



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS
MEZCLAS TRICOMPONENTES DE POLIETILENO DE
ALTA Y BAJA DENSIDAD CON LOS ELASTOMEROS
POLIBUTADIENO Y ETILENO-PROPILENO-DIENO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA

P R E S E N T A

JOSÉ HÉCTOR LLAMAS CHÁVEZ

México, D. F

1994

Dedico este trabajo con mucho cariño a mi esposa Cristina, a mis hijos Héctor y Andrea, a mis padres y hermanos por todo su apoyo para su realización.

Agradezco al Dr. Ángel Manzur Guzmán, Dr. Roberto Olayo González y al M en C Ángel Escobar Hernández por sus asesoría y apoyo que me brindaron para la elaboración de este trabajo.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES.	
1.1 Antecedentes.	4
1.2 Estudio de mezclas en polímeros.	8
1.3 Miscibilidad.	20
1.4 Conceptos de miscibilidad y compatibilidad.	25
2. EXPERIMENTACIÓN	
2.1 Pre-mezclas.	28
2.2 Molienda.	30
2.3 extrusión.	32
2.3.1 Variables.	32
2.3.1.1 Temperaturas de extrusión.	33
2.3.1.2 Velocidad de extrusión.	33
2.3.1.3 Composición.	33
2.3.1.4 Condiciones de extrusión	38
2.4 Caracterización.	38
3. MEZCLAS TERNARIAS DE HDPE/LDPE/PBR.	40
3.1 Materiales puros.	41
3.2 mezclas binarias.	47
3.3 Mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR.	
3.3.2.1 mezclas con 5 % de PBR.	75
3.3.2.2 Mezclas con 10 % de PBR.	87
3.3.2.3 Análisis global de las mezclas con 0. 5 y 10 % de PBR	99

4. MEZCLAS DE HDPE/LDPE/EPDM.	109
4.1 Mezclas 1.1	110
4.2 Mezclas ternarias a contenidos fijos de EPDM	
4.2.1 Mezclas con 5 % de EPDM	124
4.2.2 Mezclas con 10 % de EPDM	137
4.2.3 Análisis global de las mezclas con 0.5 y 10 % de EPDM	148
5. CONCLUSIONES	157
NOMENCLATURA.	164
BIBLIOGRAFÍA	167

INTRODUCCION

El presente trabajo se enfoca al estudio de las mezclas de polímeros, en particular al estudio de las mezclas de polietileno de alta densidad (HDPE) con polietileno de baja densidad (las cuales denotamos como mezclas binarias). Posteriormente a las mezclas binarias se les agrega un tercer componente (elastómero), siendo este hule polibutadieno (PBR) ó hule etileno - propileno - dieno (EPDM), para obtener mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR y HDPE/LDPE/EPDM.

El objetivo de esta investigación es el estudio de las mezclas bicomponentes y de las mezclas tricompuestas con materiales poliméricos, plástico y elastómero, así como la dependencia de las propiedades con las condiciones de procesado y las composiciones de las mezclas sobre las propiedades mecánicas (elongaciones en los puntos de ruptura, esfuerzos máximos y a la cedencia al 2 %, módulos de Young y resistencia al impacto), utilizando un tercer componente en las mezclas como agente compatibilizante. Los resultados obtenidos en las mezclas (con polietilenos vírgenes) se pretende sirvan de base para formular mezclas con polietilenos de desecho, tanto industrial como municipal, con el fin de recuperar energía y materiales y ofrecer alternativas para el problema ecológico.

El estudio de las mezclas de polímeros puede analizarse desde el punto de vista científico, comercial e industrial. El presente trabajo pretende abarcar estos enfoques, ya que es una investigación científica y además busca que los resultados obtenidos puedan tener una aplicación comercial y/o industrial.

Los polietilenos en todas sus variedades, hoy en día tienen gran importancia en la industria, ya que son utilizados en gran cantidad de productos. Algunos de sus múltiples usos se tienen la fabricación de bolsas de plástico, envases para productos alimenticios y farmacéuticos, artículos deportivos, aislantes térmicos de conductores eléctricos, piezas automotrices y varios más. Por lo que el estudio de las mezclas con el propósito de mejorar sus propiedades, reducir costos y de abatir el problema ecológico, es de gran interés.

En el presente trabajo se demuestra el efecto de los elastómeros en las mezclas de polietilenos, así como el efecto de las variables de procesado y la composición de las mezclas, sobre las propiedades mecánicas. Para la elaboración de la presente investigación se consultaron libros como artículos de revistas especializadas, siendo esta última opción la más utilizada, debido a que las mezclas de polímeros son un tema de reciente desarrollo, por lo que las teorías no explican del todo el comportamiento de las mismas. Una de las teorías más aceptadas es la de Flory-Huggins (D. Paterson, 1982).

La investigación desordenada y no sistematizada conlleva a resultados muy poco confiables, por lo que es importante tener un método que sirva para guiar la investigación. El método empleado en esta investigación, fue el diseño de experimentos empleado por A. Escobar (A. Escobar, 1990), en el cual se consideran las variables temperatura, velocidad de extrusión y composición, que tienen efecto sobre las propiedades mecánicas estudiadas en sistemas tricomponentes de polietilenos de alta y baja densidad mezclados con hule natural. Este diseño de experimentos determinó el número de experimentos necesarios para poder realizar un análisis confiable del comportamiento de las mezclas ya mencionadas. El primer paso en el procedimiento seguido para la obtención de las mezclas, fue el de la preparación de la pre-mezcla de HDPE/LDPE/PBR y HDPE/LDPE/EPDM en un mezclador tipo Banbury (Brabender W50EN), posteriormente el producto es pulverizado en un pulverizador rotatorio tipo Wiley (Brabender). Una vez listas las pre-mezclas, se mezclan con los polietilenos (pulverizados) en las proporciones que se

indican en la parte experimental, para posteriormente ser sometidas a extrusión en un extrusor de husillo simple (Brabender) con las condiciones expuestas en la experimentación. De la extrusión se obtiene un material en forma laminar que es cortado con un molde (suaje tipo hueso) y sometidas a pruebas de deformación unidireccional, en una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron), de donde se determinan las pruebas mecánicas elegidas.

En la primera parte se presenta una visión general de los aspectos más relevantes de las mezclas de polímeros, así mismo se trata de clarificar los conceptos más importantes en relación al tema con el fin de facilitar la comprensión de la investigación. También contiene las ideas principales de los trabajos realizados recientemente en el campo de las mezclas que contienen algún polietileno. Estos trabajos fueron la parte importante de la selección de los agentes dispersantes (componentes mayoritarios de las pre-mezclas), así como el número de experimentos a realizar para obtener una buena descripción de las propiedades estudiadas.

En el siguiente capítulo se realiza una descripción detallada del procedimiento experimental, que abarca desde la obtención de la premezcla (es decir, la composición y condiciones de mezclado) y la de las mezclas binarias y ternarias, hasta la realización de las pruebas mecánicas y rayos-X (para las mezclas binarias y las mezclas ternarias que contienen PBR). Posteriormente se realiza un análisis de los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para las mezclas bicomponentes, así como el grado de cristalinidad para las mismas, para pasar posteriormente al análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias que contienen PBR, a las cuales también se les determinan su grado de cristalinidad. En el siguiente capítulo se presenta el análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas tricompuestas que contienen EPDM.

En el último capítulo se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de haber analizado los resultados. Estas conclusiones se muestran en forma específica y se refieren, casi en su totalidad a las pruebas mecánicas, puesto que los resultados con rayos-X no fueron lo suficientemente experimentados en toda la gama de mezclas realizadas, como para poder formular conclusiones globales.

De los resultados obtenidos se puede concluir que las mezclas con PBR y EPDM presentan algunos intervalos (ventanas de compatibilidad, desde el punto de vista de propiedad mecánica) en donde se presentan algunas ganancias en las propiedades sin afectar fuertemente las propiedades restantes, con lo que se demuestra al menos en estos intervalos su efectividad.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes.

En los últimos años las mezclas de polímeros han alcanzado cada vez mayor importancia, tanto en el aspecto académico como en el campo comercial (O. Olabisi, 1982).

En la industria hulera, el concepto de mezcla o aleación fué empleado empíricamente por los formuladores desde sus primeras épocas (Paul and Newman, 1978). Se puede afirmar que al intentar aplicar esta idea para preparar mezclas entre polímeros, el principal escollo a superar ha sido el problema de incompatibilidad entre polímeros, previsto originalmente por Flory (de Gennes, 1979). Desde el punto de vista termodinámico, los polímeros tienden a ser inmiscibles entre si, debido a que la entropía de mezclado es muy pequeña y su entalpía de mezclado es por lo general endotérmica y desfavorable, con el resultado de que en el 90 % de los casos, no se pueden obtener mezclas estables (Flory, 1953 y Olabisi, 1979).

Lo anterior constituye una gran barrera que aunado a los fracasos iniciales en el campo experimental para obtener mezclas homogéneas, impidió que se desarrollara un interés en el campo. Esto no es nada extraño, pues los polímeros disponibles hace alrededor de 35 años, no ofrecían la variedad estructural que se observa con los que se producen hoy en día y que fué una de las claves para encontrar las primeras mezclas compatibles. Basta decir que los cinco grandes termoplásticos HDPE (polietileno de alta densidad); LDPE (polietileno de baja densidad); PS (poliestireno), PP (polipropileno) y PVC (Cloruro de polivinilo), no son compatibles entre sí en mezclas binarias y mucho menos en mezclas ternarias, aunque en estudios recientes (A. Graffar, et al, 1981) ya se han encontrado mezclas de estos termoplásticos en mezclas binarias con un tercer elemento como compatibilizante (desde el punto de vista de propiedad mecánica), siendo tales elementos EPDM (etileno - propileno - dieno - hule), NR (hule natural), BR(hule butilo), ABS

(acrilonitrilo - butadieno - estireno), CPE (polietileno clorado), ACS (acrilonitrilo - clorado) HIPS (Poliestireno de alto impacto) y PU (poliuretano).

Esta situación cambió cuando se encontraron los primeros sistemas (totalmente miscibles, desde el punto de vista termodinámico) de polímeros comerciales. La década de los 70's constituye la época de un inicio de actividades de investigación en el terreno de mezclas poliméricas, donde la caracterización, estudios termodinámicos y determinación de propiedades termodinámicas y mecánicas tienen papeles preponderantes.

A principios de los 80's sólo se disponía de dos teorías para analizar y predecir miscibilidad en polímeros; la ecuación de estado de Flory (Flory, 1953) y la de Sánchez y Lacombe (Sánchez y Lacombe, 1976). Las ecuaciones de estado resultantes, más bien se han reducido a correlacionar en la mayoría de los casos sólo cualitativamente el comportamiento de diversos sistemas a temperaturas por arriba de la temperatura de transición vítrea (T_g).

Los métodos semi-empíricos para la predicción del estado de compatibilidad en sistemas binarios, basados sobre todo en la determinación de calores de mezclado, proporcionan el método más apropiado para definir a priori la miscibilidad de aleaciones poliméricas.

La modificación de propiedades de una mezcla por medio de ajustes en el flujo o elongación se aplicó al principio en un nivel totalmente empírico, sin embargo, este aspecto de las aleaciones poliméricas ha progresado seriamente a medida que se han ido comercializando diversas mezclas y se han requerido propiedades de flujo para diseñar su producción a gran escala.

En distintos sistemas se han estudiado propiedades reológicas y correlacionado la dependencia de la morfología en el estado sólido sobre el patrón de flujo que se impone a los polímeros durante su mezcla o bien, durante su procesado final. Por ejemplo, Utracky et al (1986), encontraron cambios morfológicos en mezclas de HDPE y una poliamida, tales como: segregación por tasa de corte, con una migración del material de menor viscosidad hacia la pared; fibrilación de la fase dispersa, asociada con la coalescencia, prácticamente a cualquier temperatura; coalescencia, dispersión dinámica y deslizamiento entre las capas en el material.

Sin embargo, la indudable importancia de la investigación reológica en mezclas poliméricas no ha crecido al paso que se requiere. Por ejemplo, el mezclador tipo banbury, de uso común en la combinación de polímeros, sigue un patrón de flujo sumamente complejo y no puede producir datos lo suficientemente finos, detallados y aún, en una escala tan amplia como se espera para el diseño y optimización de procesos.

Se han venido empleando un gran número de técnicas para la evaluación de las mezclas poliméricas (Olabisi, 1979). La calorimetría diferencial de barrido (DSC), es la más extendida para un examen inicial, pero los métodos espectroscópicos han ido creciendo en importancia, en especial, la espectroscopía infrarroja con transformadas de Fourier -FTIR- (Varnell, et al, 1983), que permite seguir de cerca la naturaleza de las interacciones típicamente débiles, que se encuentran en mezclas poliméricas. Otra técnica que ha cobrado importancia en este sentido es el análisis por fluorescencia de excimeros, para la determinación de homogeneidad y de diagramas de fase.

Con los métodos de dispersión de luz y dispersión de neutrones (N. Inabat, et al, 1986 y C. T. Murray, et al, 1985) se han obtenido varios resultados interesantes, por ejemplo, a través de esta última técnica, se ha logrado especificar que un polímero se expande en su radio de giro al estar en un medio polimérico compatible (Murray, et al, 1985), en forma similar a lo que sucede

en soluciones polímero-solvente, cuando éstos interaccionan favorablemente.

Por otro lado el comportamiento mecánico de las aleaciones poliméricas ha sido la propiedad fundamental de importancia al determinar su utilidad y destino final. Por ello, desde el punto de vista pragmático, un sistema se considera compatible cuando la propiedad mecánica se beneficia con el mezclado (en estado fundido) entre polímeros (H. Vázquez, 1984). Esto puede obtenerse por medio de compatibilidad termodinámica o bien, con sistemas miscibles en los que existe un mínimo de adhesión interfacial entre los componentes.

Los sistemas inmiscibles ha recibido atención especial, con la proposición de agentes compatibilizantes y la extensión del concepto de aumento en la resistencia al impacto por la presencia de una fase elastomérica. Aunque las propiedades mecánicas de las aleaciones poliméricas representa el grueso de investigaciones en la literatura. Existe un creciente interés en la determinación de las propiedades reológicas, térmicas y de transporte de fluidos en mezclas poliméricas. De particular importancia son los sistemas que permitiran la realización de reciclado de materiales de desecho municipal e industrial.

En los últimos años las mezclas de polímeros han alcanzado cada vez mayor importancia, tanto en el aspecto académico, como en el campo comercial e industrial, principalmente por su posible aplicación para el reciclado de ciertos polímeros. Debido a que las mezclas de polímeros son un tema reciente sobre el cual no se cuenta con mucha información. A continuación se presentan algunos de los estudios realizados con mezclas de polietilenos, tanto de alta densidad (HDPE), como de baja densidad (LDPE).

1.2 Estudios en mezclas de polímeros

Graffar, et al, 1981 y Sadrmohaghegh, et al, 1983, estudian las propiedades de las mezclas (incompatibles) de LDPE / PP, LDPE / PS, LDPE / PVC. El propósito de esta investigación es el de conocer en qué medida un tercer componente (compatibilizante) puede mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas (que al agregarles el tercer componente se consideran como mezclas ternarias). Los compatibilizantes utilizados para la preparación de las mezclas son; EPDM, NR, BR, ABS, SBS, CPE, ACS, HIPS y PU.

Las mezclas realizadas se procesaron en un mezclador tipo banbury a 180 °C, con un tiempo de mezclado de 5 minutos. Las propiedades mecánicas estudiadas fueron; las elongaciones en el punto de ruptura, la resistencia a la tensión y la resistencia al impacto. Para la medición de estas propiedades se utilizó un medidor de tensión Instron, con una velocidad de 2 cm/min a temperatura ambiente (aproximadamente a 22 °C).

Entre los resultados más importantes que se obtuvieron en esta investigación, se tiene que para una mezcla completamente miscible no se debe observar ninguna separación de fases y las propiedades de una mezcla 1:1 (mezcla con las mismas composiciones de dos polímeros), debe ser el promedio de las propiedades de los componentes puros. Esto da una medida de la efectividad del compatibilizante, es decir, mientras la mezcla 1:1 se acerca más al promedio de las propiedades de los componentes puros, se puede decir que el compatibilizante es el más adecuado para este tipo de mezclas. También se encontró que una mejora en la resistencia al impacto es generalmente paralela a una mejora en las elongaciones en los puntos de ruptura, y la resistencia a la tensión sigue un comportamiento más complejo y generalmente no muestra el mismo nivel de mejora al aumentar la concentración del compatibilizante.

En las mezclas de LDPE / PS (1:1) se obtuvo una mejora considerable en la resistencia a la tensión utilizando el SBS como compatibilizante, esto se debe a la miscibilidad de los dos segmentos del copolímero (SBS) con ambas fases de la mezcla. Otros compatibilizantes (HIPS, ABS y ACS) producen algo de mejoramiento, pero desfavorecen a la resistencia a la tensión debido a su baja adhesión. Un resultado inesperado fue la efectividad del EPDM, BR y NR como agente favorecedor de la resistencia al impacto y de la elongación, en la mezcla de LDPE / PVC. El EPDM actúa al parecer como agente dispersante y un modificador del impacto, a pesar del hecho de que no parece tener los medios para asociarse físicamente con el PVC de la mezcla.

También se encontró que el principal factor para obtener una buena resistencia al impacto y elongación en el punto de ruptura de una mezcla de polímeros en la presencia de un elastómero en la interfase, y una buena resistencia a la tensión, dependen de las propiedades dispersantes del compatibilizante.

García Rejón, et al, 1986 y 1987 estudia las propiedades reológicas de una mezcla en estado fundido de HDPE / LDPE, dicha mezcla fue obtenida en un mezclador interno, utilizando una temperatura de 190 °C, con una velocidad de mezclado de 50 rpm, con un tiempo de mezclado de 10 min. Las mezclas fundidas que se obtienen en el mezclador interno (tipo banbury) son procesadas en un extrusor, a dos velocidades de extrusión, siendo estas de 32 y 64 rpm. Las propiedades estudiadas son; propiedades viscoelásticas, tales como módulo de almacenamiento, módulo de pérdida; y las propiedades mecánicas estudiadas son la resistencia a la tensión y la resistencia al impacto.

