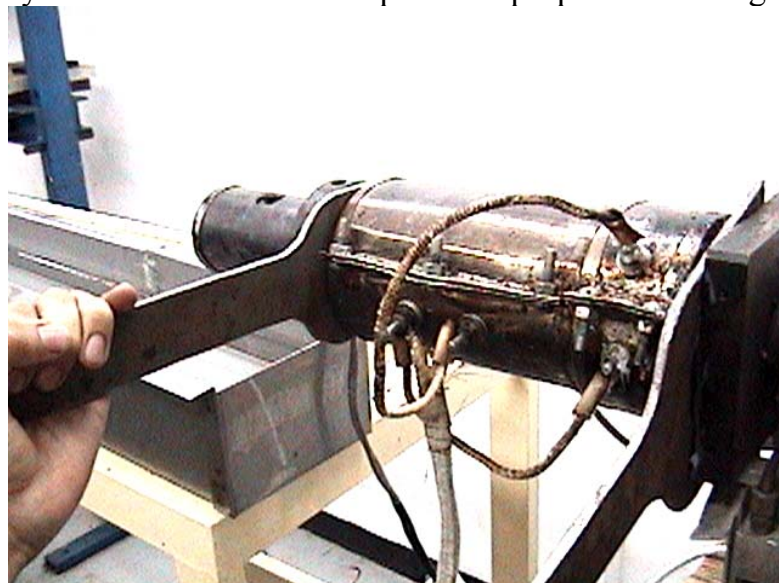


Figura 93

4.4.4 Proceso de inyección para la obtención de probetas.

Las condiciones experimentales del proceso de inyección fueron:

Temperatura en la zona de alimentación 180 °C.

Zona de compresión 190 °C.

Zona de dosificación 200 °C

Boquilla 200 °C.

Tiempo de inyección 2.1 s.

Velocidad de inyección 35 ccm/s.

Tiempo de enfriamiento 15 s.

Revoluciones por minuto alimentación 150.

Volumen de inyección 70.5 ccm

Presión de inyección 15000 PSI (real 14993)

Presión posterior 4000 (real 3857)

- Las diferentes muestras de mezclas de polímeros y arcillas se colocan en el deshumidificador hasta su completo secado
- Se ingresan los parámetros de temperatura de inyección de acuerdo al tipo de polímero en el tablero de la máquina de inyección. Ver Figura 94, 95, 96 y 97



Figura 94. Ingreso de parámetros.

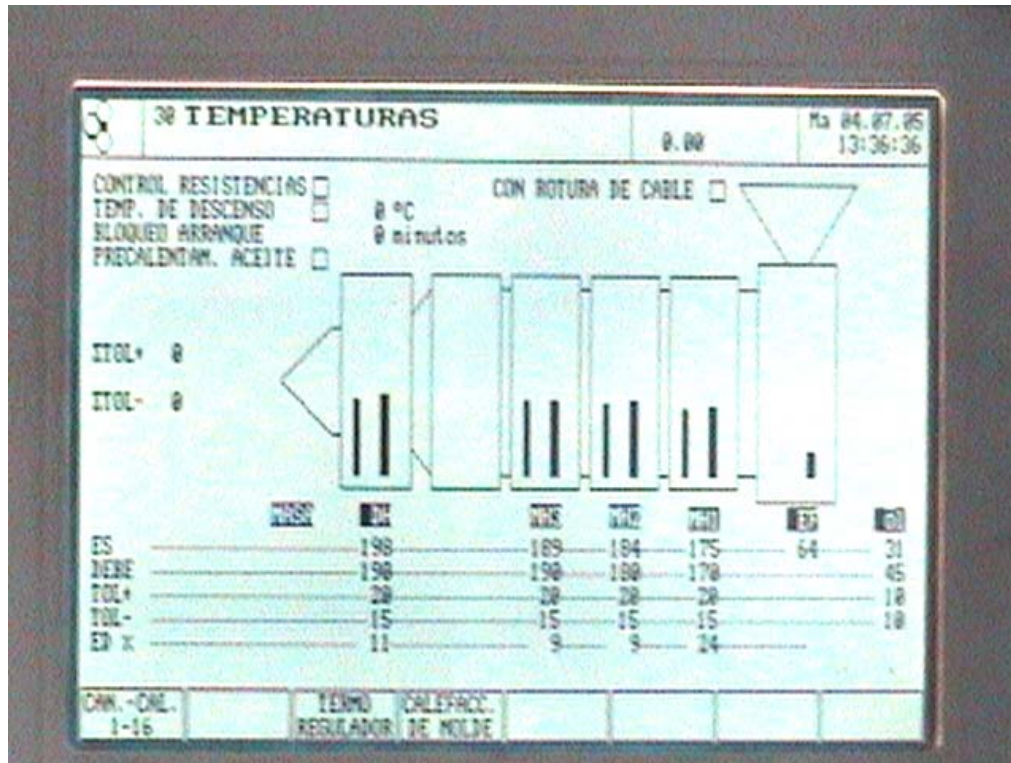


Figura 95. Datos de temperatura por zonas del barril de inyección.

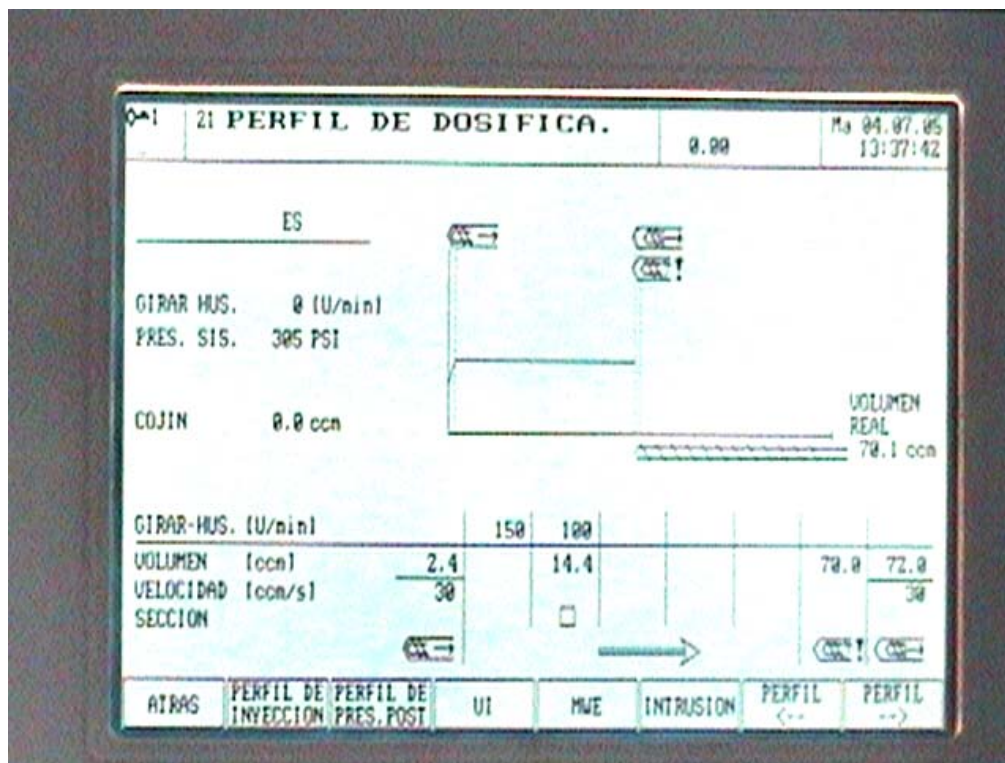


Figura. 96 Perfil de dosificación de plástico.

		DEBE	ES			DEBE	ES
20 OPTIMIZAC. DEL PROC.							
			0.00				
TIEMPO DE CICLO	(s)	999.0	35.3	RETROCESO SC	(ccn)	72.0	70.1
TIEMPO DE BLOQUEO	(s)	99.00	0.00	PARADA DE DOSIF.	(ccn)	70.0	0.0
TIEMPO DE PAUSA	(s)	2.00		COJIN DE MASA	(ccn)		0.0
TIEMPO DE INYECCION	(s)		0.00	VOLUMEN .POST.	(ccn)	7.0	0.4
TIEMPO DE DOSIFIC.	(s)		1.69	TIEMPO P.POST.	(s)	6.00	0.00
PRESION INYECC.	(PSI)	14993	740	P. p_esp.	(PSI)		
VELOCIDAD INYECC.	(ccn/s)	25					
TIEMPO PRES.POST.	(s)	10.0					
PRESION POST.	(PSI)	4002	3857	PERFIL DE INYEC.			
TIEMPO DE ENFRIAM.	(s)	15.00		PERFIL PR.POST.			
RETARDO DOSIFIC.	(s)	0.00		PERFIL DE DOSIF.			
REVOLUCION	(U/min)	150	0				
PERFIL DE DOSIFICA.			UI	MVE			
PERFIL DE INYECCION				INTRUSION			
PERFIL DE PRES.POST.							

Figura 97. Principales parámetros de inyección.

- Una vez que la temperatura es la adecuada se procede a limpiar (purgar) la unidad de inyección. Ver Figura 98.

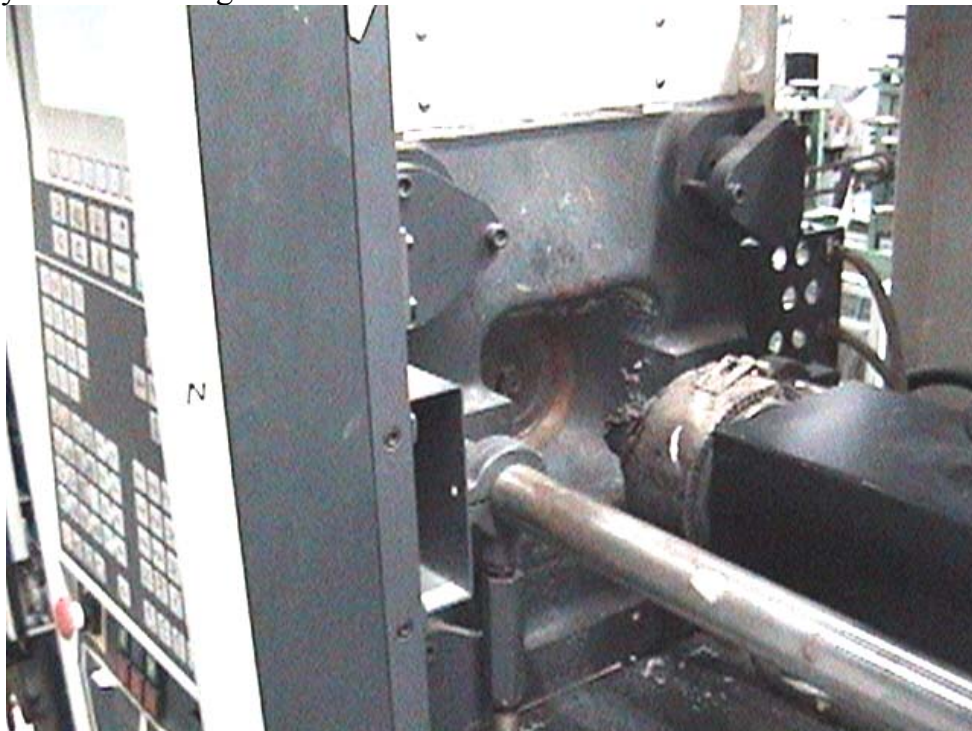


Figura 98. Limpieza de cabezal de inyección.