Las propiedades de los materiales extruidos se obtienen utilizando un reómetro RMS (Rheometrics Mechanical Spectrometer), así como un Viscosímetro Capilar (Instron MCR). Las propiedades viscoelásticas, tales como la viscosidad η y viscosidad compleja η^* , módulo de almacenamiento G' y módulo de pérdida G'' se obtuvieron utilizando un reómetro VE (Rheometrics VE Tester). Las propiedades mecánicas de las muestras que se obtienen por

extrusión se miden en una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron modelo 1125) a temperatura ambiente, y un mínimo de 10 muestras para cada composición, habiéndose reportado los valores promedio.

Entre los resultados más importantes se encontró que primero se hace un estudio reológico de los materiales puros, figuras 1 y 2, obteniéndose datos de referencia para después compararlos con los datos que se obtienen de las mezclas. También realiza un estudio de las propiedades viscoelásticas de los materiales puros, utilizando diferentes reómetros (ver tabla I). En la tabla I se observa que el HDPE es más viscoso y elástico que el LDPE sobre todo el rango de la tasa de corte y frecuencias, notándose que la diferencia es considerable a bajas tasas de deformación y decrece cuando la tasa de corte aumenta.

Tabla I. Propiedades viscoelásticas de componentes puros (LDPE y HDPE), medidos en diferentes reómetros (García, 1986).

Shear Rate (s ⁻¹) Frequency w (rad/s)	Steady Simple Shear Flow (low $\dot{\gamma}$) (Rheometrics Mechanical Spectrometer)		Small-amplitude Oscillatory Shear (Rheometrics Viscoelastic Tester)		Steady Simple Shear Flow (high $\dot{\gamma}$) (ICR)
	η HDPE η LDPE	N_1 HDPE N_1 LDPE	η^* HDPE η^* LDPE	G' HDPE G' LDPE	η HDPE η LDPE
0.1	—	—	6.3	21.1	—
0.25	4.3	9	—	—	—
1	2.8	1.8	3.46	5.3	—
10	1.95	0.85	2.42	2.6	—
100	—	—	1.72	1.95	1.4
1000	—	—	—	—	1.25

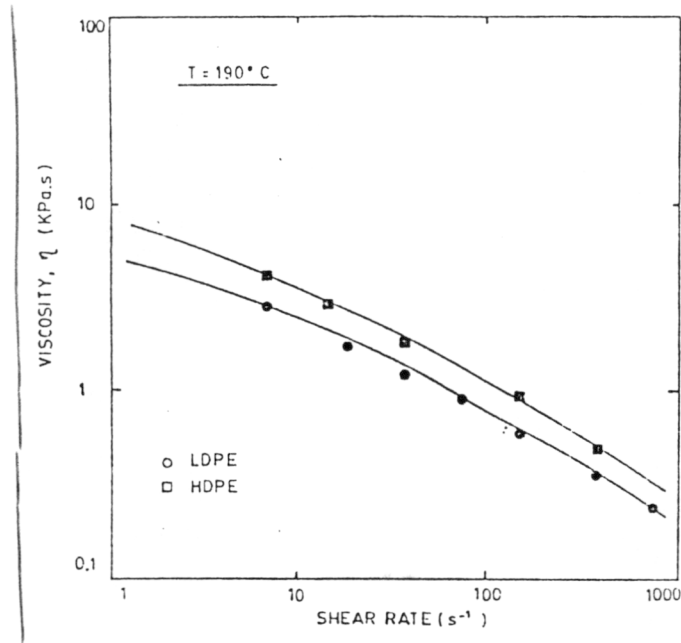


Figura 1. Gráfica de viscosidad contra tasa de corte de los componentes puros (García, et al, 1987)

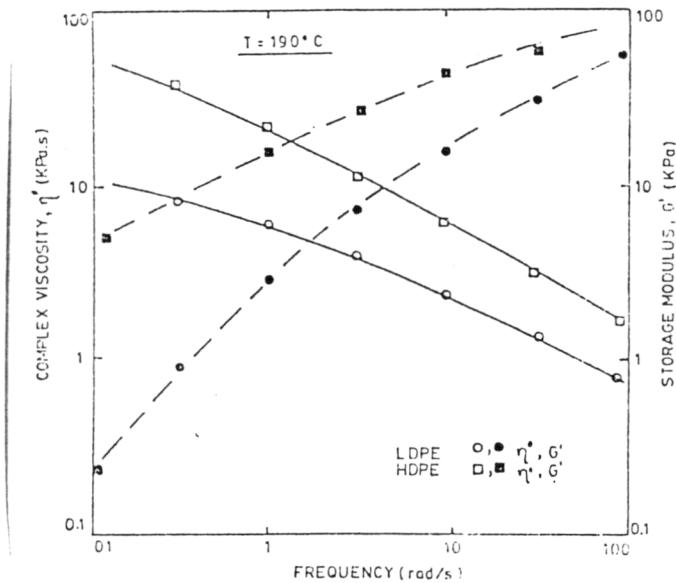


Figura 2. Gráfica de las propiedades dinámicas viscosidad compleja (η^*) y módulo de almacenamiento (G') contra frecuencia, de los componentes puros (García, et al, 1987).

Otro de los resultados más importantes, es que en las mezclas en estado fundido se presentan dos fases, una continua (baja viscosidad y baja elasticidad para el LDPE) y una dispersa (alta viscosidad y alta elasticidad para el HDPE), con lo cual se concluye que la mezcla es incompatible, por ejemplo (figura 3), a bajo contenido de cada componente puro (10 % en peso) las propiedades viscoelásticas decrecen repentinamente cuando son comparadas con los componentes puros de las mezclas, es decir, el comportamiento viscoelástico en la mezcla fundida indica que el sistema es incompatible, ya que el lugar de presentar una mejora en las propiedades, estas son disminuidas en la mezcla.

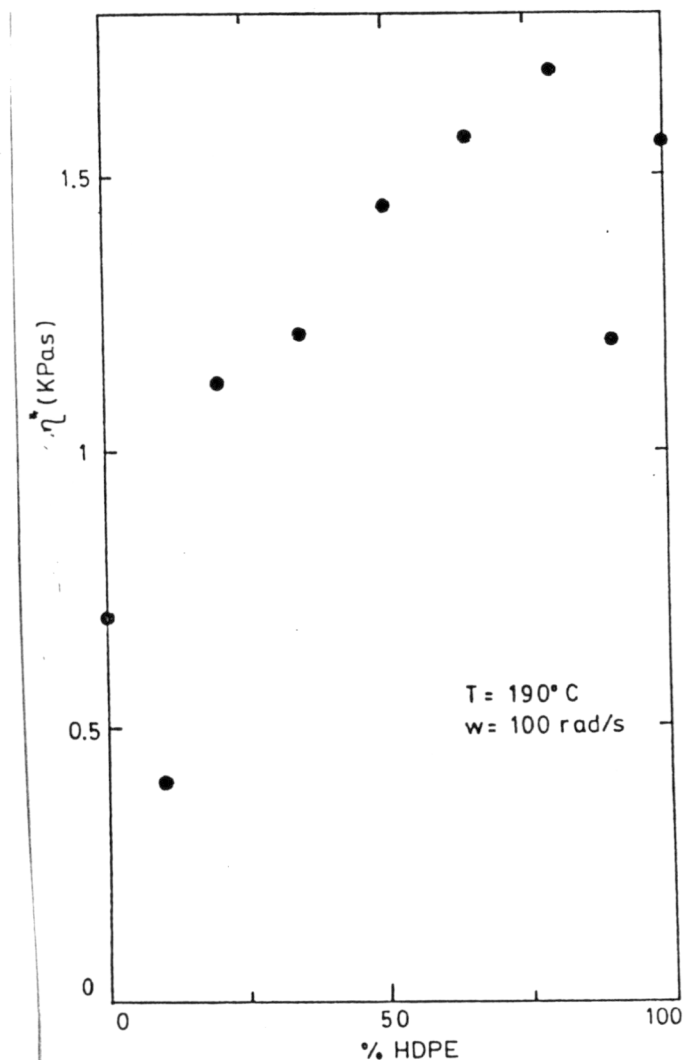


Figura 3. Gráfica de la viscosidad compleja en función del contenido del HDPE (García, et al, 1987).

En cuanto a las propiedades mecánicas, las figuras 4 y 5 muestran los módulos de tensión para diferentes mezclas como función de la composición, velocidad de corte y orientación respecto al flujo. En estas figuras se puede observar que el efecto del mezclado en el módulo de tensión es muy pequeño, es decir, casi permanece igual, para las dos velocidades utilizadas (32 y 64 rpm).

También se observa que a 64 rpm la diferencia de los módulos de tensión se incrementa a bajos contenidos de HDPE (esto con respecto a 32 rpm), estos puntos resultan por la existencia de una orientación aleatoria en la muestra, por lo cual también concluyen que las mezclas son incompatibles por que no existe una orientación definida, es decir, las propiedades mecánicas de las muestras que resultaron de la extrusión muestran una débil dependencia del grado de mezclado. Las muestras tienen propiedades mecánicas muy similares, indicando un estado de orientación aleatoria.

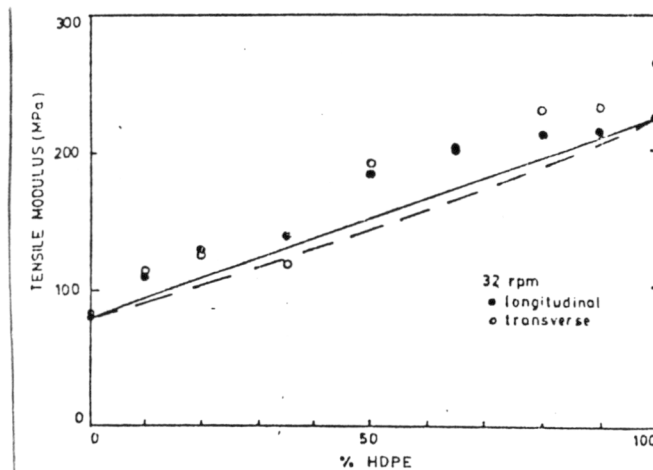


Figura 4. Gráfica del módulo de la mezcla de HDPE/LDPE en función de la composición (32 rpm) (García , et al, 1987).

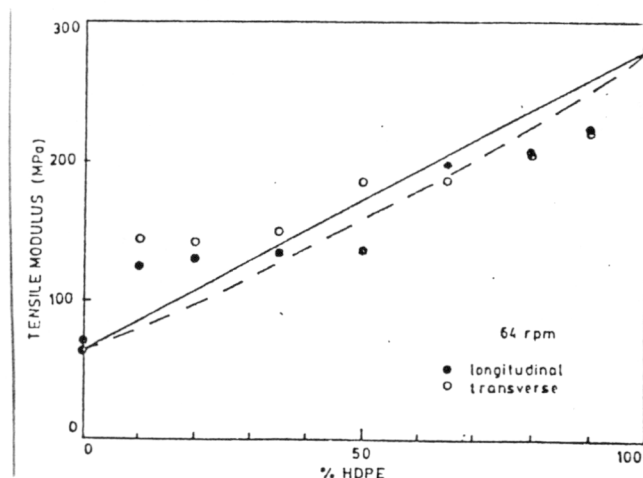


Figura 5. Gráfica del módulo de la mezcla de HDPE/LDPE en función de la composición (64 rpm) (García, et al, 1987).

Así, las propiedades mecánicas muestran la incompatibilidad del sistema binario de polietileno de alta densidad (HDPE) mezclado con polietileno de baja densidad (LDPE). Dichos materiales son los principales elementos para la realización de la presente tesis.

N. Roy Choudhury, et al, 1989, estudian las mezclas de NR/PE a concentraciones de 90/30, 70/30, 50/50 y 30/70; NR/PE/EPDM a concentraciones de 70/30/20; NR/PE/CPE a concentraciones de 50/50/20; de NR/PE/PEm/EPDM a concentraciones de 70/27/3/20 y NR/PE/PEm/CPE a concentraciones de 70/27/3/20. En dichas mezclas se hace un estudio térmico y de rayos-X.

Análisis térmico. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

El comportamiento térmico de las mezclas se lleva a cabo con un analizador térmico Dupont 910, para una serie de composiciones de 70/30 a 30/70 de la mezcla de NR/PE, las muestras son enfriadas a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ hasta $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$; el calentamiento desde 10

°C/min hasta 200 °C. Los resultados más relevantes se muestran en la tabla II y III; dichos resultados son: temperatura de fusión (T_m), porcentaje de cristalinidad (X_c), calor latente de fusión (ΔH) y temperatura de transición vítrea (T_g).

Tabla II. Formulación de las mezclas (tomada parcialmente de Roy, et al, 1989).

	A	B	C	H	J	L	F	Q
NR	90	70	70	50	70	70	70	70
PE	30	30	30	50	30	27	30	30
PEm						3		
EPDM			20					
CPE		20						
ENR							20	
DCP								0.5

Tabla III. propiedades térmicas (tomada parcialmente de Roy, et al, 1989).

MUESTRA DE REFERENCIA	PE	PEm	A	B	C	F	H	J	N
Parámetros									
T_m	110	106	107	107	105	107	108	107	107
ΔH	86	80	24	29	23	27	43	57	25
X_c	30	25	8.4	10	8.3	9.3	15	20	8.8
T_g (-)	120	110	66	65	63	66	66	68	63

De los resultados obtenidos se observa por ejemplo que para el polietileno (que es de baja densidad) la temperatura de fusión (T_m) es detectada en aproximadamente $110\text{ }^\circ\text{C}$, esto puede verse en la figura 6, en donde la T_m se toma en el pico principal, es decir, aproximadamente a $110\text{ }^\circ\text{C}$. Entre las observaciones más importantes es que la temperatura de fusión de las mezclas es independiente de la composición y de la estructura química del hule natural, es decir, en las figuras 6 y 7 se pueden observar algunas T_m 's de varias mezclas, las cuales también se ilustran sus valores correspondientes en la tabla III. Aquí se observa que la T_m varía aproximadamente de 106 a $107\text{ }^\circ\text{C}$ para las diversas mezclas, por lo que se concluye que la T_m es independiente de la composición y estructura química del hule natural (NR).

El área de la fusión endotérmica es calculada y reportada como el calor de mezclado ΔH , para 100% de cristalinidad (X_c) del polietileno y es tomado como 290 J/g (Locke, C. E and Paul, D. R, 1973). Para la mezcla de NR a diferentes concentraciones, en la figura 8 se observó como disminuye el porcentaje de cristalinidad conforme se va agregando el NR. La cristalinidad es afectada en la mezcla por la composición y las condiciones de mezclado tales como la temperatura, presión, peso molecular y dilución.

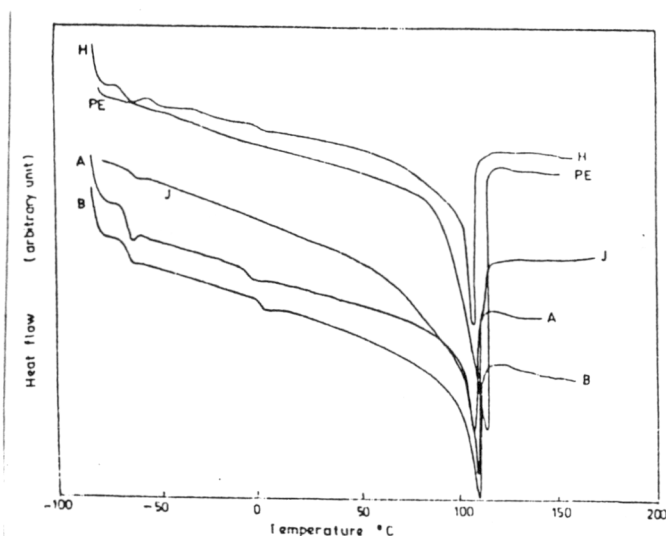


Figura 6. Gráfica de DSC de la mezcla NR/PE, diferentes mezcla y PE (Roy, et al, 1989)

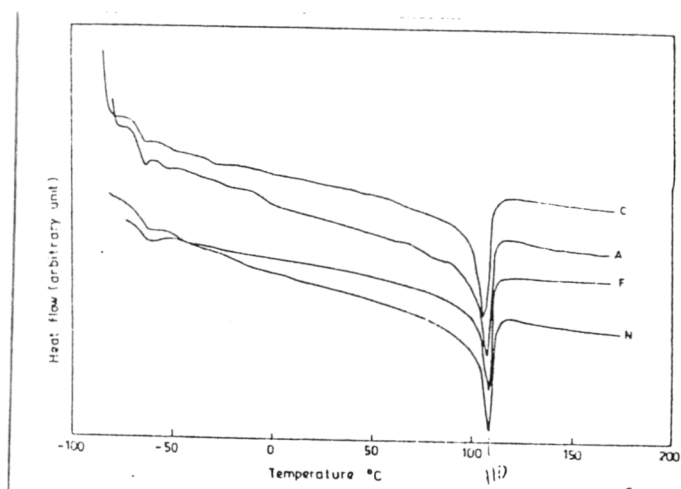


Figura 7. Gráfica de DSC de la mezcla NR/PE con varios niveles de interacción (Roy, et al, 1989).

La temperatura de transición vítrea es también obtenida por DSC (ver tabla III). Los valores de la temperatura de transición vítrea para el polietileno y el NR son $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Cuando el hule natural es mezclado con el polietileno, la temperatura de transición vítrea oscila entre $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-66\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuando la fracción de volúmenes del hule se incrementa, la T_g permanece casi constante, sin embargo, la T_g de la fase del polietileno no puede ser detectada. Puede verse que la T_g de las dos fases de la mezcla no sufre cambio sustancial. Esta observación, unida con el resultado de T_m , la cual permanece más o menos constante cuando se incrementa el contenido de hule natural, confirma que las mezclas de NR/PE son incompatibles, es decir, las mezclas son termodinámicamente inmiscibles.

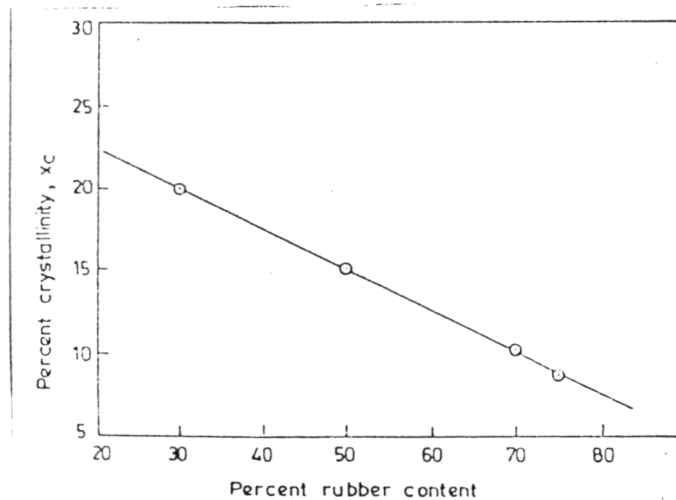


Figura 8. Gráfica que muestra el efecto de la variación del porcentaje de X_c con la adición de NR (Roy, et al, 1989).