- También se limpia el área del molde. Ver Figura 99.

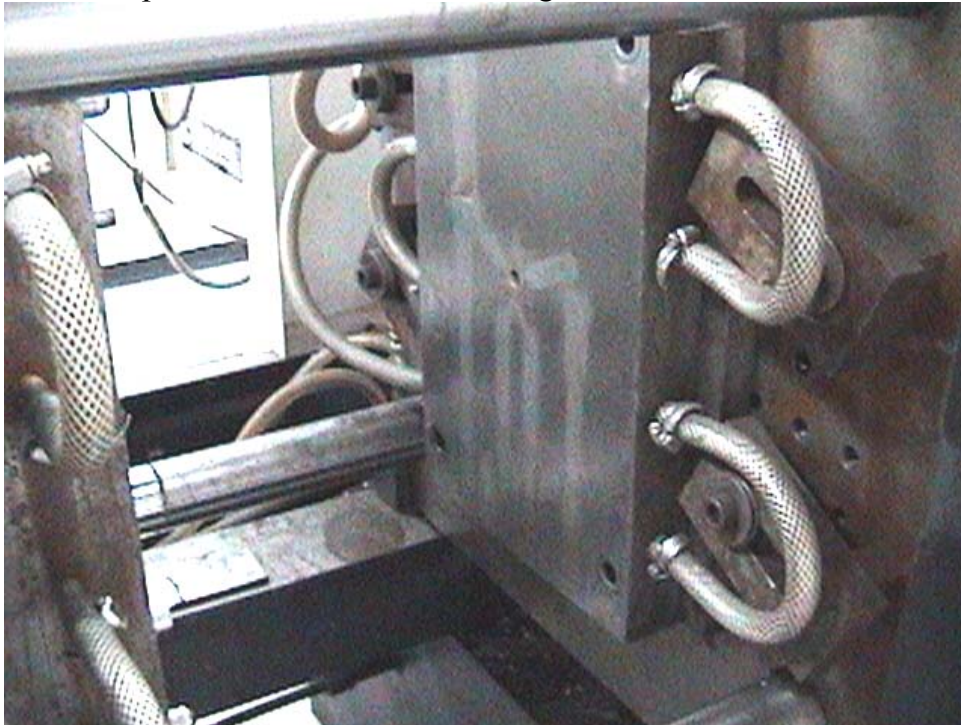


Figura 99

- Después se agrega las formulaciones en la tolva de la maquina de inyección para su posterior inyección. Ver Figura 100.



Figura 100. Material en tolva de maquina de inyección.

- Para poder distinguir las probetas realizadas de distintas formulaciones se agregan pequeños gránulos de color entre formulaciones. Ver Figura 101.



Figura 101. Pigmento en gránulos.

- Se inicia el ciclo de inyección y se cierran las dos partes del molde para formar las cavidades donde se alojará el plástico. Ver Figura 102.

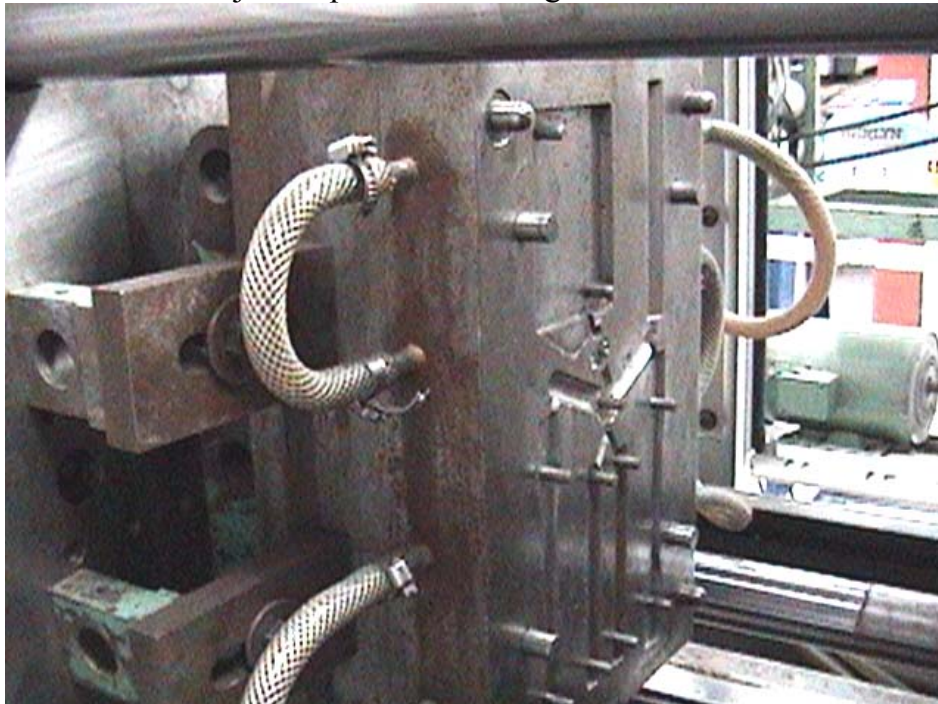


Figura 102. Eyectores del molde para expulsión de las probetas.

- El husillo comienza a girar para alimentar el material y fundirlo una vez hecho esto el husillo actúa como embolo e inyecta el plástico fundido. Ver Figura 103 y 104.



Figura 103. El husillo gira alimentando el material y lo funde.

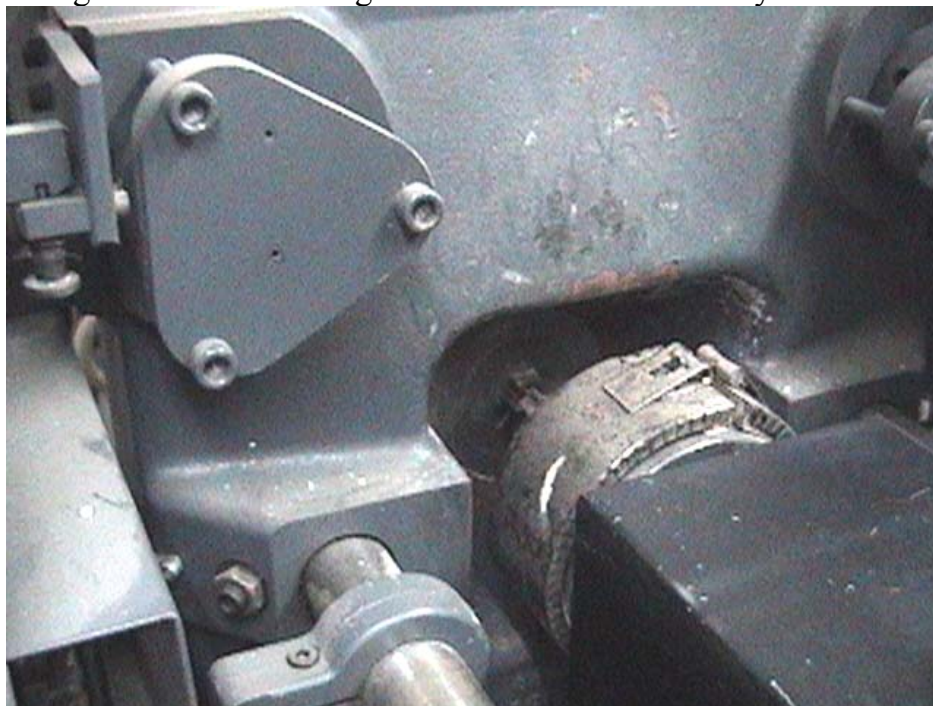


Figura 104. El cabezal de inyección se acerca al molde e inyecta el plástico fundido a la cavidad.

- Una vez inyectado el material en la cavidad del molde éste se enfría y solidifica. Después que esto sucede se abre el molde y se expulsa la pieza. Ver Figura 105.

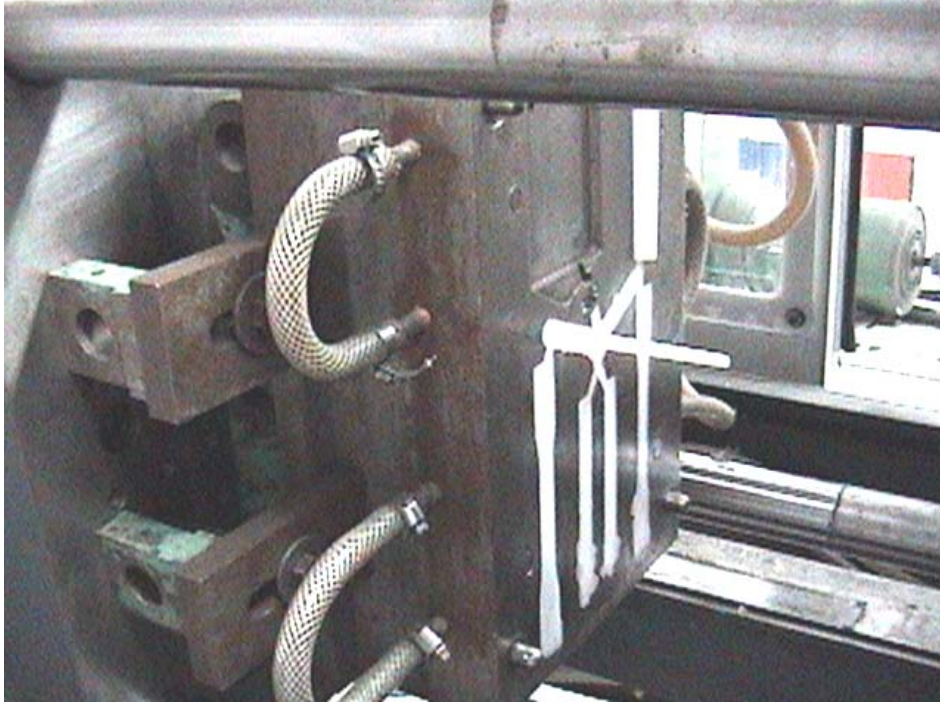


Figura 105

- Una vez expulsada la pieza se inicia otro ciclo de inyección. Ver Figura 106.