Estudio de Rayos-X

A fin de determinar el grado de cristalinidad y de contenido amorfo de las diferentes muestras, usarón el modelo de difracción de rayos-x. Los resultados los registrarón en un difractómetro Philips de rayos-x, donde el intervalo de ángulos es de 5 a 35° (2θ), las muestras estudiadas son del mismo espesor, las operaciones de voltaje y corriente del tubo son mantenidas a 40 Kv y 20 mA respectivamente.

El modelo de difracción de rayos-x de las muestras es separado en dos partes; una cristalina y la otra amorfa. Para valores de hule natural, las áreas bajo las curvas tanto de la parte cristalina y las porciones amorfas se miden en unidades arbitrarias, y el grado de cristalinidad X_c y contenido amorfo X_a de las muestras se obtiene usando las relaciones (Roy, et al, 1989):

$$X_c = \frac{I_c}{I_c + I_a} \quad X_a = \frac{I_a}{I_c + I_a}$$

donde I_c e I_a representa la integral de la intensidad correspondiente a la fase cristalina y a la amorfa, es decir, las áreas bajo las respectivas curvas.

Los resultados más relevantes del estudio de rayos-x se muestran en la tabla IV. Dichos resultados son tomados parcialmente del artículo de N. Roy, 1989.

Tabla IV. Estudio de Rayos-x.

Muestra	Porcentaje de Cristalinidad X_c (%)
PE	39.68
B) NR/PE	17.9
C) NR/EPDM/PE	12.46
D) NR/ENR/PE _m /PE	
Q) NR/PE/dynamic corrin by DCP	15.44
P) NR/PE/dynamic corrin by sulphur	16.52

En la tabla anterior se observa que el grado de cristalinidad del PE es de 39.68%, este valor es más alto que el determinado por DSC (ver tabla III). Los valores de X_c dependen del método de preparación de las muestras y de las técnicas de medición. Otro de los resultados obtenidos es la disminución de la cristalinidad con la adición del NR, esto es debido a la adición de un componente amorfo, el cual emigra dentro de la fase del polietileno puro, reduciendo los dominios de la cristalinidad de la muestra de PE puro. Además, la reducción de los valores de X_c es debida a la adición de EPDM, es decir, se agrega otro componente amorfo, el cual provoca que la cristalinidad se vea aún más reducida. Los

valores de cristalinidad son más bajos en los sistemas en los cuales se utiliza un modificador químico debido a la adición de ENR/PEm.

La revisión de este artículo se debe principalmente a que en dicho estudio se hace un análisis reológico y de rayos-x de mezclas binarias, ternarias y cuaternarias, el cual sirve de ilustración y base, ya que en la investigación de la tesis se realizan básicamente mezclas ternarias, las cuales son también caracterizadas.

A. Escobar y E. Etchechury, 1986 y A. Escobar, 1990, realizan un estudio con el fin de obtener mezclas que puedan servir de base para el reciclado de desechos de polietileno, usando materiales vírgenes. El propósito de esta investigación fue el determinar con base en los polietilenos de alta y baja densidad producidos en México, en qué medida pueden mejorar algunas propiedades mecánicas mediante la formulación de mezclas con los polímeros en estado fundido. En dicho trabajo se hace también un estudio de las condiciones de procesado y composición para obtener mezclas compatibles con propiedades mecánicas aceptables. La propiedad estudiada es la resistencia a la tensión, habiéndose procesado las mezclas a diferentes temperaturas y velocidades de extrusión.

En dicho estudio se presentan los resultados con dos elastómeros como agentes dispersante. en donde se preparan dos compatibilizantes formados por una mezcla de un agente dispersante con HDPE y LDPE. Como agente dispersante se utilizaron NR y EPDM, en donde el compatibilizante de NR se preparó en una porción de 40 % de NR y 30 % de HDPE y LDPE, mientras que para el compatibilizante de EPDM se utilizó 50 % del mismo y 25 % de HDPE y LDPE. Los componentes se mezclaron en un mezclador tipo Banbury.

Para elaborar el compatibilizante de NR el mezclado se llevó a cabo a una temperatura de 150 °C, a una velocidad de mezclado de 85 rpm y con un tiempo de residencia de 4 minutos, mientras que para el EPDM la temperatura de mezclado fue la misma, pero la

velocidad y el tiempo de residencia de 80 rpm y 5 minutos respectivamente.

Una vez que se prepararon los compatibilizantes, se realizan las mezclas de HDPE/LDPE/compatibilizante (NR y EPDM) a diferentes composiciones. Dichas mezclas fueron extruidas utilizando un extrusor de husillo simple (Brabender L = 20 D; D = 19.1 mm) con dos zonas de medición de temperatura en el cañón y una en el dado de salida; las condiciones de temperatura son de 140 y 170 °C y las velocidades de extrusión de 30 y 70 rpm.

Las muestras obtenidas por extrusión se someten a pruebas de resistencia a la tensión utilizando un tensómetro Mansanto, tipo 7-10, a una velocidad de 40 mm/min. De los resultados más relevantes de esta investigación para la mezcla de HDPE/LDPE/compatibilizante (NR ó EPDM) se tiene que a mayor porcentaje de compatibilizante en la mezcla, se obtiene menor resistencia a la tensión, y a mayor porcentaje de HDPE se obtiene mayor resistencia a la tensión. A porcentajes mayores del 29 % de compatibilizante (relaciones HDPE/LDPE 1:1) en mezclas 1:1 el EPDM proporciona mayor resistencia a la tensión, y a porcentajes menores de 24 % el NR es quien proporciona mayor resistencia a la tensión.

Con respecto a la compatibilidad de las mezclas, se concluye que el NR y EPDM tienen un efecto compatibilizante sobre las mezclas de los dos polietilenos. Esto se concluye en base a que las meclas de los dos polietileno no son homogéneas (García Rejón, 1986 y 1987), en donde dichas mezclas poseen propiedades mecánicas pobres, pero con la presencia de un tercer componente, la mezcla se hace aparentemente más homogénea y sus propiedades mejoran notablemente. Esto se puede ver de una comparación de los estudios realizados por García Rejón, 1986 y 1987 y los estudio de A. Escobar, 1990.

1.3 Miscibilidad

Debido a que no existe una teoría generalizada para predecir el comportamiento de mezclas de polímeros, no se cuenta con

modelos que predigan el comportamiento de las propiedades resultantes que tendrán las mezclas, ya que en la mayoría de los estudios realizados en base a mezclas se obtienen una serie de correlaciones empíricas, pero estas correlaciones son muy particulares, las cuales sólo describen y predicen el comportamiento de mezclas específicas, por lo cual no se puede hacer una generalización de las mezclas en general.

Sin embargo, la teoría de Flory-Huggins puede ayudar en principio a estimar qué tan miscible podría resultar una mezcla determinada.

Nuestro punto de partida es la energía de Flory-Huggins para una mezcla de dos especies, la cual se puede generalizar para tres o cuatro especies (Flory, 1953), con grado de polimerización N_A y N_B .

$$\frac{F}{T} = \frac{\phi_A \ln \phi_A}{N_A} + \frac{\phi_B \ln \phi_B}{N_B} + \chi \phi_A \phi_B \quad (3)$$

donde ϕ_A , ϕ_B son las fracciones de volumen, relacionadas de la siguiente manera;

$$\phi_A + \phi_B = 1 \quad (4)$$

Con frecuencia se hace el siguiente cambio (de Gennes, 1979)

$$\phi_A = \phi$$

$$\phi_B = 1 - \phi$$

Los dos primeros términos del lado derecho de la ecuación (3) representan una estimación de la entropía por colocar dos cadenas de polímero A y B en una malla (lattice). Sorprendentemente, esto no es diferente de lo que uno tendría con dos gases de concentraciones ϕ_A / N_A y ϕ_B / N_B . El tercer término es el de interacción y es positivo.

Retornando a la ecuación (3) y escribiendo $\Delta F/\Delta \phi = 0$, $\phi_A = \phi$, $\phi_B = 1 - \phi$, $N_A = N_B = N$, tenemos;

$$1/N \text{Ln} [\phi / (1 - \phi) + X (1 - \phi_A)] = 0$$

por lo que;

$$X = - 1 \text{Ln} [\phi / (1 - \phi)] / N (1 - 2)$$

que no es otra cosa que el parámetro de Flory.

Una vez definido el parámetro de Flory en terminos de cantidades conocidas, se está en posibilidades de poder hacer una gráfica de NX contra la fracción volumen ϕ , dicha gráfica es la siguiente.

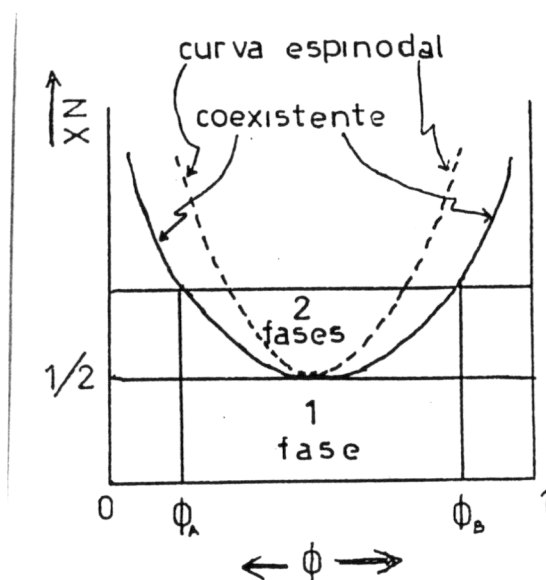


Figura 9. Gráfica del parámetro de Flory y grado de polimerización en función de la composición (de Gennes, 1973).

De la gráfica anterior se observa que se tendrá una mezcla homogénea (no presenta separación de fases) cuando el valor NX se encuentre entre 0 y $1/2$; para valores más grandes que $1/2$, se tendrá separación de fases, lo cual conduce a tener una mezcla de mala calidad ya que los materiales no presentan una fase homogénea. Cuantificando las cantidades de N y ϕ se puede hacer una gráfica como la presentada anteriormente, de la cual se podrá obtener información en cuanto a la miscibilidad de los componentes de la mezcla a realizar.

Como podrá observarse, esta teoría sólo da información de la miscibilidad de los componentes, pero no da información en cuanto al comportamiento que tendrán las propiedades resultantes de una mezcla.

Otra de las formas de evaluar la miscibilidad entre polímeros, es por medio de la energía libre de Gibbs (D. R. Paul and S. Newman, 1978), la cual proporciona información en las mezclas de polímeros. Dicha ecuación es;

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T \Delta S_m \quad (5)$$

donde, aplicada a polímeros se tiene;

$$\Delta S_m = -R (N_1 \ln \phi_1 + N_2 \ln \phi_2) \quad (6)$$

y

$$\Delta H_m = R T N_1 X \phi_2 \quad (7)$$

Termodinámicamente hablando, se tiene que dos polímeros son miscibles si ΔG es menor que cero, esto quiere decir, que para que ΔG sea menor que cero, debe ocurrir que $T \Delta S_m$ sea necesariamente mayor que ΔH_m (en valor absoluto). En donde si se tienen polímeros de peso molecular alto, entonces implica que N es pequeño, por lo cual ΔS_m será pequeño.

Analizando la ecuación (5) se tendrán mezclas homogéneas bajo las siguientes condiciones.

1. $\Delta H_m < 0$
2. ΔH_m sea pequeño, entonces $\Delta H_m < T \Delta S_m$
3. ΔS_m sea grande, implica peso molecular bajo.

Entonces, desde el punto de vista pragmático, un sistema de polímeros se considera compatible cuando las propiedades mecánicas de interés en la aplicación dada, se beneficia con el mezclado entre polímeros. Esto puede obtenerse por medio de compatibilidad térmica, o bien con un sistema miscible en el cual exista un mínimo de adhesión interfacial entre componentes.

A continuación se presentan los conceptos de miscibilidad y compatibilidad.

1.4. Concepto de Miscibilidad y Compatibilidad.

Bajo ciertas condiciones termodinámicas puede o no existir miscibilidad, entre dos o más polímeros. Si el sistema es miscible, se tendrá una fase homogénea. Sólo unas cuantas mezclas de polímeros son realmente miscibles a escala molecular, por ejemplo (A. Rudin, 1982);

óxido de polifenileno (PPO) con poliestireno (PS)
 cloruro de polivinil (PVC) con la polilactona (PCL)

Los sistemas miscibles presentan una temperatura de transición vítrea (T_g) cuyo valor oscila entre las T_g 's de los componentes puros. Es de esperarse que estas mezclas se asemejen y comporten como si estuvieran compuestas de un sólo polímero.

En cuanto a las condiciones de miscibilidad, si se tiene una entalpía de mezclado negativa, entonces se obtiene una mezcla miscible aún con polímeros de alto peso molecular. Con polímeros

de muy bajo peso molecular se puede obtener sistemas miscibles aún teniendo entalpías de mezclado positivas.

Normalmente los físicos y también los químicos defienden este término desde un punto de vista microscópico en relación con las fases. Los ingenieros manejan el término desde un punto de vista de la separación de fases y relacionando este fenómeno con las propiedades finales de los materiales poliméricos. Para el investigador interesado en propiedades macroscópicas, útiles en problemas industriales, una mezcla de polímeros miscibles es aquella que sigue el criterio de la T_g , antes mencionada.

Compatibilidad se entenderá como un término general que normalmente implica miscibilidad. Se considera que los compuestos son compatibles si no afecta adversamente las propiedades individuales de cada uno de los componentes puros y a la vez se obtiene mejora en alguna propiedad específica. Un sistema inmiscible puede ser o no compatible.

Miscibilidad es un concepto termodinámico y las sustancias o mezclas serán miscibles o no dependiendo precisamente de sus condiciones termodinámicas. Por otro lado, un sistema compatible es comercialmente atractivo y generalmente homogéneo a simple vista y que cumple con las especificaciones requeridas.

Concluyendo esta parte, compatibilidad se refiere a un enfoque tanto termodinámico como ingenieril, mientras que miscibilidad se refiere al aspecto físico. Desafortunadamente la mayoría de los autores usan ambos términos como sinónimos.

Compatibilizante.

Un compatibilizante para una mezcla binaria, es un tercer elemento que se agrega en proporciones relativamente pequeñas para fomentar la adhesión entre fases totalmente inmiscibles.

Compatibilizante físico.

El agente en cuestión es un copolímero en bloque o injertado, cuyos componentes están formados, precisamente por cadenas

iguales o similares a los componentes que se desea mezclar, por ejemplo, en la presente investigación se usarán EPDM y PBR , los cuales presentan cadenas similares al HDPE y LDPE.

CAPITULO 2

EXPERIMENTACION.

Una vez que se ha definido nuestro objetivo particular y objetivos generales, nos vemos en la necesidad de definir un diseño de experimentos para poder alcanzar las metas propuestas.

Este diseño de experimentos se hace con el fin de ahorrar tiempo en la experimentación, es decir, con el fin de conocer el comportamiento general de las mezclas en el menor tiempo posible. Se hizo un diseño de experimentos en base a las principales variables del sistema, es decir, en función de la composición, la temperatura y la velocidad de extrusión. Con el diseño de experimentos no sólo se consiguió minimizar el tiempo de experimentación, sino también permitió el ahorro de materiales, energía y el uso de equipo.

Este diseño de experimentos permitió la definición del comportamiento global del sistema con un número mínimo de experimentos.

A continuación se presenta un diagrama en bloques, en el cual se expresa a grosso modo cómo se atacó el problema; posteriormente se explica de manera más detallada cada paso.

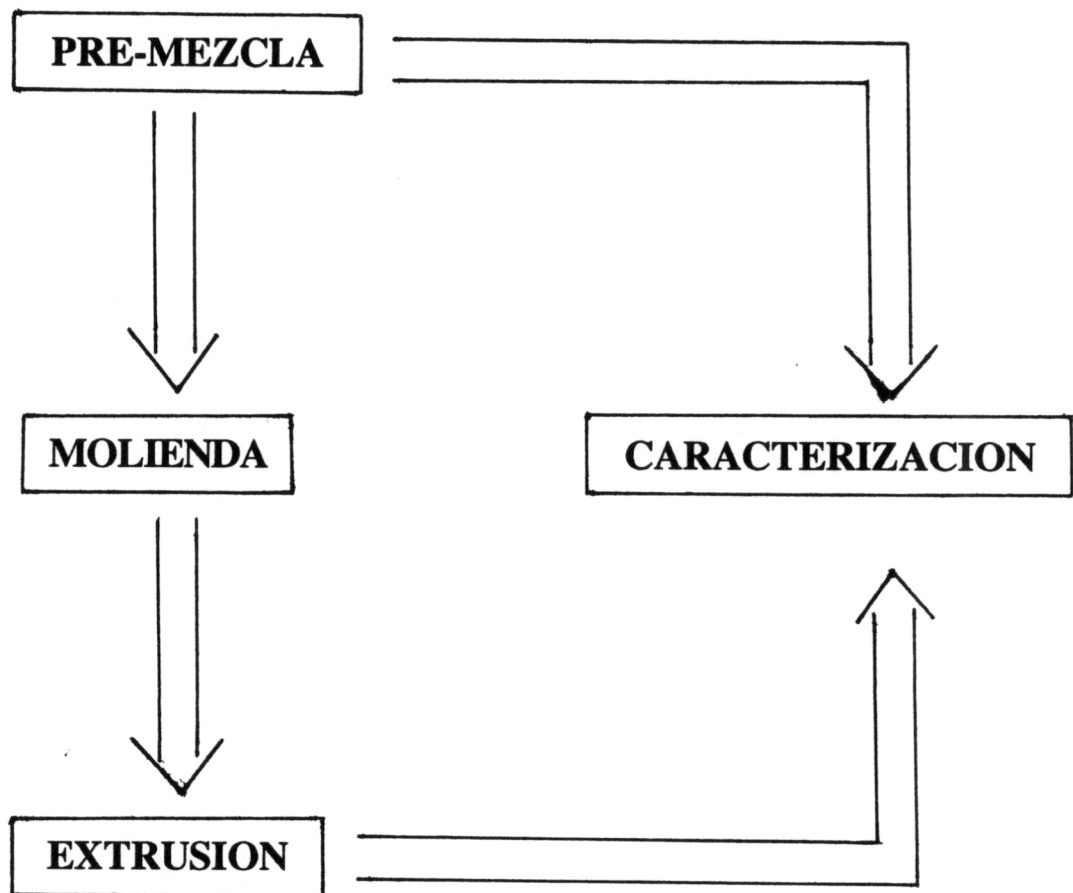


Figura 2.1. Diagrama del Diseño Experimental.