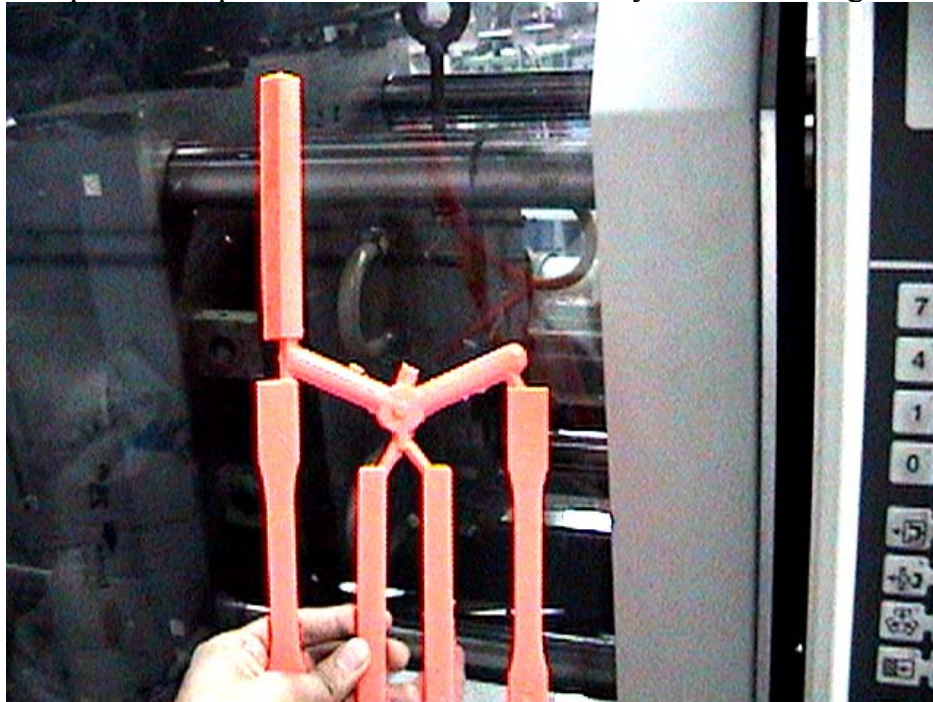


Figura 106. Obtención de probetas para pruebas mecánicas.

- Después de la obtención de probetas éstas se clasifican, marcan y separan las probetas de tensión de las de impacto e inflamabilidad. Ver Figura 107.



Figura 107

- Las probetas obtenidas son llevadas al laboratorio de pruebas mecánicas, donde se coloca cada probeta en las mordazas y se inicia el ensaye. Ver Figura 108.



Figura 108. Probeta lista para la prueba.

- Una vez iniciada la prueba la probeta se deforma hasta fracturar. Ver Figura 109, 110 y 111.



Figura 109. Ensayo de una probeta en progreso.

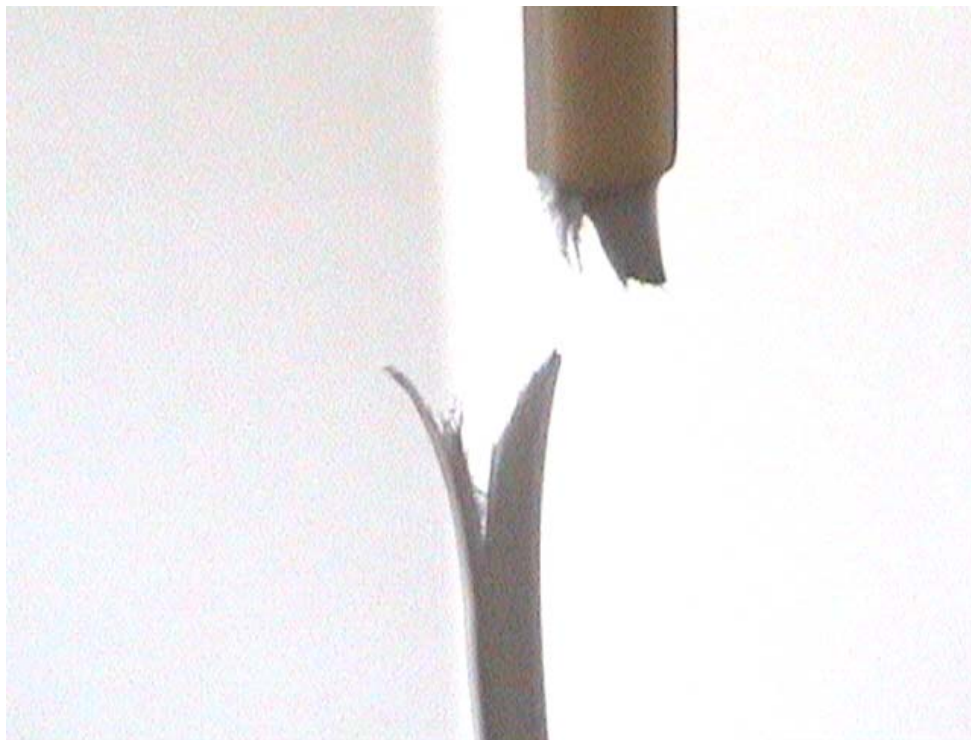


Figura 110. Fractura típica.



Figura 111. Prueba mecánica.

- Los datos son almacenados e impresos. Ver Figura 112.

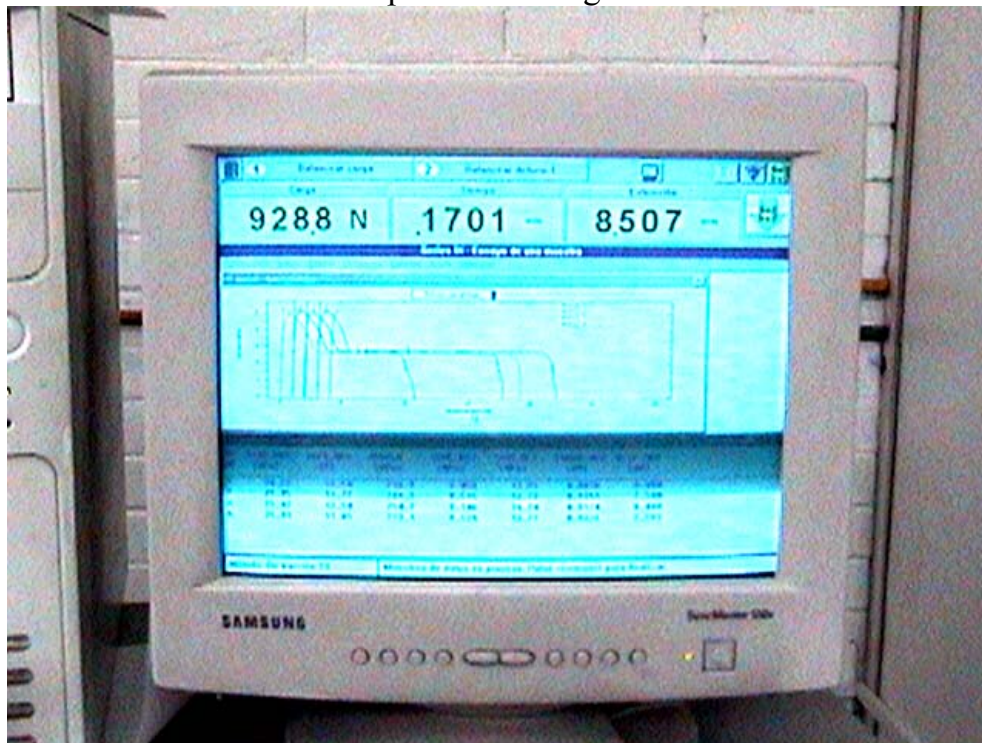


Figura 112. Datos obtenidos de una prueba.

Para preparar las probetas a impacto de acuerdo a la norma se realizó lo siguiente:

- Las probetas deben contener las siguientes características. Ver Figura 113.

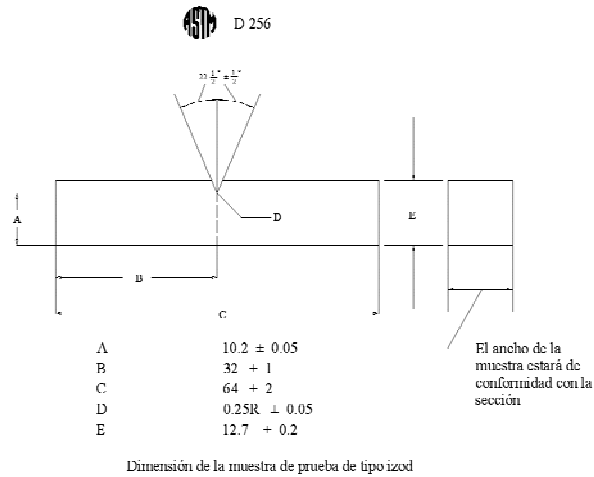


Figura 113

- Se clasificaron las muestras y se cortan a la mitad de la probeta aproximadamente 6 cm. Ver Figura 114, 115, 116, y 117.



Figura 114



Figura 115



Figura 116



Figura 117

- Una vez hecho esto las piezas resultantes se les hace una muesca de acuerdo a la norma D256-97 pruebas tipo A. Ver Figura 118, 119, 120 y 121.



Figura 118



Figura 119



Figura 120

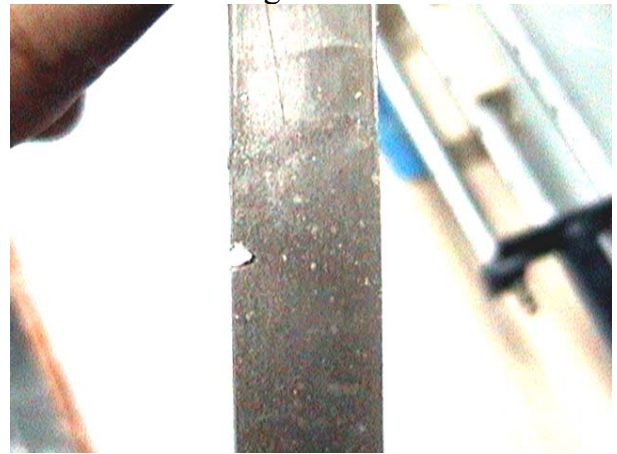


Figura 121

- Las probetas preparadas de acuerdo a la norma son llevadas para la prueba de impacto en una maquina de impacto tipo péndulo. Ver Figura 122.