2.1) PRE-MEZCLA.

Inicialmente se pretendía extruir directamente los polietilenos con cada uno de los elastómeros, pero debido a que el EPDM y el PBR presentaron problemas al ser procesados, fué necesario realizar un mezclado previo (Pre-mezcla) a la extrusión.

El problema fundamental fué que el tiempo de residencia en el cañón del extrusor no era suficiente para poder obtener una mezcla homogénea de los componentes. Esto se debió a que el tamaño de partícula del elastómero no era lo suficientemente pequeño como para poderse mezclar con los polietilenos (en polvo).

El EPDM y el PBR son materiales que por sus características como elastómero, hacen difícil la molienda, ya que al intentar molerlos, la malla del molino se tapa, debido a que inmediatamente después que las cuchillas los cortan, se vuelven a aglomerar, haciendo casi imposible el paso de los mismos a través de la malla.

Para resolver el problema anterior, se procede a realizar un mezclado previo a la extrusión, donde el EPDM ó PBR se incorporan a la mezcla de polietilenos. A esta mezcla de EPDM ó PBR con los polietilenos, se le nombro PRE-MEZCLA.

Puesto que la pre-mezcla es solamente un recurso para obtener una mezcla homogénea en la extrusión, se pretendió elaborar las pre-mezclas con la mayor cantidad de elastómero posible, estando siempre condicionados a obtener una mezcla que pudiera ser pulverizada en el pulverizador. La composición de la mezcla fué determinada por el condicionamiento anterior.

Primeramente se preparó la pre-mezcla de los dos polietilenos con el EPDM, en una proporción de 10 % de EPDM y 45 % de HDPE y LDPE, mezclándose estas pre-mezclas con los polietilenos en un mezclador interno tipo Banbury (Brabender W50EH). La carga total al mezclador fue de 40 gramos como máximo, debido a la capacidad del

equipo. Las condiciones de operación del mezclador fueron de 180 °C y 40 rpm, pero variando el tiempo de residencia. Debido a que no se contó con información de mezclas ternarias de polietilenos de alta y baja densidad con elastómero, se hicieron varias pruebas a diferentes tiempos; los tiempos fueron de 2, 5, 8, 10 y 15 minutos. Cabe hacer notar que a tiempos largos (10 y 15 minutos) las pre-mezclas no se degradan.

Una vez que se recuperan las mezclas del mezclador interno, se aplanan para formar placas y se dejan enfriar hasta obtener un producto rígido. Una parte se corta en pedazos pequeños con el fin de poder ser introducidos en el pulverizador y otra parte (muy pequeña) se deja en forma de placa para ser caracterizada.

De las pre-mezclas obtenidas (45 % de HDPE, 45 % de LDPE y 10 % de EPDM) se hizo una caracterización reológica en un reómetro rotacional Bohlin Vor, en estado fundido, haciendo uso de la geometría de cono y plato. Como resultado de dicha caracterización se obtuvo la viscosidad en función de la rapidez de corte a 180 °C. Las muestras analizadas fueron las pre-mezclas a 2 y 15 minutos, observándose que la viscosidad en ambos casos es muy similar; por ejemplo a una tasa de corte de 5.847 1/s la viscosidad para ambas pre-mezclas es de 8.674 y 8.300 Pa, respectivamente. Esto nos indica que a cualquier tiempo en el intervalo de 2 a 15 minutos pueden realizarse nuestras pre-mezclas.

Debido a que es muy aventurado tomar cualquier tiempo, nos vimos en la necesidad de analizar los torques de mezclado, los cuales son obtenidos paralelamente al mezclado en Banbury. En dichos torque de mezclado se observo que éste es uniforme (estable) a partir de los 6 minutos, lo cual es indicativo que para tiempos iguales o mayores de 6 minutos, se obtiene un buen mezclado, por lo cual se tomó como tiempo de mezclado para las pre-mezclas 6.5 minutos.

2.2) MOLIENDA.

Como primer paso a desarrollar, se procede a la molienda de los materiales, en este paso primeramente se pulverizan los polietilenos de alta y baja densidad (HDPE y LDPE) en un pulverizador rotatorio tipo Willy (Brabender), hasta obtener un polvo con un tamaño de partícula lo suficientemente pequeño para pasar una malla de 1 mm. Esto se hace con la finalidad de poder facilitar el mezclado en el extrusor y obtener un mezclado tan homogéneo como sea posible.

2.3) EXTRUSION.

2.3.1) Variables

Con el fin de obtener un modelo confiable y poder predecir el comportamiento de las propiedades en las mezclas, definimos primero nuestras variables.

i) Temperatura de Extrusión.

La temperatura de extrusión se eligió a 180 °C, debido a que los polietilenos y elastómeros mezclados en Banbury a esta temperatura no se degradan y se mezclan perfectamente, en base a los estudios realizados por Escobar, 1990.

ii) Velocidad de Extrusión (Ve).

Para la velocidad de extrusión, se eligió una velocidad de 25 rpm, ya que a velocidades mayores, la recepción de muestras del extrusor se vuelve muy difícil.

iii) Composición.

Para la composición se fijaron intervalos de operación. Esto se logró haciendo uso de diagramas ternarios de composición. En este diagrama se fijaron límites superior e inferior sólo para los

elastómeros, ya que no se puede manejar toda la gama de composiciones del elastómero, ya que en estudios previos (Scott , Escobar) se encontró que en mezclas similares ternarias, la mejora de propiedades mecánicas se observa en el intervalo de 5 a 10 % de elastómero. La figura 2.2 ilustra lo anterior.

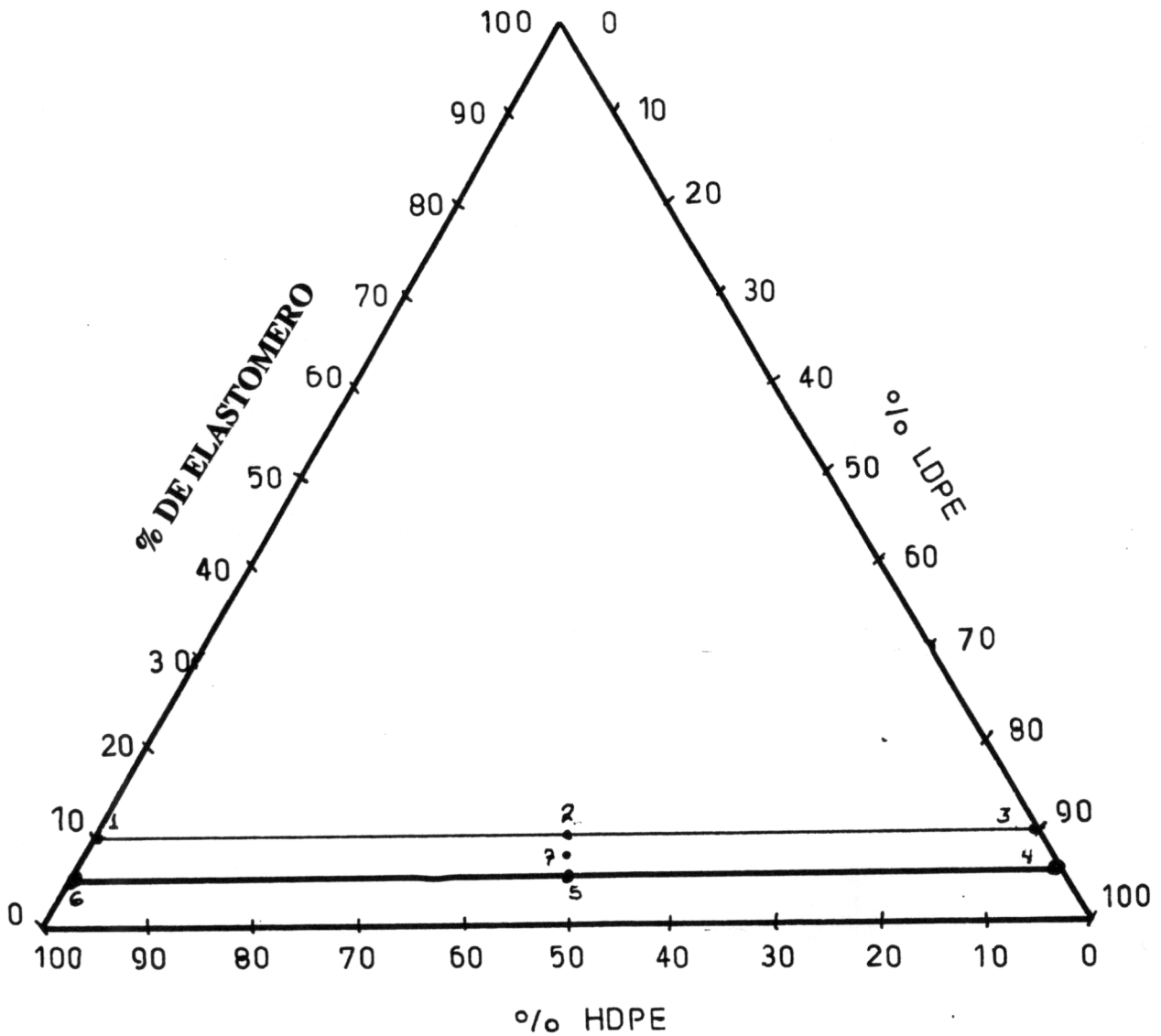


Figura 2.2. Diagrama Ternario para Mezclas de HDPE / LDPE / ELASTOMERO

En base a estudios realizados por especialistas en el diseño de experimentos de mezclas (Sexena, 1977 y McLean, 1966), se definen primeramente varios puntos del diagrama, los cuales corresponden a diferentes composiciones. Estos puntos se localizan dentro de los límites y tienen la función de abarcar toda la gama de composiciones de las mezclas. Se define que el número de puntos necesarios para el diseño de experimentos de mezclas de tres componentes es de siete, como se ilustra en la figura 2.2.

Pero debido a que se realiza un estudio completo, tanto en los límites, como en la base (mezclas binarias de HDPE /LDPE) de dicho diagrama, así como en la línea perpendicular (mezclas 1:1 variando el % de elastómero) proponemos los siguientes puntos, como se ilustra en la figura 2.3.

Proponemos los puntos anteriores debido a que para una caracterización completa, ésta debe consistir en un número mayor de puntos en los límites, así como en la base del diagrama y la línea perpendicular a la base; de ahí que en dichos límites, base y línea perpendicular se tomara un número mayor a los propuestos por Sexena y McLean. Esto es también por la necesidad de contar con la caracterización de las mezclas de los dos polietilenos para comparar en qué medida se ven afectadas las propiedades cuando se les agrega un tercer componente, en este caso, elastómero (EPDM ó PBR). Por otra parte es de suma importancia contar con mezclas 1:1 variando el contenido de elastómero, ya que de aquí se podrá observar en qué medida se ven afectadas las propiedades, pero ahora variando el contenido de elastómero.

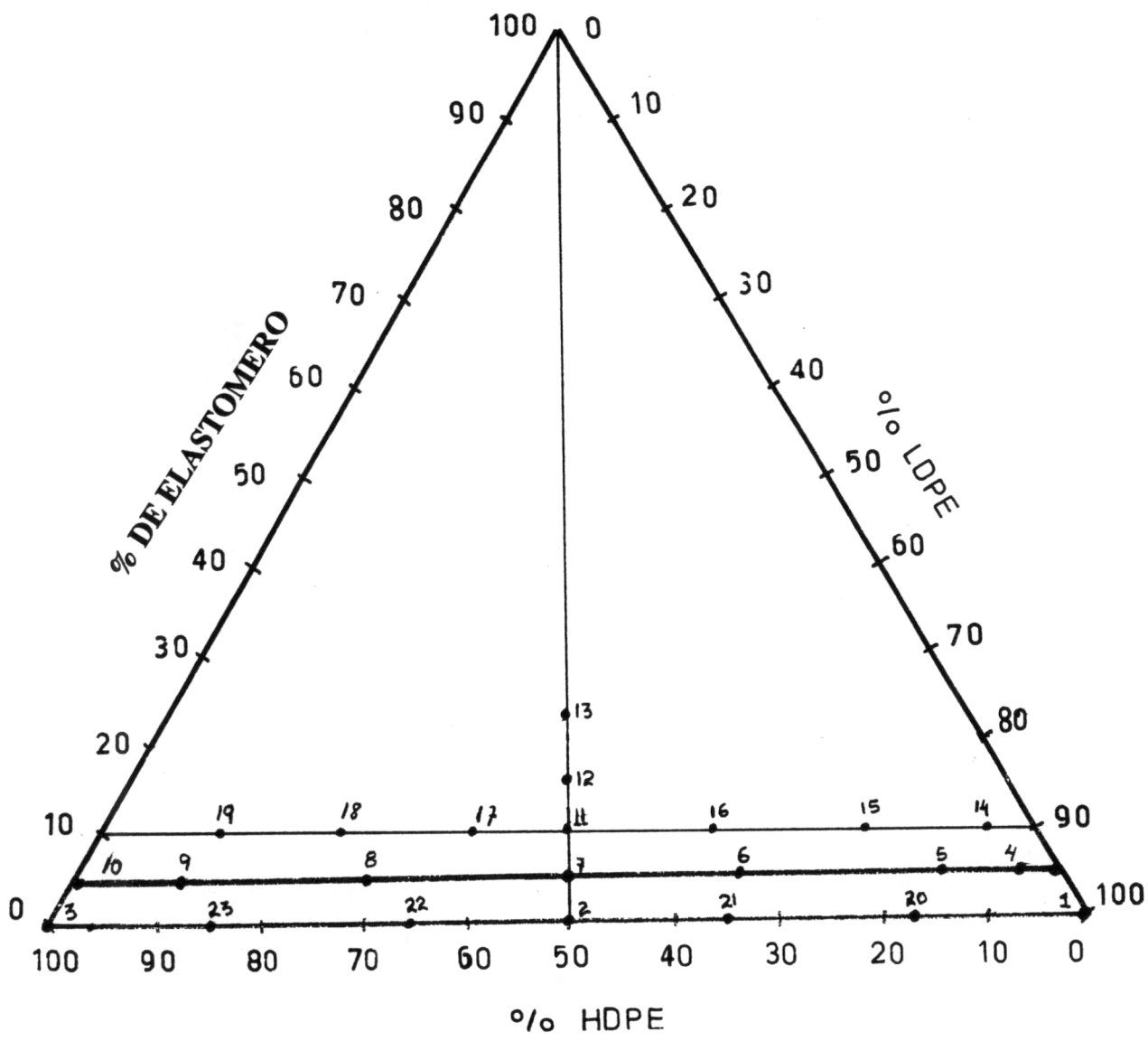


Figura 2.3. Diagrama para mezclas ternarias de HDPE / LDPE / Elastómero (EPDM ó PBR).

A continuación se presenta la composición para cada punto.

**Tabla de concentraciones para mezclas ternarias de
HDPE/LDPE/ELASTOMERO**

Punto Número	% HDPE	% LDPE	% Elastómero
1	0.0	100.0	0.0
2	50.0	50.0	0.0
3	100.0	0.0	0.0
4	2.5	92.5	5.0
5	10.0	85.0	5.0
6	30.0	65.0	5.0
7	47.5	47.5	5.0
8	65.0	30.0	5.0
9	85.0	10.0	5.0
10	92.5	2.5	5.0
11	45.0	45.0	10.0
12	41.25	41.25	17.5
13	38.0	38.0	24.0
14	5.0	85.0	10.0
15	17.5	72.5	10.0
16	32.5	57.5	10.0
17	57.5	32.5	10.0
18	72.5	17.5	10.0
19	85.0	5.0	10.0
20	17.5	82.5	0.0
21	35.0	65.0	0.0
22	65.0	35.0	0.0
23	82.5	17.5	0.0

Antes de introducir los tres componentes al extrusor, se mezclan los materiales pulverizados con el propósito de proporcionar una mejor homogeneidad en el extrusor. La carga del extrusor fue en todo momento de 150 gramos, cantidad suficiente para obtener las probetas y efectuar las pruebas mecánicas.

iv) Condiciones de Extrusión.

Las composiciones anteriores fueron extruidas utilizando un extrusor de husillo simple Brabender, con $D = 19.1 \text{ mm}$, $L = 20D$, con dos zonas de medición de temperatura en el cañón y control de temperatura en el dado. Se utilizó un tornillo con una razón de compresión de 3:1. El material se alimentó pulverizado; las condiciones de extrusión fueron de $180 \text{ }^\circ\text{C}$ en el cañón y dado y la velocidad de extrusión de 25 rpm. El material extruido se obtuvo en forma de láminas delgadas de aproximadamente 0.7 mm de espesor, de 10 a 12 cm de ancho y de 1.80 a 2.0 m de largo.

El extrusor cuenta con control de temperatura del proceso y también con indicación del torque, registrándose este por medio de gráficas. El registro del torque de extrusión es un factor reológico importante que está relacionado con la procesabilidad, es decir, con el trabajo desarrollado por el husillo al transportar el material en estado fundido dentro del cañón del extrusor.

2.4) Caracterización.

Después de la extrusión de las mezclas, se cortaron las probetas en forma de hueso con el auxilio de una prensa hidráulica de laboratorio. Para la medición de los espesores de las probetas en la región a experimentar (región rectangular) se utilizó un micrómetro Mitutoyo (Modelo 7004) acoplado a un microprocesador digital (Modelo DP-3DX). En dicho micrómetro se realizan 24 mediciones en toda la sección rectangular y de esta forma se obtiene una estadística de valores. El procesador nos da el espesor promedio con una resolución de un diezmilésimo de milímetro de longitud (distancia a que se encuentran separadas las mordazas del equipo de pruebas mecánicas al iniciar la evaluación esfuerzo-deformación). Las probetas tienen un ancho de 7 mm.