Figura 122

- Las probetas son colocadas con ayuda de un posicionador para un correcto agarre. Ver Figura 123 y 124.



Figura 123

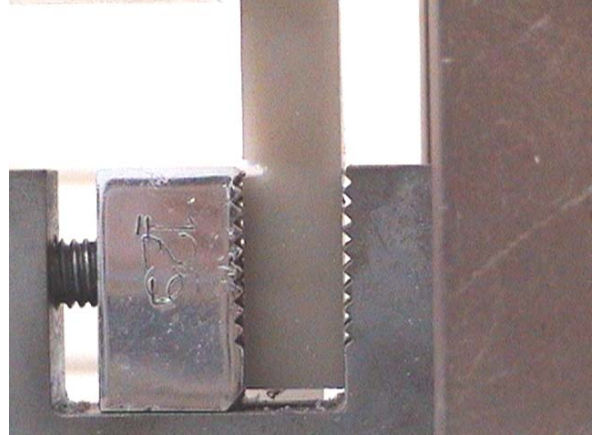


Figura 124

- Se verifica la correcta posición del martillo y muestra. Ver Figura 125.

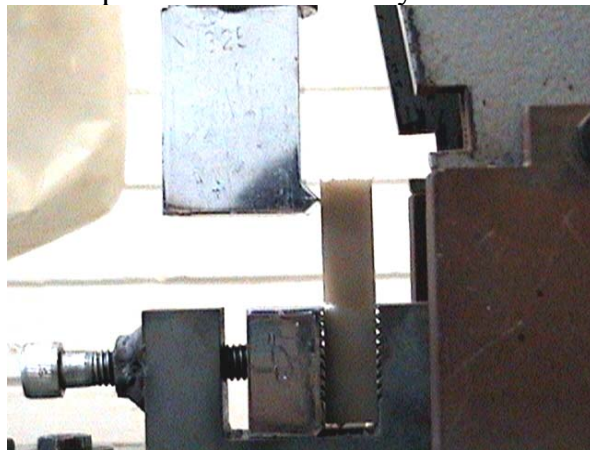


Figura 125

- Se eleva el martillo hasta 120° con respecto a la vertical y se suelta. Ver Figura 126 y 127.

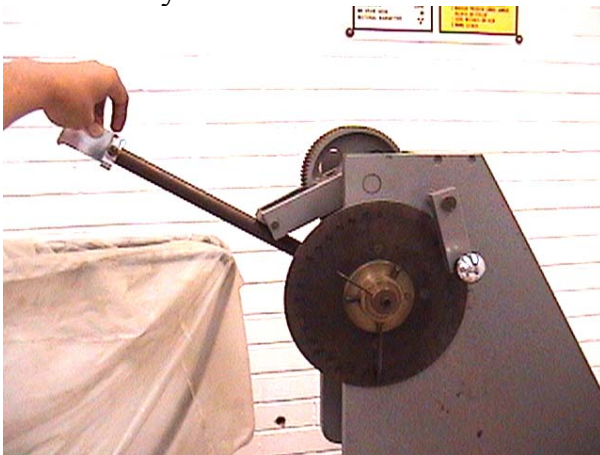


Figura 126



Figura 127

- El espécimen es impactado y rompe, dando una medición de un ángulo final al cual llega el martillo. Ver Figura 128, 129, 130 y 131.



Figura 128

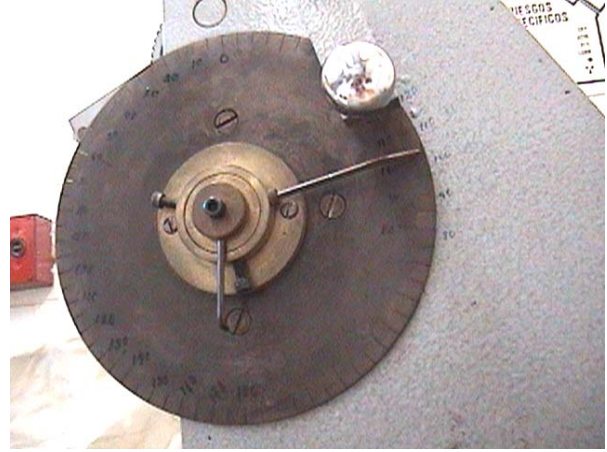


Figura 129

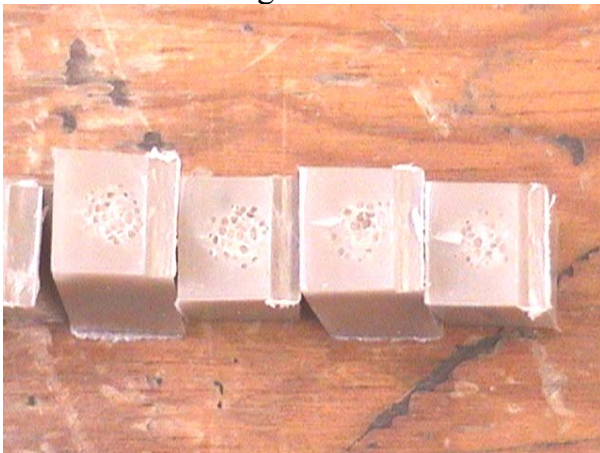


Figura 130

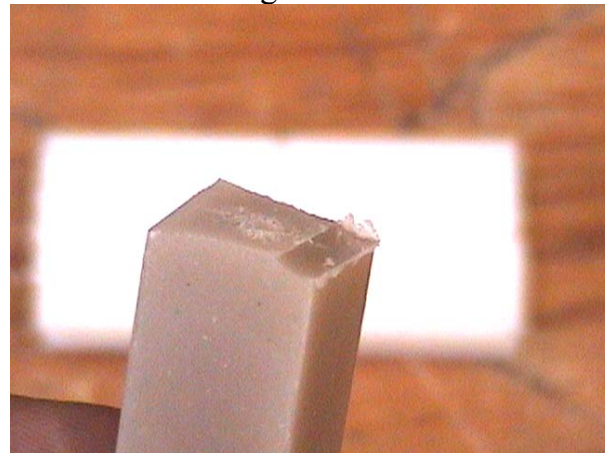


Figura 131

- Se anota la medición y se calcula la energía que absorben las probetas.



4.5 Formulaciones

Las diferentes formulaciones se produjeron en dos pasos:

- 1) Extrusión de mezclas de polietileno de alta densidad (PEAD) con anhídrido maleico (MA) y peróxido de benzoilo (BPO)
- 2) Extrusión de PEAD-g-MAH con arcilla modificada con ácido 11-aminoundecanoico.

En partes por cien de resina (phr) Tabla 12;

TABLA 12

PEAD (phr)	MA (phr)	BPO (phr)	Arcilla modificada (phr)
100	1	.1	2
100	1	.15	2
100	1	.2	2
100	1.5	.1	2
100	1.5	.15	2
100	1.5	.2	2
100	2	.1	2
100	2	.15	2
100	2	.2	2

También se realizaron mezclas solo con anhídrido maleico (MA) y arcilla modificada de acuerdo a la Tabla 13

TABLA 13

PEAD (phr)	MA (phr)	Arcilla modificada (phr)
100	1	2
100	1.5	2
100	2	2

Se utilizaron muestras de material virgen (PEAD) para hacer los datos comparativos.



La siguiente tabla de mezclas son;

TABLA 14
Arcilla MMT- Na^+

PEAD		Arcilla (phr)
100	Sin Cabezal	0
PEAD		Arcilla
100	Sin Cabezal	2
	Sin Cabezal	5
	Sin Cabezal	8
	Con Cabezal	2
	Con Cabezal	5
	Con Cabezal	8

TABLA 15
BENTONITA- Na^+

BENTONITA	Comercial	
PEAD		Arcilla (phr)
100	Sin Cabezal	2
	Sin Cabezal	5
	Sin Cabezal	8
	Con Cabezal	2
	Con Cabezal	5
	Con Cabezal	8

Después se realizaron las siguientes mezclas utilizando arcillas sin modificar.

TABLA 16
Arcilla MMT- Na^+

PEAD		M A (phr)	BPO (phr)	Arcilla Normal (phr)
100	Sin Cabezal	1.5	.1	2
	Sin Cabezal	1.5	.1	5
	Sin Cabezal	1.5	.1	8
	Con Cabezal	1.5	.1	2
	Con Cabezal	1.5	.1	5
	Con Cabezal	1.5	.1	8

TABLA 17
BENTONITA-Na⁺

PEAD		M A	BPO	Arcilla Normal (phr)
100	Sin Cabezal	1.5	.1	2
	Sin Cabezal	1.5	.1	5
	Sin Cabezal	1.5	.1	8
	Con Cabezal	1.5	.1	2
	Con Cabezal	1.5	.1	5
	Con Cabezal	1.5	.1	8

También se realizaron las siguientes mezclas utilizando arcillas modificadas con el ácido 11-aminoundecanoico

TABLA 18
Arcilla MMT-Na⁺

PEAD		M A (phr)	BPO (phr)	Concetración Arcilla Modificada(phr)
100	Sin Cabezal	1.5	.1	2
	Sin Cabezal	1.5	.1	5
	Sin Cabezal	1.5	.1	8
	Con Cabezal	1.5	.1	2
	Con Cabezal	1.5	.1	5
	Con Cabezal	1.5	.1	8

TABLA 19
BENTONITA-Na⁺

PEAD		M A	BPO	Concetración Arcilla Modificada(phr)
100	Sin Cabezal	1.5	.1	2
	Sin Cabezal	1.5	.1	5
	Sin Cabezal	1.5	.1	8
	Con Cabezal	1.5	.1	2
	Con Cabezal	1.5	.1	5
	Con Cabezal	1.5	.1	8

TABLA 20
BENTONITA- Na^+

PEAD		M A	BPO	Arcilla Modificada (phr)
	Con Cabezal	1.5	.1	0.5
	Con Cabezal	1.5	.1	1
	Con Cabezal	1.5	.1	1.5
	Con Cabezal	1.5	.1	2

Estas son las formulaciones de las probetas de impacto que se produjeron en dos pasos:

- 1) Extrusión de mezclas de polietileno de alta densidad (PEAD) con anhídrido maleico (MA) y peróxido de benzoilo (BPO)
- 2) Extrusión de PEAD-g-MAH con arcilla montmorillonita y Bentonita modificada con ácido 11-aminoundecanoico

TABLA 21

		Arcilla phr		
PEAD + Arcilla-g-(ácido 11-aminoundecanoico)	c/c s/c	2	5	8
PEAD-g-MAH + Arcilla	c/c s/c	2	5	8
PEAD-g-MAH + Arcilla-g-(ácido 11-aminoundecanoico)	c/c s/c	2	5	8

S/C= Sin Cabezal

C/C= Con Cabezal



5. RESULTADOS Y DISCUSION.

PROPIEDADES MECANICAS A TENSION.