Las probetas se sometieron a pruebas de esfuerzo-deformación en una máquina universal de pruebas mecánicas (INSTRON 4502), con una celda de carga de 10 kN; la máquina cuenta con un software el cual optimiza la evaluación de las propiedades esfuerzo-deformación. El monitor del sistema de cómputo, simultáneamente durante la evaluación de los materiales muestra las graficas de carga en función del desplazamiento. Los datos archivados pueden subsecuentemente ser procesados con una computadora para obtener las graficas esfuerzo-deformación. De dichas pruebas se determinaron las curvas esfuerzo-deformación, de las cuales se determinan las propiedades mecánicas, elongación en el punto de ruptura, puntos de cedencia, módulos de Young, etc. Esta prueba se aplica a todo el intervalo de composiciones de las mezclas, efectuándose a temperatura ambiente (25 °C), con una previa calibración y preparación del equipo, donde la separación entre las mordazas fue de 22 mm. Las probetas fueron ensayadas a una velocidad de 20 mm/min.

El total de probetas analizadas es en promedio de 8 probetas para cada mezcla, ya que este número proporciona una estadística confiable para el análisis de las propiedades esfuerzo-deformación en este tipo de equipos de pruebas mecánicas.

Las mezclas de HDPE / LDPE / PBR son sometidas a dispersión de rayos-X, con intervalo angular de 5 a 40 ° (2θ), con el fin de determinar el porcentaje de cristalinidad. Para dichas pruebas se utilizó un goniómetro horizontal PW1380 de rayos-x; se manejó un voltaje de 40 Kv y una corriente de 20 mA; el goniómetro se alimentó por medio de un generador Philips 1140/60 de alta estabilidad. La estabilidad se determinó con un detector proporcional que tiene un monocromador de longitud de onda; este detector se acopló a un sistema integrador-discriminador Rate-meter, para limpiar la señal de radiación espurea, blanca y de fondo (Black-ground).

CAPITULO 3

MEZCLAS DE HDPE/LDPE/PBR

En este capítulo se presentan los resultados y discusión de la caracterización en todo el intervalo de composición para las mezclas realizadas, comenzando con las propiedades de los componentes puros (por separado), para después analizar las mezclas binarias de los dos polietilenos. Estas mezclas serán el parámetro de comparación con las mezclas ternarias. Posteriormente se analizarán las mezclas ternarias de los dos polietilenos, combinados con PBR (pibuta-dieno), las cuales se agrupan en mezcla 1:1 (misma proporción de HDPE y LDPE) variando el contenido de PBR; mezclas ternarias de HDPE / LDPE / PBR, pero a contenidos fijos de PBR, es decir, mezclas sin elastómero (0 % de PBR) y mezclas con 5 y 10 % de PBR constantes en todo el intervalo de composiciones.

Posteriormente, se analizarán las propiedades de las mezclas que contienen el terpolímero etileno-propileno-dieno (EPDM), las cuales se agrupan en mezclas 1:1, variando el contenido de EPDM y en mezclas ternarias de HDPE / LDPE / EPDM a contenidos fijos de elastómero, es decir, mezclas sin elastómero y mezclas con 5 y 10 % de contenido de EPDM constante.

3.1) Materiales Puros.

En esta primera parte se analizan las propiedades mecánicas de los polietilenos de alta y baja densidad por separado, es decir, los dos polietilenos son extruídos primeramente bajo las condiciones expresadas en el capítulo anterior. Esto se hace con la finalidad de poder determinar las propiedades de cada uno de los componenets puros.

De la extrusión se obtienen directamente los torques de extrusión para cada uno de los polietilenos. Dichos torques son indicativos de la procesabilidad. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla del torque de extrusión para los polietilenos de alta y baja densidad.

Polietileno	Torque (Nm)
HDPE	6.0 ± 0.3
LDPE	4.75 ± 0.5

De la tabla anterior se observa claramente que el polietileno de alta densidad presenta un torque de extrusión mayor al del polietileno de baja densidad, puesto que el HDPE tiene una mayor viscosidad y por lo tanto es mayor el trabajo realizado por el tornillo del extrusor para procesar las muestra de HDPE, por lo cual, es menos procesable que el polietileno de baja densidad (LDPE).

Una vez que se extruyen los polietilenos, de las placas que se obtienen se acondicionan las probetas tipo hueso, las cuales son sometidas a pruebas de deformación unidireccional para poder determinar sus propiedades mecánicas. De estas pruebas se obtienen las curvas de esfuerzo-deformación para los dos polietilenos; dichas curvas se pueden observar en la gráfica de la figura 3.1. En la figura 3.1 se

observa claramente que el HDPE presenta elongaciones mucho menores que el LDPE, así como esfuerzos mucho mayores. En las pruebas de tensión se observó que el LDPE en todas las pruebas (8 probetas) presenta formación de cuello y se rompieron a grandes deformaciones mientras que en el HDPE las probetas se rompieron a pequeñas deformaciones y no presentan formación de cuello.

De la figura 3.1 se obtiene el porcentaje de elongación ($\% \epsilon$) en el punto de ruptura, así como el esfuerzo máximo (σ máximo), esfuerzo a la ruptura (σ ruptura), esfuerzo a la cedencia (σ cedencia, al 2 %), módulo de young (E) y la Energía (G) necesaria para romper las probetas, la cual puede ser asociada con la resistencia al impacto. Estos resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3.1 propiedades mecánicas para los polietilenos de alta y baja densidad.

PROPIEDAD	HDPE	LDPE
$\% \epsilon$	17.60 ± 1.68	472.1 ± 96.7
σ ruptura (MPa)	29.71 ± 1.22	9.03 ± 0.23
σ máximo (MPa)	29.71 ± 1.22	9.47 ± 0.59
σ cedencia (MPa)	26.49 ± 1.46	5.28 ± 0.29
E (MPa)	589.43 ± 45.43	111.0 ± 12.82
G (J)	0.29 ± 0.12	2.64 ± 0.66

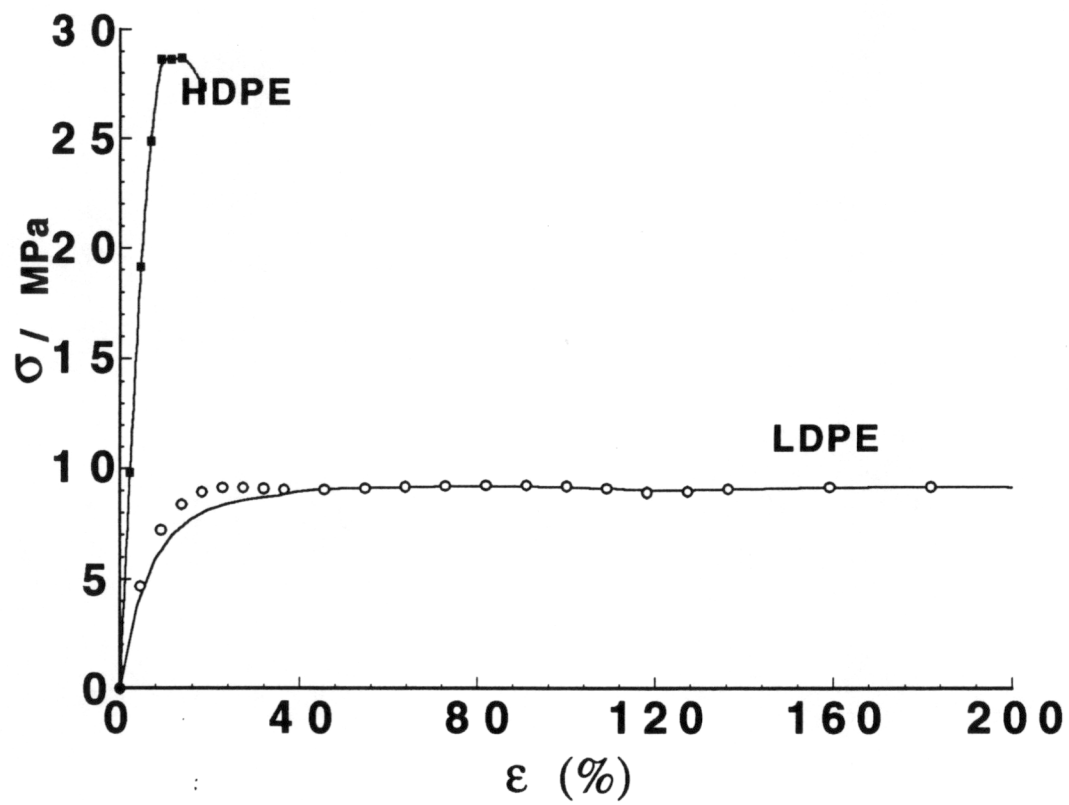


Figura 3.1. Curva de esfuerzo-deformación para el HDPE y LDPE.

En la tabla anterior se presentan las propiedades mecánicas de los dos polietilenos con sus respectivas incertidumbres; estas propiedades son el punto de partida para las mezclas, ya que en base a los resultados obtenidos se podrá realizar una comparación de éstos con los resultados obtenidos en las mezclas, tanto binarias como ternarias. De la tabla anterior se puede observar claramente cómo los dos polietilenos son completamente diferentes en cuanto a propiedades mecánicas, ya que mientras el HDPE presenta elongaciones pequeñas (del orden de 17.9 %) el LDPE presenta elongaciones bastante grandes (del orden de 470 %), el HDPE es un material muy rígido pero tiene muy poca resistencia al impacto (esto es estimado por el área bajo la curva de la gráfica de esfuerzo-deformación, la cual corresponde a la energía (G) necesaria para poder romper la muestra), así como su módulo de young que es muy alto; mientras que el LDPE presenta poca rigidez pero una resistencia al impacto muy alta, así como sus elongaciones, pero su módulo de young y esfuerzo a la cedencia son muy bajos comparados con los del HDPE.

Como podrá observarse las propiedades mecánicas seleccionadas para el estudio de los polietilenos son completamente diferentes. La variación de dichas propiedades es debido principalmente a que un polietileno está constituido por cadenas lineales y el otro tiene cadenas ramificadas.

Una vez que los polietilenos han sido sometidos a pruebas de deformación unidireccional estas son sometidas a dispersión de rayos-X, con el fin de determinar el porcentaje de cristalinidad. De dichas pruebas se obtienen los espectros que se muestran en la figura 3.2.

De los espectros de la figura 3.2 se determinan las áreas bajo las curvas, separando la parte amorfa y la parte cristalina, para de acuerdo a la relación $X_c = I_c / I_c + I_a$ (donde I_c e I_a , representan las áreas bajo las curvas de la parte cristalina y amorfa respectivamente) determinar el porcentaje de cristalinidad para cada uno de los

polietilenos, obteniéndose los resultados que se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla del % de cristalinidad (X_c) para los polietilenos de alta y baja densidad.

Polietileno	% X_c
HDPE	81.7
LDPE	51.9

de donde X_c representa el porcentaje de cristalinidad

Este estudio se realizó con la finalidad de poder contar con sus características (propiedades), principalmente para poder cuantificar en qué medida dichas características se ven afectadas al realizar mezclas de estos materiales, primero en mezclas binarias (HDPE / LDPE) y después en mezclas ternarias (HDPE /LDPE / ELASTOMERO).

Figura 3.2. Gráfica de los espectros de rayos-X para el HDPE y LDPE

3.2 MEZCLAS BINARIAS

Una vez realizada la caracterización de las propiedades mecánicas de los componentes puros por separado, se procede a realizar mezclas binarias de estos dos polietilenos (mezclas sin elastómero). Para esta parte se realizan 5 mezclas, abarcando todo el intervalo de composiciones, en dicho intervalo se incluyen los polietilenos puros, para tener un total de 7 extrusiones. Las composiciones de esta mezclas pueden verse en la tabla 3.1, proporcionada en el capítulo anterior.

Las condiciones de extrusión son las descritas en la parte experimental. De la extrusión de estas muestras se obtienen directamente los torques para cada una de las muestras. De los torque se hace una gráfica de los mismos en función del contenido del polietileno de alta densidad, como podrá observarse el la gráfica de la figura 3.3.

En la gráfica de la figura 3.3 se puede observar claramente que los torques de extrusión disminuyen ligeramente a medida que se va aumentando el contenido de HDPE, hasta un contenido de aproximadamente del 45 %, para a partir de este valor aumentar drásticamente llegando a alcanzar una valor máximo en 80 % de HDPE y después baja abruptamente hasta alcanzar el valor del torque del HDPE. Este tipo de comportamiento es algo complejo de explicar, ya que a bajos contenidos de HDPE el torque se ve disminuido y a medida que se aumenta el contenido de HDPE el torque se ve incrementado fuertemente. Asociando este comportamiento con la viscosidad, se observa que para bajos contenidos de HDPE la viscosidad de las muestras tiende a estar por debajo de la viscosidad del LDPE, lo cual se podría interpretar como que al menos para esta mezclas, el trabajo realizado por el tornillo se ve ligeramente disminuido, con lo cual se presenta una mejora en la procesabilidad. En cambio, cuando los contenidos de HDPE aumentan, la viscosidad se incrementa fuertemente, siendo esta viscosidad indicativa de que la muestra es menos procesable que los dos polietilenos por separado. Esto puede ser

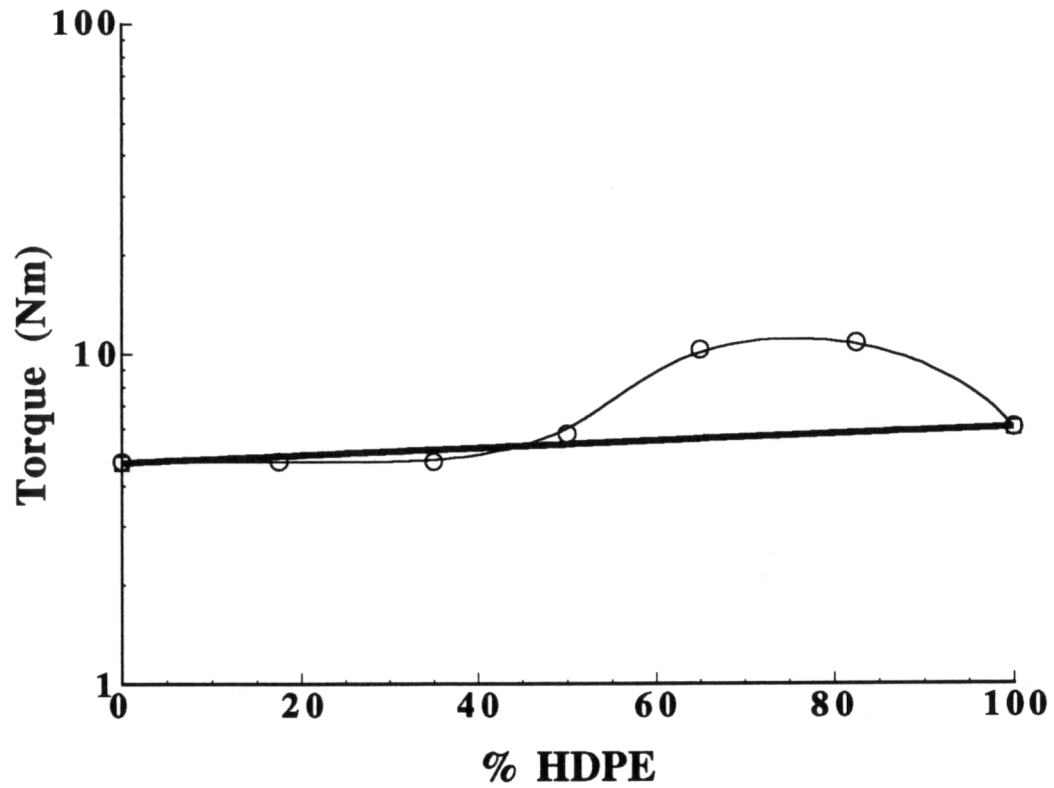


Figura 3.3. Gráfica del torque de extrusión en función del contenido de HDPE, para mezclas binarias (sin elastómero).

observado más claramente comparando la curva que se obtiene con los datos experimentales, con la regla de aditividad la cual esta trazada con una línea recta, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.3.

Las desviaciones observadas en la figura 3.3 podrían ser indicativas de la morfología de las mezclas, es decir, aparentemente cuando las desviaciones son negativas y muy cercanas a la línea que representa la regla de aditividad, se podrá pensar que las mezclas son homogéneas, mientras que cuando las desviaciones son positivas, esto podría ser interpretado como una no-homogenidad (Utracki, 1979).

En otras palabras, cuando la matriz esta compuesta por LDPE, al agregar bajas cantidades de HDPE, las mezclas se ven beneficiadas en cuanto a procesabilidad, reflejándose en una disminución en los torques de extrusión. Mientras que cuando la matriz esta compuesta por HDPE, al agregar bajas cantidades de LDPE, los torques de extrusión se incrementan fuertemente, con lo cual se vuelven menos procesables las mezclas, siendo aparentemente indicativo de una no-homogenidad.

Este tipo de aseveración se refleja en el comportamiento que presentan las mezclas al ser sometidas a tensión. Ya que las mezclas que estan contenidas en el intervalo de 0 a 40 % de contenido de HDPE aproximadamente, presentan formación de cuello y las rupturas se presentan a menores elongaciones a medida que se aumenta el contenido de HDPE. Mientras que cuando la matriz esta compuesta por HDPE, las mezclas tienden a no presentar una formación de cuello definido, inclusive en algunas no hay formación de cuello, y además algunas presentan desgarramiento, principalmente en el intervalo de 50 a 82.5 % de contenido de HDPE aproximadamente.

Si utilizamos el criterio de Utracki (1979) para determinar si una mezcla es compatible, desde el punto de vista de "propiedad mecánica"; la cual dice que una mezcla es considerada compatible cuando la viscosidad (que es asociada en nuestro caso con los torques de extrusión) presenta desviaciones negativas, esto en relación con la regla de aditividad ($X = \phi_1\chi_1 + \phi_2\chi_2$; donde X es la propiedad final. ϕ_1 y ϕ_2 son las

fracciones masa, y χ_2 y χ_1 son la propiedad del LDPE y HDPE respectivamente). Aplicando este criterio a nuestras muestras se podría pensar que al menos en el intervalo de 0 a 40 % de HDPE se podría presentar compatibilidad parcial, ya que hay que relacionar la propiedad, con las demás propiedades y de esta forma poder definir que tan compatible es. En cambio en el intervalo restante se podría interpretar como el intervalo en donde se presenta una incompatibilidad total, ya que se ve incrementado fuertemente el torque de extrusión, y entonces, el trabajo realizado por el tornillo del extrusor aumenta, y por lo tanto desde el punto de vista de Ingeniería, en este intervalo se requiere más energía para procesar las muestras que en el primer intervalo. De aquí se considerará las muestras como semicompatibles al menos en el intervalo de 0 a 40 %, esto es desde el punto de vista del torque de extrusión.