A la serie de nanocompuestos se les evaluó las propiedades mecánicas a tensión de acuerdo a la norma ASTM-D638-91. Las probetas de acuerdo a la norma fueron producidas por moldeo por inyección.

Las siguientes tablas muestran los resultados de propiedades mecánicas a tensión uniaxial.

Tabla 1. Mezcla de PEAD + arcillas sin modificar.

		Arcilla	Módulo Elástico	Resistencia Fractura	Deformación Fractura
		phr	MPa	MPa	MPa
Muestra					
1		0	771	10.2	229
	Montmorillonita				
2	S/C	2	757	10.0	177
3	S/C	5	754	8.7	75
4	S/C	8	735	11.9	47
5	C/C	2	734	9.5	211
6	C/C	5	770	9.0	94
7	C/C	8	767	8.7	48
	Bentonita				
8	S/C	2	684	8.9	116
9	S/C	5	736	8.9	59
10	S/C	8	761	19.4	12
11	C/C	2	729	9.1	123
12	C/C	5	708	8.2	88
13	C/C	8	719	10.2	31

S/C= Sin cabezal

C/C= Con cabezal

De los resultados mostrados en la Tabla 1 se deduce que el uso del cabezal mezclador estático, utilizando arcillas sin modificar, no mejora las propiedades mecánicas de la mezcla del polímero con las arcillas, debido a la incompatibilidad. La diferencia de la arcilla montmorillonita con respecto a la bentonita es mínima. A concentraciones de arcilla de 8 phr es difícil procesar las mezclas y con el cabezal mezclador estático es aún más difícil ya que al pasar por el cabezal se hace muy lento el proceso, inclusive se llega a tapar el dispositivo.



La distancia óptima para producir esfuerzos extensionales y dispersar los tactoides de arcilla fue de 0.113 mm para 2 phr de arcilla en el compuesto (1/4 vuelta en el dispositivo).

TABLA 2. Mezclas de PEAD + 2 phr de Arcilla Montmorillonita (ácido 11-aminoundecanoico), procesada sin cabezal.

	MA	BPO	Módulo Elástico	Resistencia Fractura	Deformación Fractura
	phr	phr	MPa	MPa	(%)
Muestra					
1			771	10.2	229
2	0	0	720	9.2	213
3	1	0	738	7.6	115
4	1	0.1	800	12.1	57
5	1	0.15	742	9.7	123
6	1	0.2	779	8.4	74
7	1.5	0	775	7.4	135
8	1.5	0.1	834	9.2	122
9	1.5	0.15	795	8.9	94
10	1.5	0.2	771	9.2	53
11	2	0	760	7.8	107
12	2	0.1	773	8.9	106
13	2	0.15	762	9.3	89
14	2	0.2	742	9.4	116

El injerto de MAH en las cadenas moleculares del PEAD se llevo a cabo por extrusión reactiva con diferentes concentraciones de anhídrido e iniciador (BPO).

Una vez injertado el MAH se procede a adicionar la arcilla en un segundo proceso de extrusión.

Debido a los resultados de la Tabla 1 en donde se presentan una disminución de propiedades a concentraciones mayores a 2 phr de arcilla en el compuesto, este valor se fijo para determinar que relación óptima de MAH/BPO a utilizar.

En la Tabla 2 se observa que la muestra con 1.5 phr de anhídrido maléico, 0.1 phr de peroxido de benzoilo y 2 phr de arcilla modificada es la que mejora en el modulo elástico y es una de las que menos disminuye en la deformación a la fractura. (Ver muestra 8)



TABLA 3. Mezclas de PEAD-g-MAH + BPO + Arcillas sin modificar.

		Arcilla	Módulo Elástico	Resistencia Fractura	Deformación Fractura
		Phr	MPa	MPa	MPa
Muestra					
1		0	777	10.2	229
	Montmorillonita				
2	S/C	2	635	9.7	294
3	S/C	5	690	8.8	188
4	S/C	8	719	20.5	26
5	C/C	2	660	8.4	247
6	C/C	5	709	8.9	217
7	C/C	8	666	8.8	70
	Bentonita				
8	S/C	2	689	8.9	258
9	S/C	5	656	8.6	141
10	S/C	8	691	14.3	45
11	C/C	2	644	8.3	223
12	C/C	5	696	8.1	132
13	C/C	8	690	14.8	29

S/C= Sin cabezal

C/C= Con cabezal

Utilizando el polímero que esta injertado con la mejor relación de anhídrido maléico (1.5 phr) y peróxido (0.1 phr), se realizaron una serie de muestras variando las cantidades de arcillas sin modificar y nuevamente se proceso con y sin el cabezal mezclador estático. La Tabla 3 muestra resultados que comparados con los de la Tabla 1, donde también se utilizo arcilla sin modificar presentan un aumento considerable en la deformación a fractura, tanto sin cabezal como usando éste.

Aquí también es claro que concentraciones mayores a 2 phr de arcilla comprometen las propiedades mecánicas del compuesto.



TABLA 4. Mezclas de PEAD-g-MAH + BPO + Arcillas modificadas ácido 11-aminoundecanoico.

		Arcilla Modificada	Resistencia Tensión	Módulo Elástico	Resistencia Fractura	Deformación Fractura	Tenacidad
		Phr	MPa	MPa	MPa	%	MPa
Muestra							
1		0	22	771	10.2	229	29.3
	Bentonita						
2	S/C	2	22.3	696	8.4	173	23.5
3	S/C	5	21.9	682	7.4	68	10.3
4	S/C	8	21.6	706	10.7	35	5.9
5	C/C	2	24.2	729	10.7	349	47.8
6	C/C	5	23.5	707	8.7	186	27
7	C/C	8	23.6	749	8.4	112	16.9
	MMT						
8	S/C	2	21.6	858	8.2	139	22.5
9	S/C	5	22.2	880	9.5	118	17.1
10	S/C	8	21.7	818	9	55	8.7
11	C/C	2	24.1	719	9.6	348	47
12	C/C	5	23.7	726	8.6	165	23.7
13	C/C	8	23.2	771	8.5	68	11.1

S/C= Sin cabezal

C/C= Con cabezal

En la Tabla 4 se muestran los resultados de PEAD injertado con MAH (1.5 phr) y BPO (0.1 phr) cuando es procesado con diferentes cantidades de arcilla químicamente modificada con el ácido 11-aminoundecanoico.

Como se sabe, una de las principales características de un nanocompuesto polimérico que posee afinidad entre sus componentes es el incremento de la deformación a la fractura. La conducta anterior se presenta en la muestra 5 y 11 con 2 phr de arcilla (bentonita y montmorillonita) y procesadas con el cabezal estático. Ambas muestras requieren una mayor cantidad de energía para romperse, véase los valores de tenacidad de ambas, mayores que el polímero puro.



También de la Tabla 4, se observa que la diferencia entre utilizar arcilla montmorillonita o bentonita sódica, en este caso es el costo, ya que la primera cuesta aproximadamente 10 veces más.

En este estudio lo importante es la diferencia en propiedades y como consecuencia el costo.

Por lo anterior, la utilización de arcilla bentonita en la producción de materiales nanocompuestos reduce drásticamente el costo total del proceso.

TABLA 5. PEAD-MAH + BPO + Bentonita-g-ácido 11-aminoundecanoico.

		Arcilla	Resistencia Tensión	Modulo Elástico	Resistencia Fractura	Deformación Fractura	Tenacidad
		phr	MPa	MPa	MPa	%	MPa
Muestra	Testigo	0	22	771	10.2	229	29.3
	Bentonita						
1	C/C	0.5	23.8	678	13	244	33.3
2	C/C	1.0	25.2	737	13.4	372	52
3	C/C	1.5	23.8	670	13	202	28.2
4	C/C	2.0	23.5	685	12.8	253	34.6

C/C= Con cabezal

A través de este trabajo se encontro ; la mejore proporción se obtiene a 2 phr de arcilla en el nanocompuesto, a mayor cantidad no son benéficas las propiedades mecánicas de esfuerzo a tensión.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la mezcla de PEAD-g-MAH y bentonita -g-ácido 11 –aminoundecanoico en diferentes concentraciones.

Se observa claramente que la concentración de arcilla óptima para este sistema es de 1 phr. Hay que hacer notar que a esta concentración de arcilla el procesamiento por extrusión del PEAD-g-MAH no tiene alguna dificultad.



PROPIEDADES DE IMPACTO

A la siguiente serie de probetas se les evaluó las propiedades a impacto de acuerdo a la norma ASTM-D256-97 (Standard test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics).

Las probetas normalizadas para los ensayos de impacto fueron producidas por el proceso de inyección y después ranuradas conforme a los requerimientos de norma anterior, los ensayos fueron hechos con el método de prueba tipo A.

TABLA 6

muestra	Sistema	PEAD + Arcilla-g-ácido 11- aminoundecanoico	PEAD-g-MAH + Arcilla	PEAD-g-MAH + Arcilla-g-ácido 11- aminoundecanoico	
	Resistencia al impacto	J/m	J/m	J/m	
1	Material virgen	100	100	100	
	Arcilla phr				
2	s/c 2	mmt	59	72	73
3	c/c 2	mmt	79	93	87
4	s/c 2	bent	65	78	87
5	c/c 2	bent	70	64	98
6	s/c 5	mmt	65	76	78
7	c/c 5	mmt	73	90	86
8	s/c 5	bent	72	66	91
9	c/c 5	bent	72	78	93
10	s/c 8	mmt	71	75	72
11	c/c 8	mmt	67	90	77
12	s/c 8	bent	70	61	95
13	c/c 8	bent	72	82	97

S/C= Sin cabezal

mmt= montmorillonita

C/C= Con cabezal

bent= bentonita

En general el uso del cabezal mezclador estático proporciona mejores propiedades de impacto, como se observa en la Tabla 6, para todas las proporciones de arcilla en los diferentes sistemas de nanocompuestos.



La fabricación de nanocompuestos con polietileno injertado y arcilla modificada químicamente da los mejores resultados y prácticamente conserva las propiedades de impacto (2 phr de arcilla bentonita procesada con el dispositivo mezclador estático), ver Tabla 6.