Una vez que se ha realizado la extrusión y el análisis de las mismas, se procede a someter las muestras a pruebas de esfuerzo-deformación bajo las condiciones mencionadas anteriormente en el capítulo 2. De dichas pruebas se obtienen las gráficas de esfuerzo-deformación en función del contenido de HDPE. Las gráficas obtenidas se presentan en la figura 3.4. en esta figura se puede observar claramente cómo el polietileno de baja densidad tiende a presentar ruptura a elongaciones mucho más grandes que el polietileno de alta densidad. Pero a medida que se incrementa el contenido de HDPE las rupturas se presentan a elongaciones menores y los esfuerzos tienden a aumentar.

De la gráfica de la figura 3.4 se hace una gráfica del % de elongación (% e) en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, como podrá observarse en la figura 3.5. En esta gráfica se observa que para las mezclas binarias de HDPE / LDPE en el intervalo de 0 a 20 % aproximadamente las elongaciones en el punto de ruptura sufren una pequeña variación, es decir, las rupturas se presentan casi a las mismas elongaciones, inclusive en dicho intervalo las elongaciones se encuentran ligeramente por arriba de las elongaciones que se obtiene utilizando la regla de aditividad. Esto se presenta más claramente en la

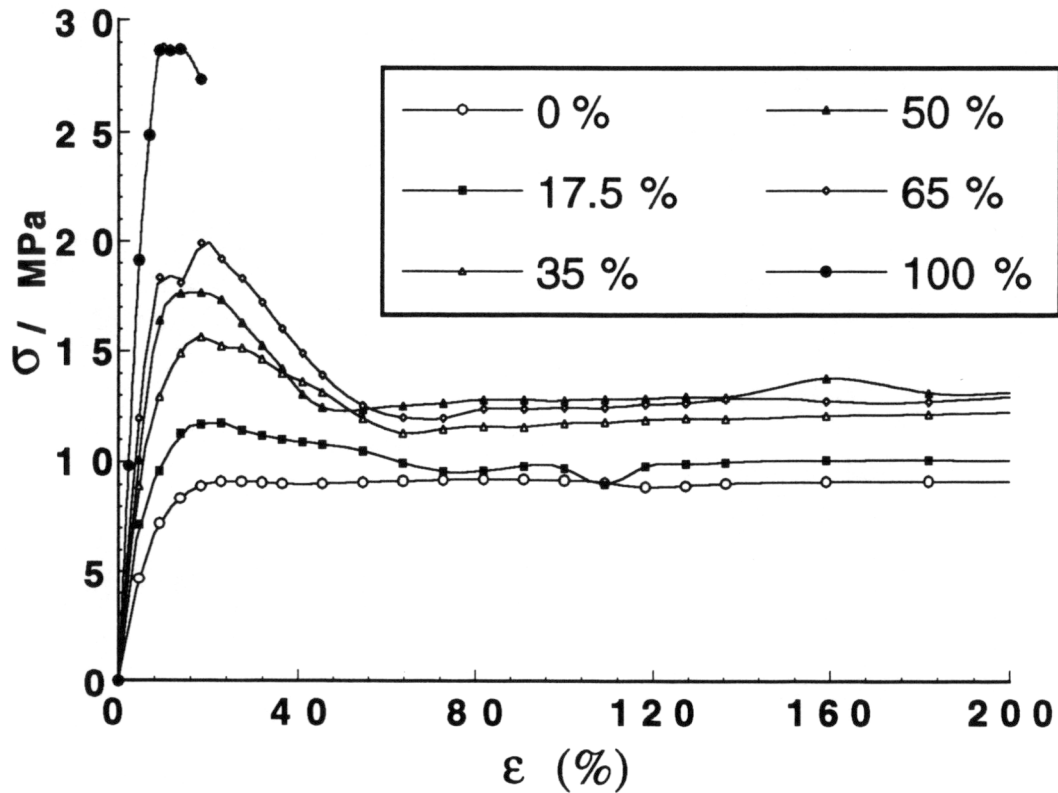


Figura 3.4. Curvas de esfuerzo-deformación para mezclas sin elastómero (0 % de PBR) y diferentes concentraciones de HDPE / LDPE. El recuadro da el porcentaje de HDPE.

gráfica de la figura 3.5, donde la regla de aditividad corresponde a una línea recta. Con esto podemos decir que al menos se ha encontrado un pequeño intervalo en el cual se ha obtenido una mejora en la procesabilidad sin que se vean afectadas las elongaciones en el punto de ruptura; aun más en este pequeño intervalo las elongaciones están ligeramente por arriba de lo que marca la regla de aditividad. En cambio en el intervalo restante se observa que las elongaciones se presentan muy por abajo de lo que marca la regla de aditividad y los torques de extrusión son algo altos, por lo que en el intervalo restante las propiedades se ven fuertemente disminuidas.

Este tipo de comportamiento puede ser indicativo de la homogeneidad, al menos en ciertos intervalos se presenta una homogeneidad parcial o simplemente no existe homogeneidad. Como se mencionó anteriormente, se considera que en los intervalos en donde se presenta una ligera ganancia en cuanto a propiedad, se tendrá homogeneidad parcial o inclusive total. En cambio en donde no existe una ganancia real, si no al contrario una disminución en la propiedad, se considerará como una mezcla en donde no existe homogeneidad. Este tipo de comportamiento no es exclusivo de nuestras mezclas, si no que se presenta en un gran número de mezclas, por ejemplo, en mezclas de HDPE / PS ; HDPE / PVC realizadas por D. R. Paul, et al, 1973. También se ha encontrado este tipo de comportamiento en mezclas de HDPE / MDPE ; LDPE / MDPE, realizadas por Shishezand y Donatelli, 1983.

También de la gráfica de la figura 3.4 se presenta el esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE. En dicha gráfica se observa que casi no existe variación en cuanto al comportamiento esperado, es decir, a medida que se aumenta el contenido de HDPE, se incrementa casi en forma lineal el esfuerzo máximo, como podrá observarse en la figura 3.6. De la misma figura 3.3 se obtienen los esfuerzos a la cedencia al 2 % de elongación, dichos esfuerzos están muy próximos a los esfuerzos máximos. De la gráfica obtenida se puede ver claramente que el comportamiento es casi lineal, lo cual es indicativo de que dicha propiedad, al igual que el esfuerzo máximo, no se ve afectada ya que a medida que se incrementa el contenido de HDPE, el esfuerzo máximo y

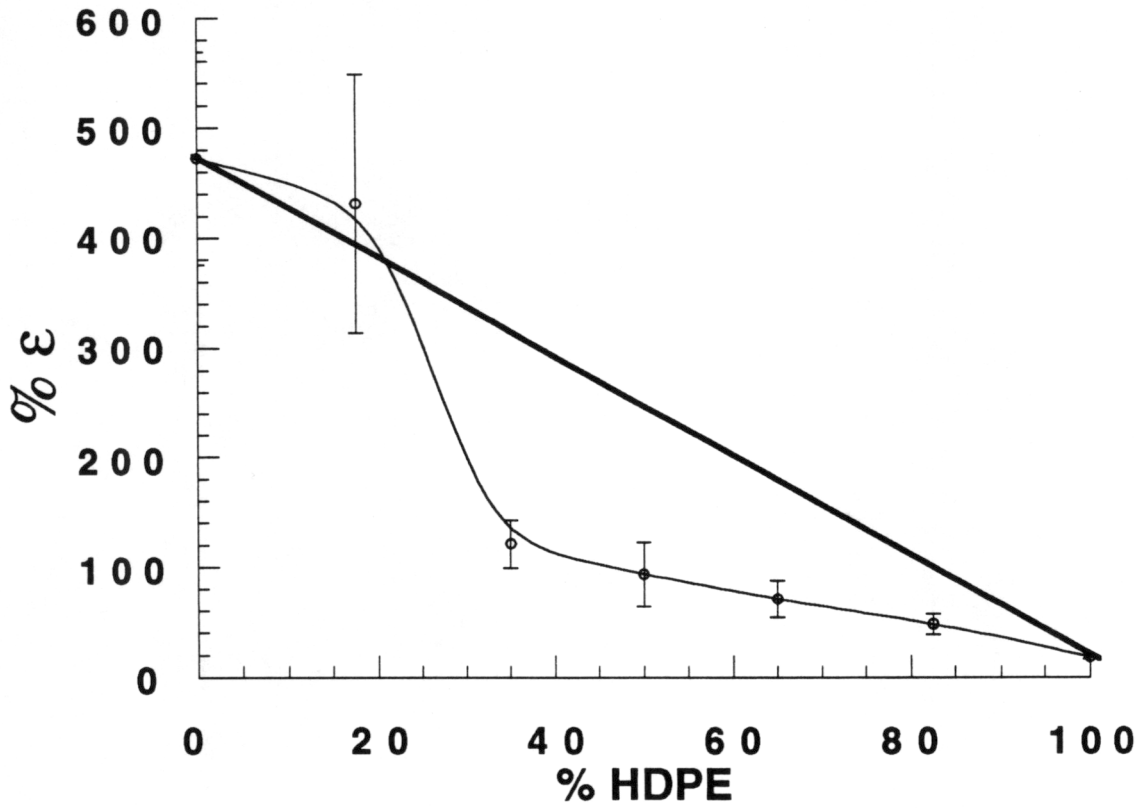


Figura 3.5. Gráfica de % de elongación en función del contenido de HDPE, para mezclas binarias (sin elastómero) de HDPE/LDPE.

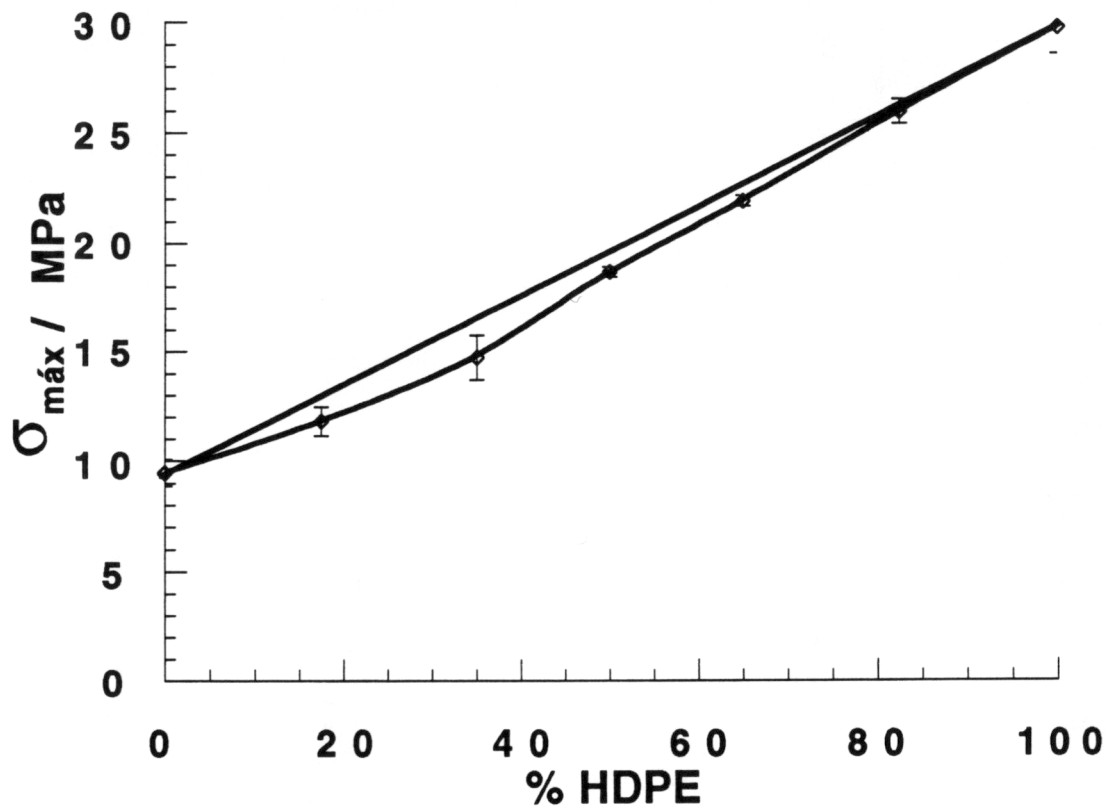


Figura 3.6. Gráfica de esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, para mezclas binarias (sin elastómero) de HDPE/LDPE.

el esfuerzo a la cedencia aumenta paulatinamente, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.7.

Al igual que el esfuerzo a la cedencia, se determinan los módulos de young para cada una de las mezclas. Este módulo es determinado como la pendiente inicial de las curvas de esfuerzo deformación de la gráfica de la figura 3.4. De los módulos determinados para cada mezcla se hace la gráfica de los mismos en función del contenido de HDPE, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.8. En dicha gráfica se observa claramente que en el intervalo de 0 a 40 % aproximadamente el módulo de young aumenta casi en forma lineal, para a partir de este último valor sufrir un cambio, el cual presenta también un comportamiento lineal, pero mayor que el comportamiento observado en el primer intervalo. Cuando se obtiene un comportamiento casi lineal en el módulo de young (D. R. Paul, 1973) se habla de que las muestras pueden presentar una compatibilidad parcial, en cambio cuando se presentan comportamientos no-lineales se tendrá una incompatibilidad. La compatibilidad esta tratada desde el punto de vista de propiedad mecánica.

Una vez más, de las curvas de la gráfica de la figura 3.4. se determinan las áreas bajo las curvas de cada una de las mezclas. Estas áreas son asociadas con la energía necesaria para poder romper las muestras, de aquí que esta energía puede ser indicativa para la estimación de la resistencia al impacto. Con las energías (áreas) determinadas para cada muestra se hace una gráfica de las mismas en función del contenido de HDPE, este comportamiento se presenta en la gráfica de la figura 3.9. Como podrá observarse claramente en esta gráfica la resistencia al impacto se ve fuertemente beneficiada en el intervalo de 0 a 35 % de contenido de HDPE, alcanzando un valor máximo alrededor del 16 % de contenido. En dicho intervalo en el valor máximo se duplica la resistencia al impacto, esto comparado con el valor que se obtiene utilizando la regla de aditividad. Los valores que se obtienen con la regla de aditividad son trazados con una línea recta.

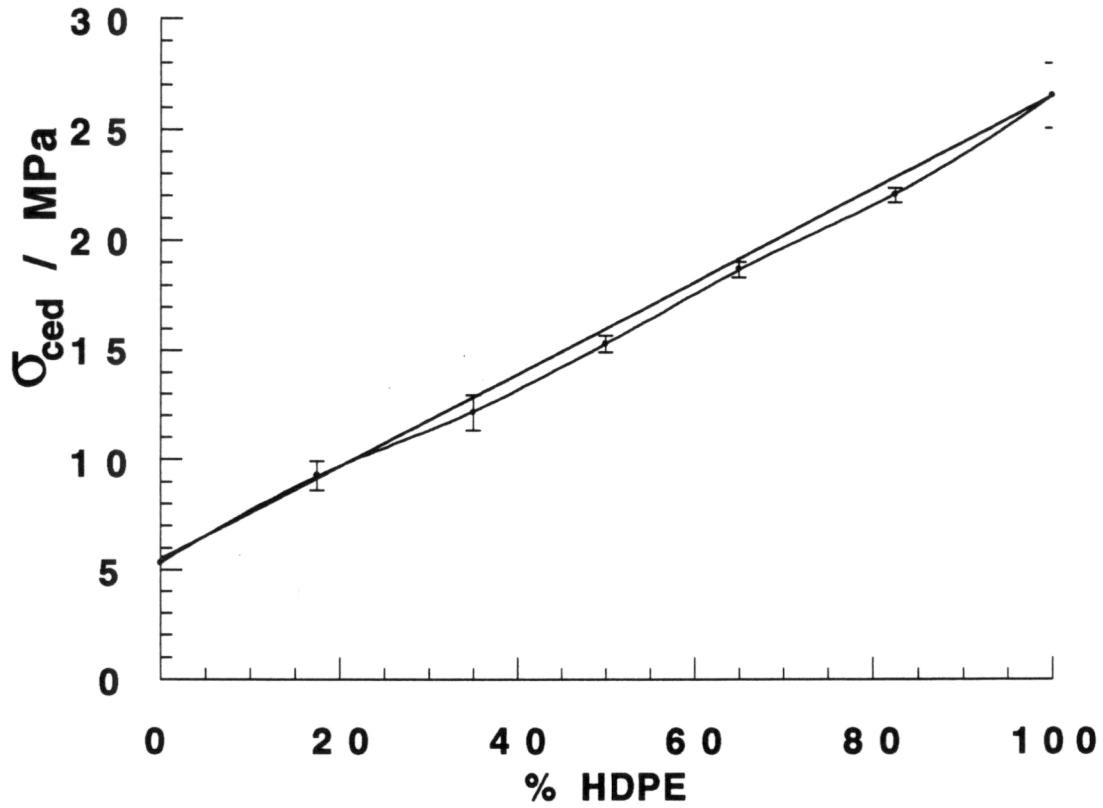


Figura 3.7. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, para mezclas binarias (sin elastómero) de HDPE/LDPE.