La pérdida de esta propiedad en mezclas para producir nanocompuestos es uno de los síntomas de falta de compatibilidad entre fases, produciendo falta de adhesión entre partícula-matriz, concentración de esfuerzos y cavitación entre otros efectos.

Un balance de propiedades de impacto y tensión debe ser realizado para sugerir alguna aplicación de estos nanocompuestos.

La modificación de la resistencia al impacto se puede producir añadiendo un polímero que refuerce el efecto de absorción de energía. El polímero puede ser un hule, elastómeros, copolímeros en bloque, etc. En este caso se ensayó con un polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y el resultado fue que con 3 phr de este polímero en la formulación de PEAD-g-MAH + 1 phr bentonita-g-ácido 11-aminoundecanoico el impacto se incremento de 100 J/m para el material virgen a 122 J/m para el nanocompuesto.



CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio acerca de los nanocompuestos de acuerdo a los objetivos trazados se resumen en lo siguiente:

El proceso de modificación química de las arcillas es un proceso lento debido a las limitaciones de filtrado causado por las pequeñas partículas que obstruyen el medio filtrante.

El uso de agua sin destilar y sin desionizar no influye de manera apreciable en las propiedades mecánicas de los nanocompuestos obtenidos.

La mejor formulación fue la de: 100 phr de Polietileno de alta densidad, 1.5 phr de anhídrido maléico, 0.1 phr de peróxido de benzoilo y 1 phr de bentonita modificada con ácido 11-aminoundecanoico, de acuerdo a los resultados de las pruebas mecánicas.

Debido a la relación costo beneficio la arcilla bentonita es la que se debe utilizar en la producción de nanocompuestos.

La deformación en el punto de ruptura del material nanocompuesto se incrementa considerablemente, indicación, que se ha logrado dispersión y afinidad de las nanopartículas a la matriz polimérica.

El uso del cabezal mezclador estático mejora la mezcla de la arcilla con la matriz del polímero

La mejor abertura, para provocar flujos extensionales en el polímero fundido, del cabezal mezclador estático fue de 0.1135 mm ó $\frac{1}{4}$ de vuelta del dispositivo.

La máxima cantidad de arcillas para procesar con el cabezal mezclador estático es de 8 phr.



El perfil de temperatura para el procesamiento de material virgen es: zona de alimentación 140 °C, zona de compresión 170°C, zona de dosificación 190 °C, dado 190 °C a 50 rpm

El perfil de temperatura para la extrusión reactiva fueron: alimentación 160 °C, zona de compresión 190 °C, zona de dosificación 210 °C, dado 210 °C a 50 rpm.

El mejor perfil de temperatura en extrusión para las formulaciones con arcilla fueron; zona de alimentación 170, zona de compresión 185, zona de dosificación 200, cabezal mezclador estático 200, dado 200 a 50 rpm.

Las condiciones del proceso de inyección fueron: temperatura en la zona de alimentación 180 °C, zona de compresión 190 °C, zona de dosificación 200 °C, boquilla 200 °C Tiempo de inyección 2.1 s. la velocidad de inyección 35 ccm/s tiempo de enfriamiento 15 s, revoluciones por minuto alimentación 150, volumen de inyección 70.5 ccm

La adición de arcilla a la matriz del polímero modifica las condiciones de procesamiento ya que al aumentar el contenido de arcilla disminuye la fluidez del polímero.

En lo personal, este trabajo mejora mi comprensión sobre los materiales nanocompuestos y sus posibles usos. Aprendí sobre los tipos de procesamiento de los polímeros como extrusión e inyección y mi conocimiento sobre la modificación química de arcillas fue notablemente mejorado.



7.- BIBLIOGRAFIA

1. Richard E. Smalley. Enciclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. American Scientific Publishers Vol 1y 3 (253-265) 2004.
2. G. Moad, Prog. Polym. Sci. 24 (81) 1999
3. T. Bremner, A. Rudin, J. Appl. Polym. Sci. 49 (785)1993.
4. Ureta Ernesto; Polímeros, estructura, propiedades y aplicaciones; Editorial Limusa, S.A. de C.V. México. (1-85)1989.
5. Tarango J.A. Manual de ingeniería y diseño de envases y embalaje. Ed. Ingeniería en envase y embalaje. Mexico D.F. (20-110) 2001.
6. Steven M. Kurtz. The UHMWPE handbook. C.1 (1-11) 2002.
7. Enciclopedia del plástico. Instituto Mexicano del Plástico Industrial. Tomo 1.Cap.3y 4. (151-199) 2000.
8. Besoain E. Mineralogía de arcillas de suelos. IICA/serie de libros nº 60,Barcelona. 1985.
9. Haydn H.M. Industrial Inorganic Chemicals and Products. Wiley-VCH. 2, 1999.
10. Dominguez J. Schifter I. Las Arcillas el barro noble. V 109. Fondo de cultura Economica. 1992.
11. Weaver, C.E. y Pollar, L.D. The chemistry of clay minerals. Elsevier. (213) 1973.
12. Giannelis E.P, Krishnamoorti R., Manias E. Advances in Polimer Science. 138 (107-149) 1999.
13. Suprakas Sinha Ray, Masami Okamoto Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. Prog. Polym. Sci. 28 (1539–1641) 2003.
14. Grim. Rhalp E. Clay mineralogy. International series in the earth and planetary sciences. ISBN0070248362. Ed. McGraw-Hill. inc. U.S.A. (86) 1968.
15. Vaia Richard A., Klaus D. Jandt, Kramer Edward J., Giannelis. Emmanuel P. Macromolecules. 28 24. (8080-8085) 1995.
16. Salahunddin Akelah N., Hiltner A., Baer E., Moet. A. Nanostructured Mater. 4. (965) 1994.
17. Giannelis, E. American Chemical Society. (260-281) 1995.
18. Giannelis, Emmanuel P. Advanced Material. 8(1). (29-35) 1996.
19. Romo A. Nanocompuestos Polimericos. Tesis Monografica. México D.F. 2002
20. Vaia, Richard A. Teukolsky Rachel K., Giannelis. Emmanuel P. Chemistry of materials. 6(7). (1017-1022) 1994.
21. Joong-Hee Lee, Daeseung Jung, Chang-Eui Hong, Kyong Y. Rhee. Properties of Polyethylene-Layered silicate nanocomposites prepared by melt intercalation with a PP-g-MA compatibilizer. 65 (1996-2002) 2005.
22. Dietsche F, Thomann Y, Thomann R. Journal of Applied Polymer Science. 75 (396-405) 2000.



- 23 Carrado Kathelen A., Xu. Langquio. *Chemistry of Materials*. 10 (5) (1440-1445) 1998.
- 24 Burnside S.D.; Giannelis E.P. *Journal of Polymer Science*. 38 (1595-1604) 2000.
- 25 Akkapeddi M.K. *Polymer Composites*. 21 (4) (576-585) 2000.
- 26 Ramanan Krishnamoorti, Jiaxian Ren. *Journal of Chemical Physics*. 2001.
- 27 Lan Tie, Pinnavaia Thomas.J. *Chemistry of Materials*. 6(12) (2216-2219) 1994.
- 28 Fu X., Qutubuddin s. *Polymer*. 42(2) (807-813) 2001.
- 29 Le Baron Peter C., Wang Zhen, Pinnavaia Thomas. *J. Applied Clay Science*. 15(1) (11-29) 1999.
- 30 Hatsuo Ishida, Campbell Sandi, Blackwell John. *Chemistry of Materials*. 12 (1260-1267) 2000.
- 31 Mark Clarey, James Edwards, Tsipurky Semeon J., Beall Gary W. Eisenhour Don D. Patente # 6050509 USA Amcol International Company. 2000.
- 32 Pinnavaia T.J., Beall G.W. *Polymer-Clay Nanocomposites*. 2000.
- 33 Kojima Y, Usuki A, Kawasumi M, Okada A, Fukushima Y, Kurauchi T. *J Mater Res*. 8 (5) (1185-9) 1993.
- 34 G. Moad. *Prog. Polym. Sci.* (24 81) 1999.
- 35 Tudor J, Ohare D. *Chem Commun.* (603) 1997.
- 36 Weimer MW, Chen H, Giannelis EP, Sogah DY. *J. Am. Chem. Soc.* 121 (1615) 1997.
- 37 Heinemann J. Reicher P, Thomann R, M. R. *Macromol Rapid Commun*. 20 (423) 1999.
- 38 Kuo SW, Huang WJ, Huang SB, Kao HC, Chang FC. *Polimer*. 44 (7709) 2003.
- 39 Yang F, Zhang XQ, Zhao HC, Chen B, Huang BT, Feng ZL. *J. Appl. Polym. Sci.* 89 (3680) 2003.
- 40 Wang Q, Zhou ZY, Song LX, Xu H, Wang L. *J. Polym. Sci. Part A. Polym. Chem.* 42 (38) 2004.
- 41 Jun-Ting Xu, Qi Wang, Zhi-Qiang F. *European Polymer Journal*. 41(3011-3017) 2005.
- 42 Wang S. Yuan H, Tang Y, Wang Z. Chen Z, Fan, J. *J. Appl. Polym. Sci.* 89(9) (2583-5) 2003.
- 43 Zhang J, Wilkie CA. *Polym Degrad. Stabil.* 80 (163-9) 2003.
- 44 Kato M, Okamoto H, Hasegawa N, Tsukigase A, Usuki A. *Polym. Eng. Sci.* 43 (6) (1312-6) 2003.
- 45 Hotta S. Paul DR. *Polymer*. 43 (7639-54) 2004.
- 46 Wang KH, Koo CM, Chung IJ. *J. Appl. Polym. Sci.* 89(8) (2131-6) 2003.
- 47 Kopakumar TG, Lee JA, Kontopoulou M, Parent JS. *Polymer*. 43(20) (5483-91) 2002.
- 48 Wang KH, Choi MH, Koo CM, Choi YS, Chung IJ. *Polymer*. 42(24) (9819-26) 2001.