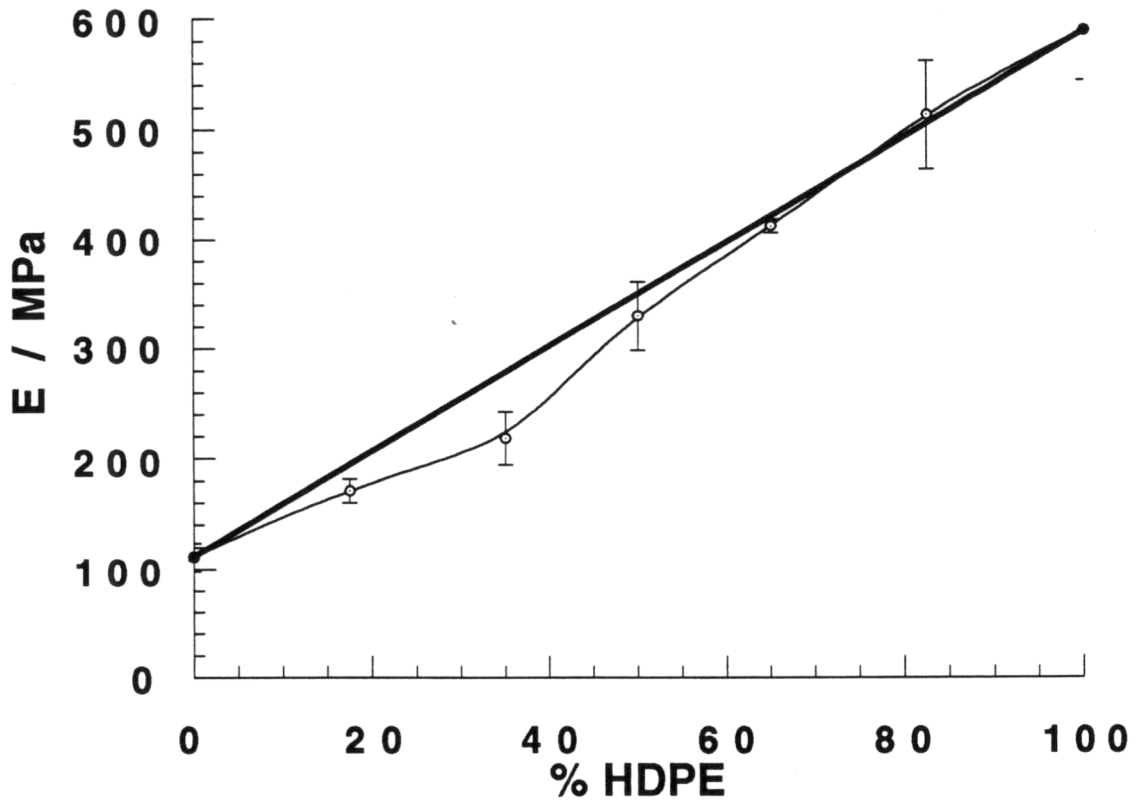


Figura 3.8. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de HDPE, para mezclas binarias (sin elastómero) de HDPE/LDPE.

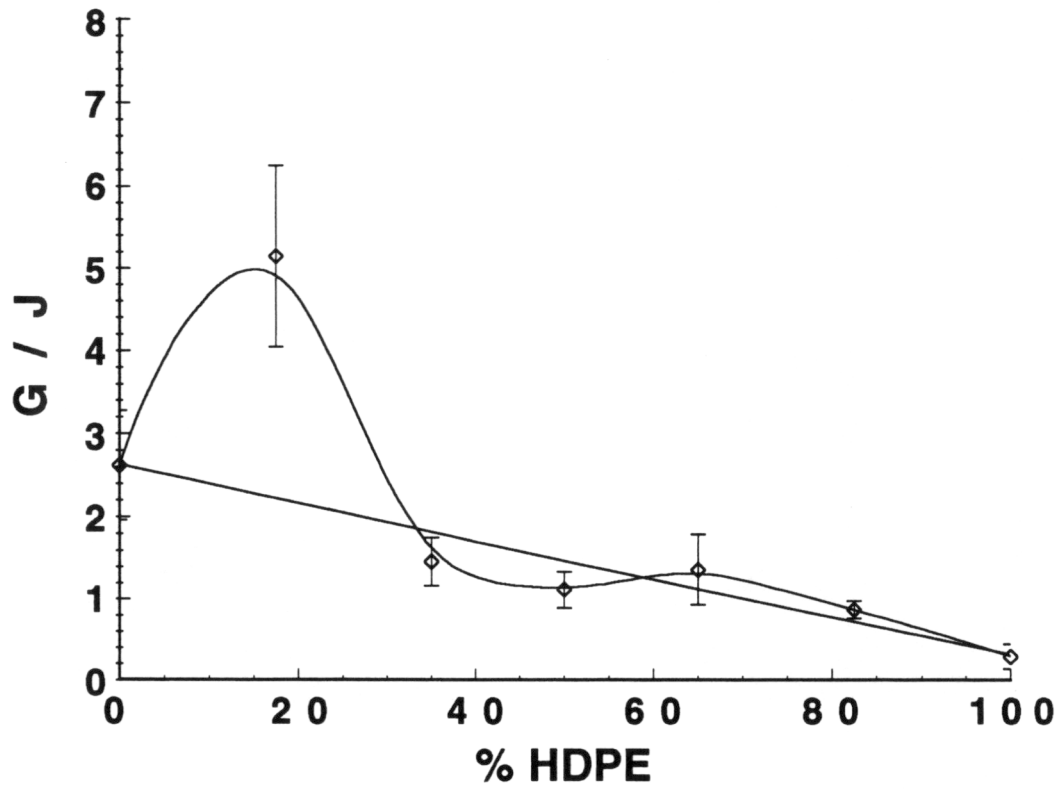


Figura 3.9. Gráfica de la energía necesaria para la ruptura en función del contenido de HDPE para mezclas binarias de HDPE/LDPE.

En cambio en el siguiente intervalo (de 35 a 60 % de contenido de HDPE), energía se ve afectada, pero a partir de este último valor presentarse una ligera ganancia. Las ganancias obtenidas alcanzan hasta un valor del 100 %, en cuanto a propiedad, comparado el valor obtenido experimentalmente con el contenido utilizando la regla de aditividad. Las fluctuaciones observadas en los resultados obtenidos para la resistencia al impacto pueden ser indicativas de la incompatibilidad del polietileno de alta densidad mezclado con polietileno de baja densidad. También este tipo de comportamiento nos puede indicar algunas ventanas de compatibilidad, dichas ventanas se encuentran en donde la propiedad en estudio se ve beneficiada, por ejemplo, las propiedades analizadas en esta sección.

Al igual que los dos polietilenos, las mezclas de los mismos son sometidos a dispersión de rayos-X con el fin de determinar el grado de cristalinidad. De dichas pruebas se obtienen espectros similares a los ilustrados en la figura 3.2, de donde se determinan la parte amorfa y la parte cristalina (áreas) para cada una de las mezclas analizadas. Una vez determinadas estas, se determina el grado de cristalinidad, el cual se presenta en forma gráfica para una mayor visualización y discusión. En la gráfica de la figura 3.10 se presenta el porcentaje de cristalinidad en función del contenido de HDPE, en donde el tamaño de la etiqueta es del mismo orden de magnitud que la incertidumbre asociada a todas las muestras analizadas, también se representa la línea (punteada) que se obtiene al utilizar la regla de aditividad. En la gráfica se puede observar que en un primer intervalo de composición el grado (porcentaje) de cristalinidad no se ve afectado siendo este pequeño intervalo de 0 a 35 % de HDPE, para a partir de este último valor aumentar ligeramente hasta un contenido del 50 % de HDPE, en donde se presenta un máximo bien definido del orden del 78 % de cristalinidad, para permanecer casi constante en el intervalo de composición de 50 a 82.5 % de HDPE aproximadamente y a partir de este último valor incrementarse paulatinamente hasta alcanzar el valor obtenido para el HDPE.

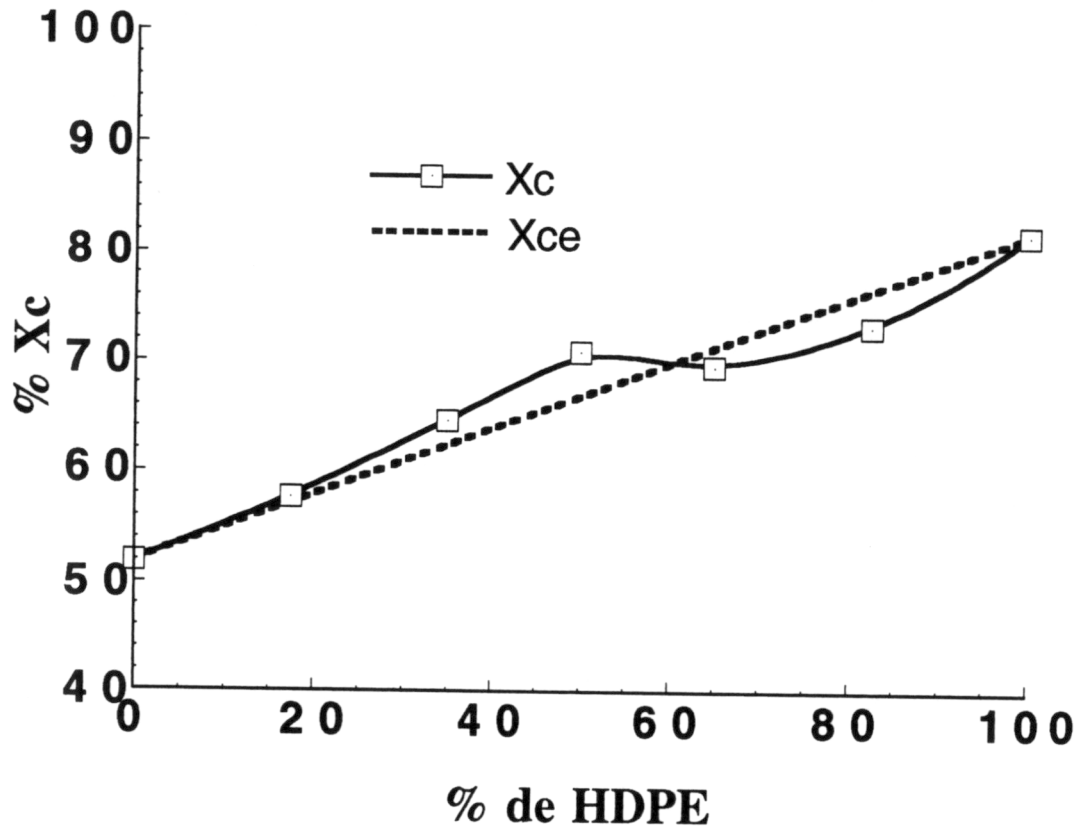


Figura 3.10. Gráfica del porcentaje de cristalinidad ($\% X_c$) como función del contenido de HDPE para mezclas binarias de HDPE / LDPE.

Si relacionamos los resultados obtenidos experimentalmente con los que se obtienen utilizando la regla de aditividad, se podrá observar que se presentan fluctuaciones, tanto positivas como negativas, este tipo de comportamiento es algo complejo de explicar si no se tienen elementos suficientes, el cual es nuestro caso, ya que no se realizaron mediciones u observaciones microscópicas para poder observar la distribución y tamaño de los cristales de las muestras, con lo cual se podrían determinar si existen algunas zonas birrefringentes, pero dado que no se llevaron a cabo estas observaciones simplemente se tomará el criterio de compatibilidad desde el punto de vista de propiedad mecánica, con el cual se observa que en el intervalo de 0 a 60 % de HDPE aproximadamente, la cristalinidad se incrementa ligeramente a medida que se incrementan los contenidos de HDPE, reflejándose este crecimiento en una desviación positiva al comparar los resultados experimentales con los resultados que se obtienen con la regla de aditividad. Si se sigue con dicho criterio, se dice que la propiedad se ve beneficiada ligeramente en dicho intervalo, para a partir de este último valor disminuir apreciablemente, reflejándose esta disminución en una desviación negativa al ser comparados los datos experimentales con los de la regla de aditividad, con lo cual se considerará como incompatible desde el punto de vista de propiedad mecánica.

Si se relaciona el comportamiento del módulo de young con el torque de extrusión, % de elongación y los esfuerzos máximo y de cedencia, así como la cristalinidad, se observa que a medida que se aumenta el contenido de HDPE el torque de extrusión se ve claramente disminuido, en cambio las elongaciones en el punto de ruptura no sufren cambios sustanciales, al menos en un intervalo aproximadamente de 0 a 40 % de contenido de HDPE. En donde se observa claramente que las elongaciones se encuentran ligeramente por encima de lo que se obtendría aplicando la regla de aditividad; en cambio, en el intervalo restante las elongaciones se encuentran muy por debajo de las elongaciones que se obtendrían con la regla de aditividad.

Por otro lado, el comportamiento observado en los esfuerzos máximo y de cedencia es el que se esperaba, es decir, a medida que se aumenta el contenido de HDPE, su comportamiento es creciente y presenta un comportamiento casi lineal, es decir, sin presentar cambios sustanciales, ya que considerando las incertidumbres, los datos se aproximan mucho a la regla de aditividad. En cambio el comportamiento observado en el módulo de young, es un comportamiento lineal en un primer intervalo de 0 a 35 % de contenido de HDPE, para después de este último valor aumentar también en forma lineal en el intervalo restante. En cambio la energía necesaria para la ruptura de las muestras presenta fluctuaciones de consideración ya que se observa claramente un máximo bien definido alrededor del 16 % de contenido de HDPE y un mínimo alrededor de 47 % de HDPE y la cristalinidad se ve incrementada en un intervalo más amplio, es decir, de 0 a 50 % de HDPE aproximadamente.

De lo descrito anteriormente se tiene que al menos en el intervalo de 0 a 17 % de contenido de HDPE aproximadamente, se podría considerar que existe una ventana de compatibilidad ya que las mezclas contenidas en este intervalo se podrá pensar que presentan al menos una buena "homogeneidad", ya que los torques de extrusión se ven ligeramente disminuidos (ver figura 3.3), mientras que las elongaciones se ven beneficiadas (ver figura 3.5), el esfuerzo máximo y de cedencia, así como el módulo de young se ven afectados ligeramente. En cambio la energía y la cristalinidad se ven fuertemente incrementadas (del orden del 100 %). En conclusión las mezclas binarias son al menos semi-compatibles en esta pequeña ventana (intervalo), ya que ciertas propiedades se ven ligeramente beneficiadas y las propiedades restantes no sufren alteraciones o cambios considerables.

3.3. MEZCLAS TERNARIAS DE HDPE/LDPE/PBR.

En esta sección, una vez concluido el análisis de las propiedades mecánicas de los dos polietilenos y las mezclas binarias de HDPE/LDPE, se procede a realizar el análisis y discusión de las propiedades mecánicas de las mezclas de los dos polietilenos, pero ahora mezclados con un elastómero, siendo este Polibutadieno (PBR).

El estudio se inicia con el análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas de los dos polietilenos a los mismos porcentajes de composición, pero ahora mezclados con diferentes contenidos de PBR. Dicho estudio se realiza con la finalidad de evaluar en qué medida se ven afectadas las propiedades de las mezclas 1:1 (de HDPE/LDPE) a diferentes contenidos de PBR. Todo esto debido a que en estudios previos (Scott, et al, 1982) se realizaron estudios de mezclas de dos polímeros incompatibles (desde el punto de vista de propiedad mecánica). Dichas mezclas presentaron propiedades muy inferiores al promedio de las propiedades de los dos polímeros componentes, pero a medida que son mezclados a las mismas concentraciones, pero a diferentes contenidos de elastómero, se observó que en algunas mezclas de este tipo a pequeñas concentraciones de elastómero presentaron una significativa ganancia en cuanto a elongación en el punto de ruptura, así como en el impacto; claro que afectando algunas otras propiedades. Las ganancias se presentan por lo regular a concentraciones inferiores al 20 % de contenido de elastómero.

Siguiendo este tipo de estudios, se realizan las mezclas 1:1 de los dos polietilenos a diferentes concentraciones de elastómero (de 0 a 24 % de contenido de PBR), evaluandose y discutiendo las propiedades mecánicas.

Posteriormente se analizan y discuten las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/ PBR, pero a diferentes concentraciones de PBR, es decir, se analizan las mezclas ternarias con 5 y 10 % de contenido fijo de PBR. Este estudio se realizó con la finalidad de cuantificar en qué medida se ven afectadas las propiedades de las mezclas de los dos polietilenos; en especial cuando se incrementa paulatinamente las concentraciones de los dos polietilenos, pero ahora a contenidos fijos de elastómero (PBR). De los resultados obtenidos se realizó una comparación cuantitativa con los resultados obtenidos en la sección anterior, es decir, con los resultados obtenidos para las mezclas binarias., y de este estudio comparativo determinar en que medida se ven afectadas las propiedades en todo el intervalo de composición a contenidos fijos de PBR (a 5 y 10 % de concentración).

3.3.1. MEZCLAS 1:1

EL análisis y discusión de las mezclas 1:1, variando el contenido de PBR se inicia con el torque de extrusión en función del contenido de HDPE; para pasar posteriormente a las elongaciones en el punto de ruptura; esfuerzos máximos y a la cedencia (al 2 %); módulo de young, y por último la Energía necesaria para la ruptura de las muestras, asociando esa energía con la resistencia al impacto, y por último el grado de cristalinidad.

Las mezclas 1:1 son procesadas a las mismas condiciones que los polietilenos y las mezclas binarias de los mismos, siendo las condiciones a una temperatura de 180 °C y una velocidad de extrusión de 25 rpm. De la extrusión se obtienen directamente los torques, los cuales son indicativos del trabajo desarrollado por el tornillo del extrusor al transportar el material en estado fundido. Dichos torques son asociados con el grado de procesabilidad que presentan las muestras. Los resultados obtenidos se presentan en forma gráfica. En la gráfica de la

figura 3.11 se muestra el comportamiento del torque de extrusión en función del contenido de PBR, en donde se observa que en el intervalo de 0 a 5 % de PBR el torque permanece casi constante, es decir, éste no presenta cambios apreciables, mientras que a partir del 5 % de PBR el torque tiende a disminuir hasta un 17.5 % de PBR y a partir de este valor presenta un repunte hasta un contenido de 24.5 % de PBR.

En el intervalo de 5 a 17.5 % de contenido de PBR se observa una disminución (casi lineal) en los torques de extrusión, alcanzando un valor mínimo de aproximadamente de 4.5 Nm para las mezclas que contienen 17.5 % de PBR; para a partir de este último valor incrementarse fuertemente hasta alcanzar un valor de aproximadamente 5.25 Nm, para las mezclas que contienen 24 % de PBR. Como podrá observarse en el intervalo de composición de 5 a 24 % de PBR se obtiene una ganancia en cuanto a procesabilidad, ya que mientras sean menores los torques de extrusión a los de las mezclas binarias (LDPE/HDPE), las muestras serán más fáciles de procesar. De aquí que en esta propiedad, en términos generales se ve beneficiada, ya que en ningún momento en todo el intervalo de composiciones los torques de extrusión son mayores a los torque de extrusión obtenido para la mezcla binaria de HDPE / LDPE; inclusive los valores de las mezclas ternarias se encuentran por abajo de los valores obtenidos con la regla de aditividad, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.11, en donde se marca con línea punteada la recta que se obtiene con la regla de aditividad.