- 49 Koo C, Ham M, Kim HT, Wang SO, Chung KH. *Macromolecules*. 35(13) (5116-22) 2002.
- 50 Messermith PB, Giannelis EP. *J. Polym. Sci. Pol. Chem.* 33 (1047-57) 1995.
- 52 Jennifer A. Lee, Maranna Kontopoulo. *Polymer*. 45 (6595-6600) 2004.
- 51 M Alexandre, G Beyer, C. Henrist. *Chem. Mater.* 13 (11) (3830) 2001.
- 54 S. Wang, Yuan Hu. *Materials Letters*. 57 (2675-2678) 2003.
- 56 Jun-Ting Xu, Qi Wang. *European Polymer Journal*. 41 (3011-3017) 2005.
- 55 Jennifer A. Lee, Maranna Kontopoulo. *Polymer*. 45 (5040-5049) 2005.
- 53 Joong-Hee Lee, Daeseung Jung. *Composites science and technology*. 65 (1996-2002) 2005.
- 57 Nandika Anne D. *Clay Nanocomposites*. Enciclopedia of nanotechnology Ed. American scientific publishers. Vol 3. (253-265) 2004.
- 58 Mc. Cabe W. L.. Cabe. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Ed. Mc Graw-Hill. 4 (242-275) 1991.
- 59 Severs, Edward T. *Rheology of Polymers*. Reinhold Publishing Corporation. New York. USA. 1962.
- 60 Christopher w. Macosko *Rheology. principles, measurements and applications* Wiley-vch. QC189.5 1994.
- 61 Bird L. *Fenómenos de transporte*. Ed. Mc Graw Hill. (1.1-1.15) 1989.
- 62 Fabricio G. Martinelli. *Twin-Screw Extruders*. Ed. Van Nostrand Reinhold Co. (1-128) 1983.
- 63 James I. White. *Twin Screw Extrusion*. Ed. Hanser Publisers. (4-20) 1990.
- 64 Xantros, M. *Reactive Extrusion. Principles and Practice*. Ed. Hanser Cap. 1,2 y 3. USA. 1992.
- 65 Juarez G.E., Almeida C.S. *Desarrollo de Nanocompuestos a base de PET y Arcillas*. Tesis Profesional. Facultad de Química. UNAM. México D.F. 2004.
- 66 Edith Z. S. *Nanocompuestos poliméricos aplicados a válvulas cardiacas*. Tesis profesional. Universidad la Salle. México D.F. 2004.



8 APENDICE

8.1 ACRONIMOS

En los polímeros existen nombres largos y complicados debido se les suele llamar por sus acrónimos, los cuales se enlistan a continuación.

Acrónimo	Polímero
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
ASA	Acrilonitrilo estireno acrilato
CA	Acetato de celulosa
EP	Resina epóxica
EPS	Poliestireno expansible
ETFE	Etilen-tetrafluoroetileno
EVA	Etil vinil acetato
FEP	Tetrafluoroetilen-hexafluoropropileno
HDPE ó PEAD	Polietileno de alta densidad
LDPE ó PEBD	Polietileno de baja densidad
LLDPE ó PELBD	Polietileno lineal de baja densidad
MF	Melamina formaldehído
PA	Poliamida
PB	Polibutadieno
PBT	Polibutilen tereftalato
PC	Policarbonato
PCL	Polímeros líquidos cristalinos
PDMS	Polidimetil síloxano
PEG	Polietilenglicol
PEI	Poliesterimida
PEN	Polietilen naftaleno
PES	Poliestersulfona
PET	Polietilen tereftalato
PEO	Polietilen óxido
PF	Fenol formaldehído



PFA	Perfluoroalquilvinil éter
PI	Poliímida
PMMA	Polimetil metacrilato
POM	Polióxido de metileno
PP	Polipropileno
PPE	Polifenil éter
PPO	Polióxido de metileno
PPS	Polifenilsulfona
PS	Poliestireno
PSU	Polisulfona
PTFE	Politetrafluoroetileno
PU	Poliuretano
PVC	Cloruro de polivinilo
PVDC	Policloruro de vinilideno
PVP	Poli (-N-vinilpirrolidona)
PVOH	Polivinilalcohol
SAN	Estireno acronitrilo
SB	Estireno butadieno
SBR	Hule de estireno butadieno
TPE	Elastómero termoplástico
TPU	Poliuretano termoplástico
UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular
UF	Urea formaldehído
UP	Resina de poliéster insaturado



8.2 GLOSARIO

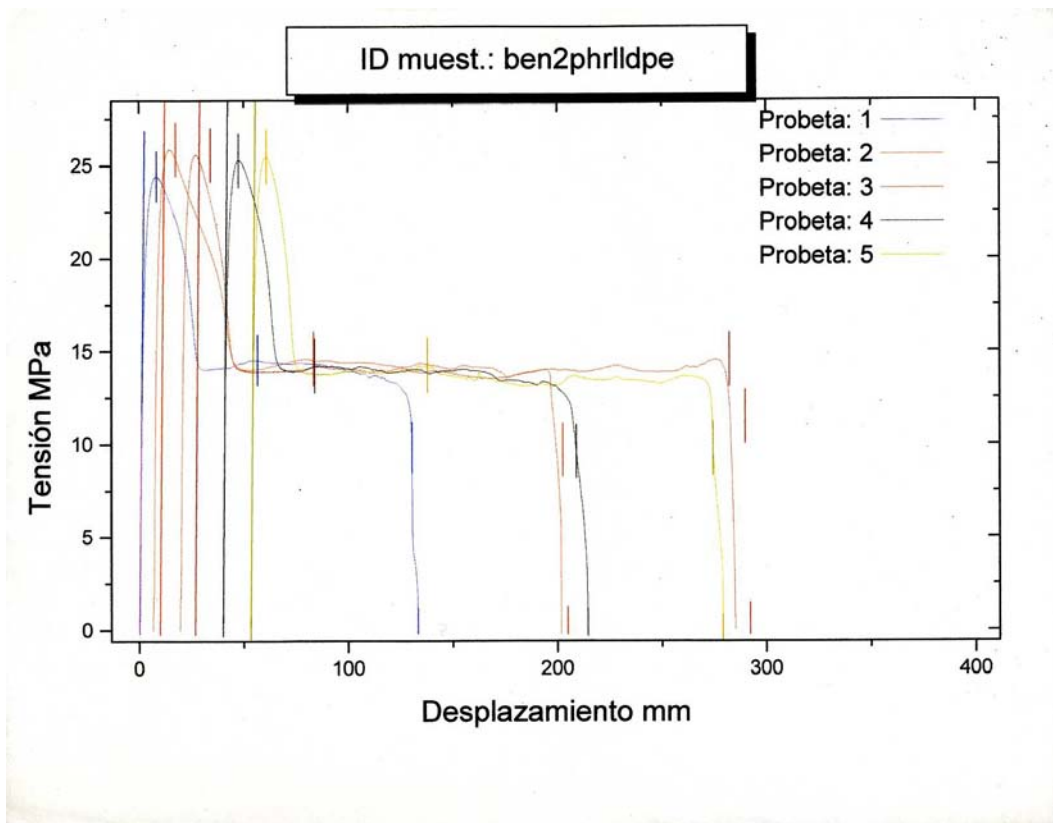
- Absorción:** Fenómeno de retención de un gas o líquido por un sólido en los poros intersticiales. No se limita a la superficie
- Adsorción:** Adherencia de los átomos, iones o moléculas de un gas o un líquido a la superficie de otra sustancia, llamada adsorbente
- Alquilamina:** Compuesto que consiste en un grupo alquilo unido al nitrógeno de una amina.
- Amina:** Tipo de compuesto orgánico de nitrógeno, pueden considerarse como derivados del amoníaco (NH_3) sustituyendo 1 ó más átomos de nitrógeno por grupos alquílicos. Todas las aminas son básicas por naturaleza y suelen combinarse fácilmente con ácidos para formar sales.
- Análisis térmico diferencial (DTA):** Método analítico instrumental térmico en el que se compara la velocidad de absorción de calor de un polímero con la de un patrón como el vidrio o el aluminio.
- Amorfos:** Los termoplásticos amorfos se caracterizan por que sus moléculas filamentosas y ramificadas están en completo desorden. Este arreglo molecular permite el paso de la luz, razón por la cual los plásticos amorfos son transparentes ó generalmente translucidos.
- Bentonita:** Es el término común utilizado para describir el mineral industrial cuyos componentes principales son esmécticas, en su mayoría, Na-montmorillonita y/o Ca-montmorillonita.
- Calorimetría de barrido diferencial (DSC):** Método analítico instrumental térmico en el que se mide la diferencia entre calor absorbido (dH/dT) por una muestra de un polímero y una referencia normalizada basándose en el consumo energético a medida que se aumenta la temperatura.
- Conductividad térmica:** Es la cantidad de calor que transmiten los materiales plásticos a través de ellos. Las unidades para la determinación de ésta temperatura son: cal cm./seg. cm^2 , con respecto al área del espécimen.
- Cristalitos:** Regiones cristalinas con ordenamiento parcial.
- Compatibilidad:** La facultad de 2 o más materiales de estar en cerrada y permanente asociación por un periodo indefinido. Los líquidos son compatibles si son miscibles en todas las proporciones y no padecen una separación de fase con el tiempo. Líquidos y sólidos son compatibles si el sólido es soluble en el líquido. Los sólidos son compatibles si pueden estar en contacto íntimo durante largos periodos de tiempo sin efectos perjudiciales de unos a otros.
- Deformación por estiramiento:** Es la deformación de una probeta de ensayo causada por la aplicación de cargas determinadas. Es la variación de longitud de la muestra dividida por la longitud inicial.
- Difusión:** Mezcla espontánea de una sustancia con otra cuando entran en contacto o están separadas por una membrana permeable o una barrera microporosa. El nivel de difusión se da con facilidad en los gases, no tan fácil en los líquidos y aún menos en los sólidos.
- Dureza:** Es la resistencia a ser mellados o rayados en su superficie.



- EFX:** Espectroscopia de fotoelectrones por rayos X, técnica analítica instrumental que consiste en irradiar un sólido al vacío con rayos X y estudiar la energía de los electrones transmitidos.
- Elastómeros:** Son materiales elásticos que recuperan casi totalmente su forma original después de liberar alguna fuerza que se encuentra aplicada en ellos. Son insolubles y no pueden fundir mediante aplicación de calor, es decir, pueden descomponerse químicamente cuando se calientan más allá de su temperatura máxima de servicio. El comportamiento de estos materiales se debe a que las macromoléculas de elastómeros están entrecruzadas por enlaces químicos.
- Elastómeros termoplásticos:** Este grupo de materiales combinan propiedades especiales de los elastómeros con las propiedades de transformación de los termoplásticos. Son copolímeros en bloque y aleaciones entre polímeros que poseen propiedades elásticas dentro de cierto rango de temperatura. Las propiedades elásticas se deben a la existencia de enlaces físicos provocados por fuerzas intermoleculares secundarias, tales como puentes de hidrógeno. Cuando se calientan arriba de cierto intervalo de temperatura los enlaces intermoleculares desaparecen y se restituyen después de que se enfrían, para desarrollar sus propiedades elastoméricas. Estos materiales pueden ser procesados e incluso reciclados.
- Elongación:** Es la máxima extensión que alcanza un polímero en forma de probeta, hasta llegar el momento de su ruptura, después de someterla a un estiramiento. La medición se reporta en porcentaje.
- Enlace de hidrógeno:** Atracción débil (5Kcal/mol) entre un átomo de hidrógeno unido a un elemento electronegativo y un par de electrones no compartido de otro átomo. Estos enlaces, también son llamados puentes de hidrógeno.
- Exfoliar:** En un cristal, romper, separar a lo largo de determinados planos definidos por estructura molecular; puede exfoliarse en una dirección, o en varias como en la mica.
- Extrusión:** Es un procesos continuo en el que la resina es fundida por acción de temperatura y fricción, es forzada a pasar por un dado que le proporciona forma definida y enfriada finalmente para evitar deformaciones permanentes. Se fabrican por este proceso: tubos, películas, mangueras, láminas, filamentos y pellets, entre otras cosas.
- Fase:** Es aquella región del sistema, la cual es completamente uniforme no solo en cuanto a su composición química, sino también en cuanto a su estado y propiedades fisicoquímicas.
- Fibra:** Hilos o filamentos delgados producidos por la extrusión de un polímero fundido a través de pequeños orificios en una matriz.
- Hidrofilico:** Que tiene afinidad, atrae, adsorbe agua.
- Hidrofóbico:** Que carece de afinidad por, repele, no adsorbe, no adsorbe agua.
- Homogéneo:** Relativo a una sustancia que tiene una composición o estructura uniforme.
- Homopolímero:** Es un polímero obtenido de un solo tipo de monómero.
- Injertados:** Polímeros. Son también llamados copolímeros de Graft, se obtienen fijando sobre la cadena macromolecular de un polímero, cadenas laterales de un homopolímero. La preparación de los copolímeros injertados se puede realizar utilizando medios químicos, fotoquímicos, radioactivos o incluso mecánicos, para crear sobre una cadena macromolecular, lugares reactivos que serán utilizados para fijar las cadenas laterales del segundo polímero.



- Nano:** Prefijo que significa 10^{-9} unidades.
- Nanómetro:** 10^{-9} metros. $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$. $1\text{nm} = 10 \text{ \AA}$.
- Organofílico:** Que tiene afinidad por los compuestos orgánicos.
- Permeabilidad:** es la cantidad de vapor de agua o gas que se difunde a través del espesor de pared de los plásticos. Los gases como el oxígeno, nitrógeno o CO_2 y el vapor de agua son medidos bajo condiciones normales de presión y temperatura en un metro cuadrado de película de un espesor determinado.
- Plástico:** Material sintético constituido por macromoléculas obtenidas por polimerización y que tiene la propiedad de ser fácilmente moldeable, además de que puede tomar una forma determinada por medios mecánicos, únicamente auxiliados con una elevación de la temperatura.
- Puente de hidrógeno:** Atracción débil 5 Kcal/mol entre un átomo de hidrógeno unido a un elemento electronegativo no compartido a otro átomo.
- Resina epóxica:** Son resinas termofijas cuyo grupo característico se conoce como grupo epóxido. Son el resultado de la reacción entre epiclorhidrina y ácidos multifuncionales, aminas o alcoholes. La más común de estas resinas está basada en bisfenol-A. El curado puede llevarse a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas e indistintamente requiere de agentes de endurecimiento o catalizadores.
- Resistencia al impacto:** Es la propiedad que presentan los plásticos a resistir un golpe o prolongar una fractura. También se define como la propiedad de resistir la ruptura física o prolongar una fractura cuando se le aplica una fuerza rápidamente.
- Resistencia a la tensión:** Es la capacidad que presentan los plásticos a oponerse a la deformación, determinándose por la fuerza de tensión por unidad de área. Se define como la máxima carga de tensión por unidad de área que resiste una muestra antes de deformarse.
- Tacticidad:** El termino tacticidad se refiere al ordenamiento espacial de las unidades estructurales.
- Tactoide:** Estructura formada por atracciones electroestáticas entre las laminas de arcilla por lo que forman pequeños grupos compactos.
- Termofijos:** Los plásticos que se mantienen rígidos y sólidos a temperaturas elevadas se denominan termofijos. Se obtienen por reticulación de productos líquidos de bajo peso molecular. Están reticulados en todas direcciones y debido a su estructura no son moldeables plásticamente, son infusibles y resisten altas temperaturas, no pueden ser disueltos y muy raramente se hinchan. A temperatura ambiente, generalmente son duros y frágiles. Debido a que no se funden, no son reciclables.
- Termoplásticos:** Los termoplásticos se caracterizan por transformarse de sólido a líquido y viceversa por acción del calor, se disuelven o por lo menos se hinchan al contacto con solventes. En estado sólido pueden deformarse permanentemente después de aplicar una fuerza, esto se debe a que sus macromoléculas están libres o sueltas una de otra y pueden deslizarse entre si ante la aplicación de calor. A temperatura ambiente pueden ser blandos o duros, frágiles y rígidos. Una de sus ventajas es que pueden moldearse por calor, además, pueden soldarse y sus desechos reciclables.



Sample: MUESTRA ASS MMT
Size: 9.7709 mg
Method: TGA NORMAL
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL. 10°C/MIN.

TGA

MMT-ooliv. Nancos
sin bande nota
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 8-Sep-05 17:29

sin secar

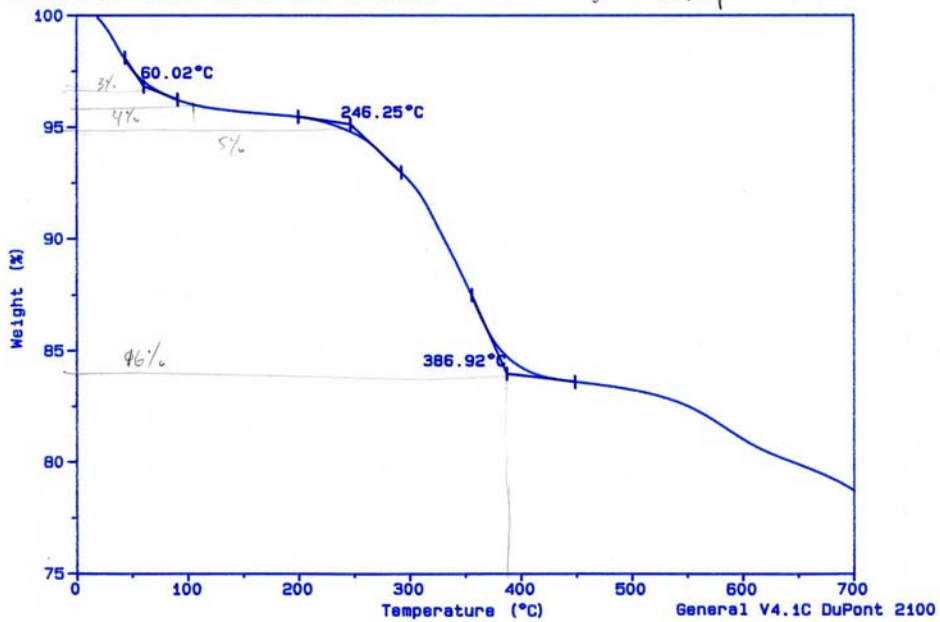




Sample: MUESTRA ASS MMT C11
Size: 11.3241 mg
Method: TGA NORMAL
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL. 10°C/MIN.

TGA

MMT - 11-aminoundecanoic acid
File: C:\SECTECI.746
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 9-Sep-05 07:01
seco de su vida



Sample: MUESTRA ASS HDPE *para 6020*
Size: 36.7000 mg
Method: I. BETANCOURT
Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL. 10°C/MIN

DSC

File: C:\TA\Data\TGA\MiguelAngel\Secteci.135
Operator: M.A. CANSECO
Run Date: 11-Mar-05 10:04
Instrument: 2910 MDSC V4.4E

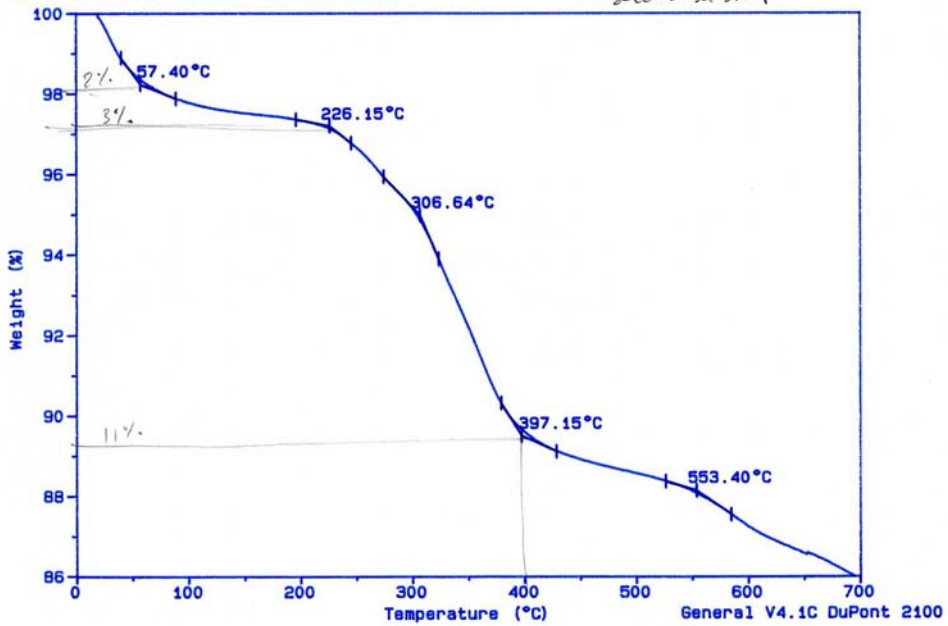




Sample: MUESTRA BENTONITA C11
 Size: 9.8292 mg
 Method: TGA NORMAL
 Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL. 10°C/MIN.

TGA

Bentonita - 11-aminoindacanoic acid
 File: C: SECTECI.738
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 8-Sep-05 12:10
secada en estufa



Sample: MUESTRA ASS BENTONITA
 Size: 12.8663 mg
 Method: TGA NORMAL
 Comment: ATM DE N2 VEL. DE CAL. 10°C/MIN.

TGA

File: C: SECTECI.730
 Operator: M.A. CANSECO
 Run Date: 7-Sep-05 13:02

Bentonite - Na⁺ casita sin secar