A todas las mezclas 1:1 (en total 5) también se les realizan pruebas de deformación unidireccional, obteniéndose curvas similares a las de la gráfica de la 3.4. De dichas pruebas se determinan los valores para las elongaciones en el punto de ruptura ($\% \epsilon$) para cada una de las mezclas, los cuales se presenta en forma gráfica. En la gráfica de la figura 3.12 se presentan los valores obtenidos para dichas pruebas, en donde se observa claramente la influencia del PBR; esta influencia se refleja con una drástica disminución de las elongaciones en el punto de ruptura, en especial en las mezclas que están contenidas en el intervalo de 0 a 5 % de PBR, en donde la caída es muy pronunciada (casi lineal),

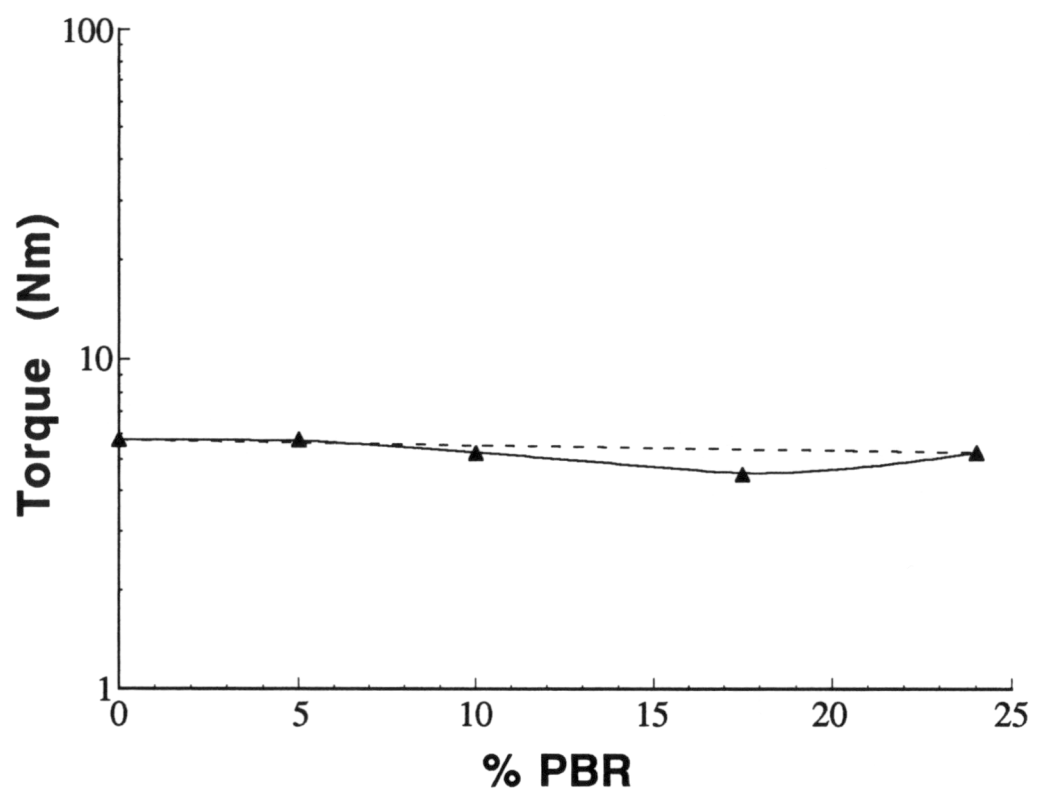


Figura 3.11. Gráfica del torque de extrusión en función del contenido de PBR, para mezclas 1:1.

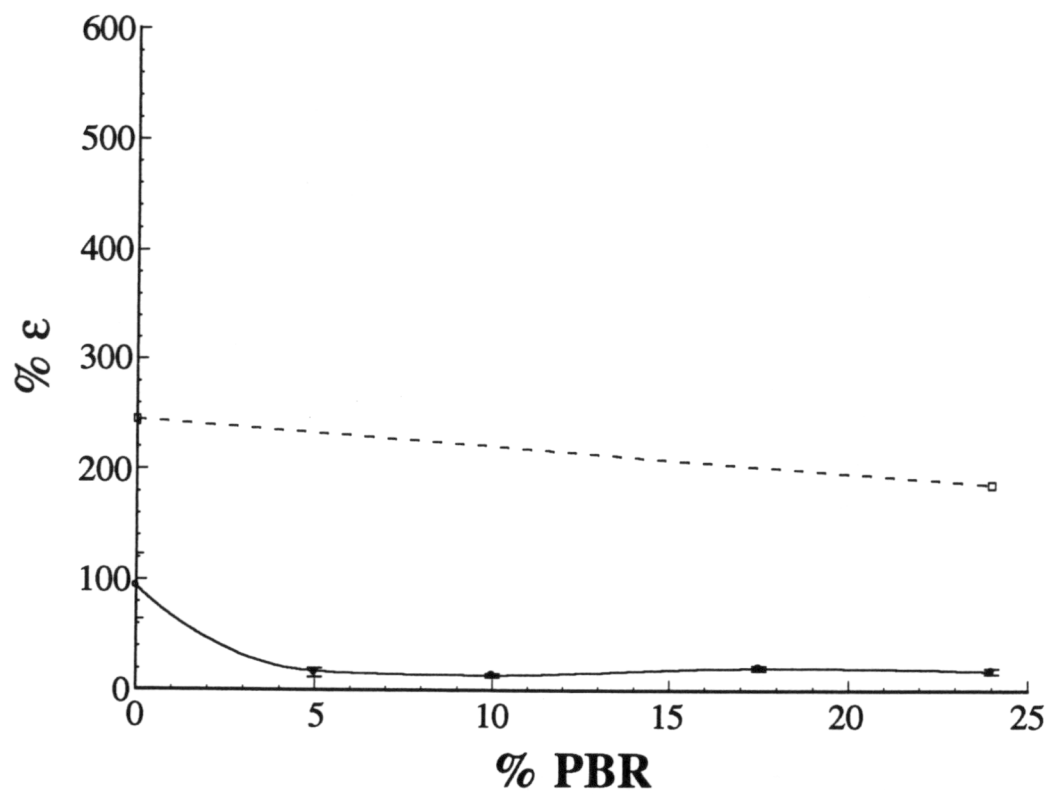


Figura 3.12. Gráfica del % de elongación en función del contenido de PBR para mezclas 1:1.

pero a partir de este último valor las mezclas presentan un comportamiento casi constante en todo el intervalo de composición restante.

De las mismas pruebas de deformación unidireccional se obtienen los valores del esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$) y esfuerzo a la cedencia al 2 % (σ_{ced}) en función del contenido de PBR, dichos valores se presentan en las figuras 3.13 y 3.14. En la figura 3.13 se observa claramente el comportamiento del esfuerzo máximo, con sus respectivas incertidumbres en función del contenido de PBR, en donde estos esfuerzos presentan una disminución casi lineal a medida que se incrementa el contenido de PBR.

En términos generales el comportamiento observado en los esfuerzos máximos, presentan una disminución a medida que se incrementa el contenido de elastómero. Esto podría ser debido a que a las mezclas 1:1 de los dos polietilenos se les agregan pequeñas cantidades de PBR, el cual al tratar de ser mezclado en estado fundido con los dos polietilenos, presenta poca adhesión interfacial y posible segregación de fases, reflejándose este comportamiento en una ligera disminución en la propiedad en estudio ($\sigma_{\text{máx}}$); observándose más claramente en la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente, con los resultados obtenidos con la regla de aditividad, la cual marca la tendencia que presentarían las mezclas con una buena adhesión interfacial, como podrá observarse en la figura 3.13. A modo de conclusión se observa que la propiedad en estudio se ve afectada con la adición del PBR, observándose que la propiedad presenta un intervalo en el cual se ve menos afectada, siendo este intervalo de 0 a 5 % de contenido de PBR.

Los valores para los esfuerzos a la cedencia se obtienen al 2 % de elongación, que es el valor en el que se considera que se presenta un comportamiento elástico (Ley de Hooke). Los valores obtenidos son presentados en forma gráfica. La figura 3.14 se presentan los valores obtenidos experimentalmente para los esfuerzos a la cedencia, con sus respectivas incertidumbres, en función del contenido de PBR, así como

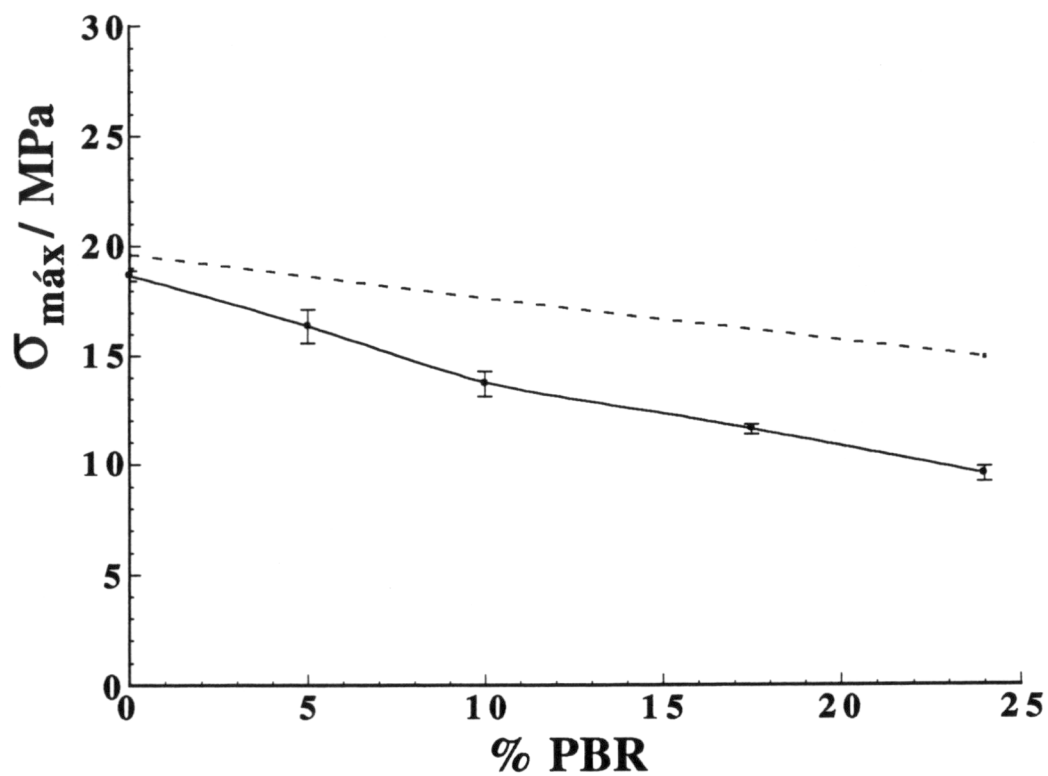


Figura 3.13. Gráfica del esfuerzo máximo en función del contenido de PBR, para mezclas 1:1.

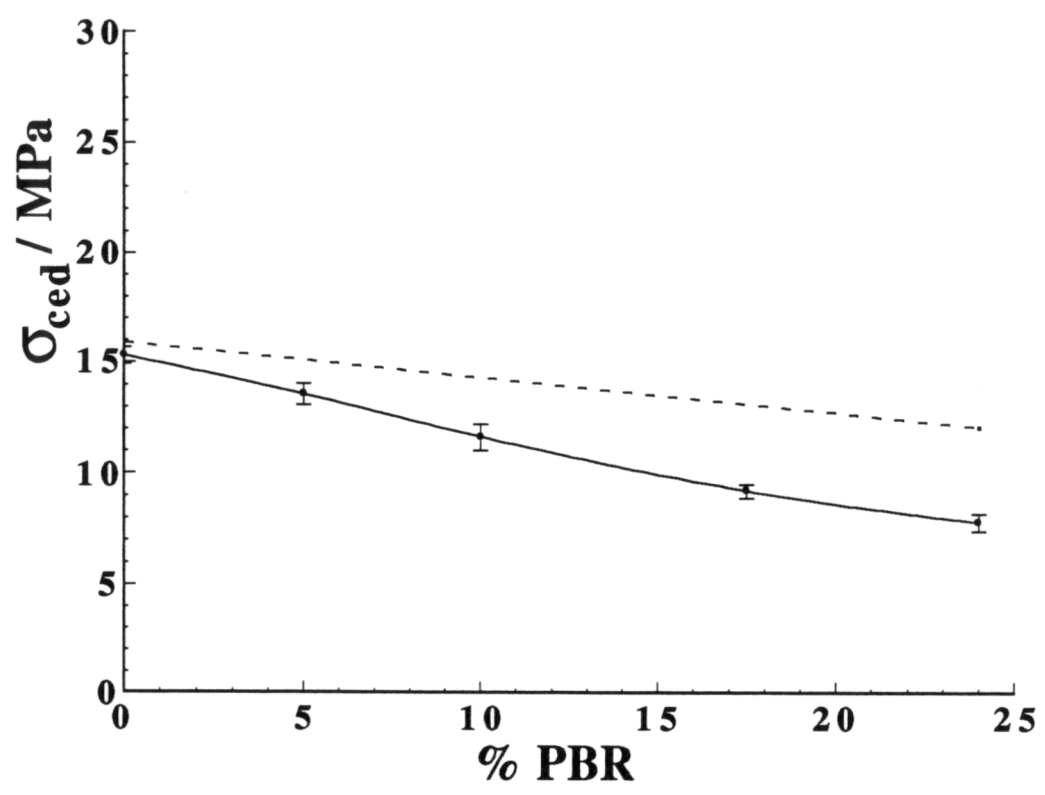


Figura 3.14. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de PBR, para mezclas 1:1.

los valores obtenidos con la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que la tendencia de los valores experimentales presentan un comportamiento casi-lineal, esto considerando los intervalos de incertidumbre obtenidos para cada una de las muestras; este comportamiento es casi el mismo al observado en los esfuerzos máximos.

Como podrá observarse en las figuras 3.13 y 3.14 la propiedad en estudio se ve afectada en todo el intervalo de composiciones, a pesar de obtenerse una ganancia en cuanto a la procesabilidad y una disminución drástica en cuanto a las elongaciones en el punto de ruptura, pero observándose que al menos en los intervalos de 0 a 5 % esta disminución presenta su valor mínimo, en donde estos valores están muy cerca de los valores que se obtienen con la regla de aditividad, lo cual nos podría indicar al menos que existe una pequeña ventana, en la cual las propiedades no se ven afectadas, y en cambio si se obtienen ganancias apreciables, todo esto desde el punto de vista de propiedad mecánica, dicha ventana puede ser explorada para verificar que tan cerca se encuentran los valores de la propiedad en estudio, de los valores que se obtienen con la regla de aditividad, dicho estudio se presenta más adelante.

También de las pruebas de deformación unidireccional se obtienen los módulos de Young para cada una de las mezclas, así como sus respectivas incertidumbres. En la figura 3.15 se presenta la gráfica del módulo de Young con sus respectivas incertidumbres en función del contenido de PBR, así como los valores obtenidos con la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa claramente que el elastómero (PBR) que se agrega en pequeñas cantidades, influye muy poco en el comportamiento de la propiedad en estudio, es decir, la propiedad no se ve afectada y ni mucho menos beneficiada en el intervalo de composición de 0 a 5 %, en cambio en el intervalo restante la propiedad tiende a disminuir casi en forma lineal, esta tendencia es obtenida al comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos con la regla de aditividad.

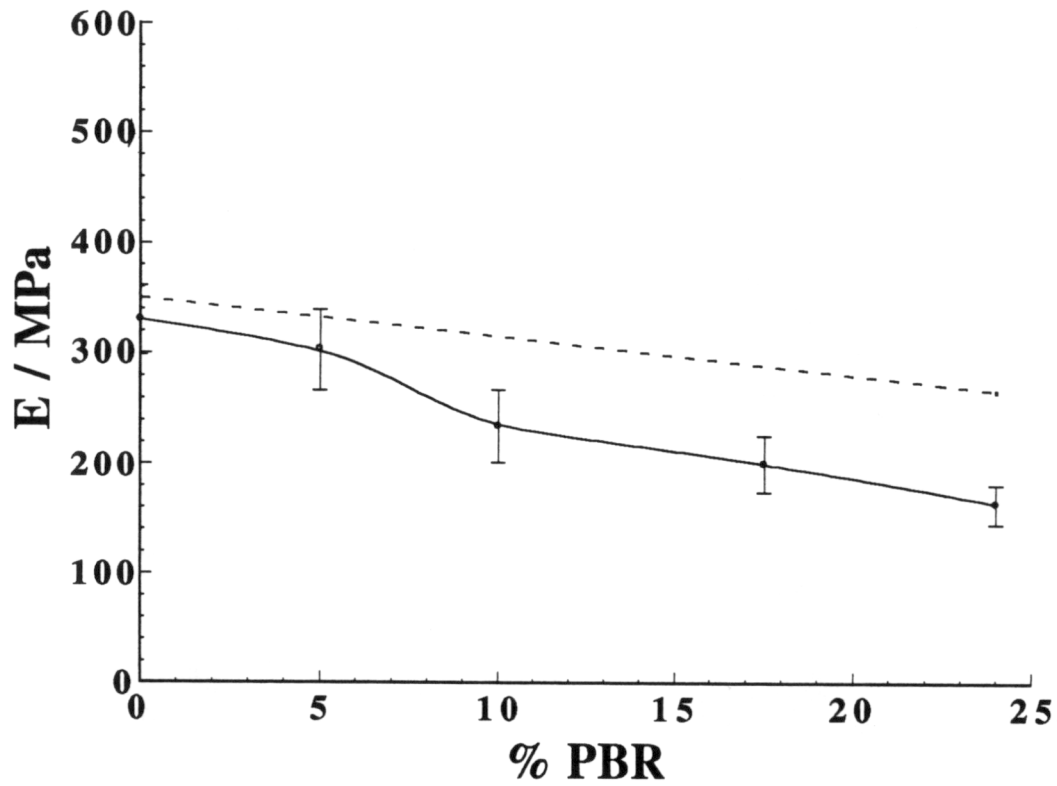


Figura 3.15. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de PBR, para mezclas 1:1.

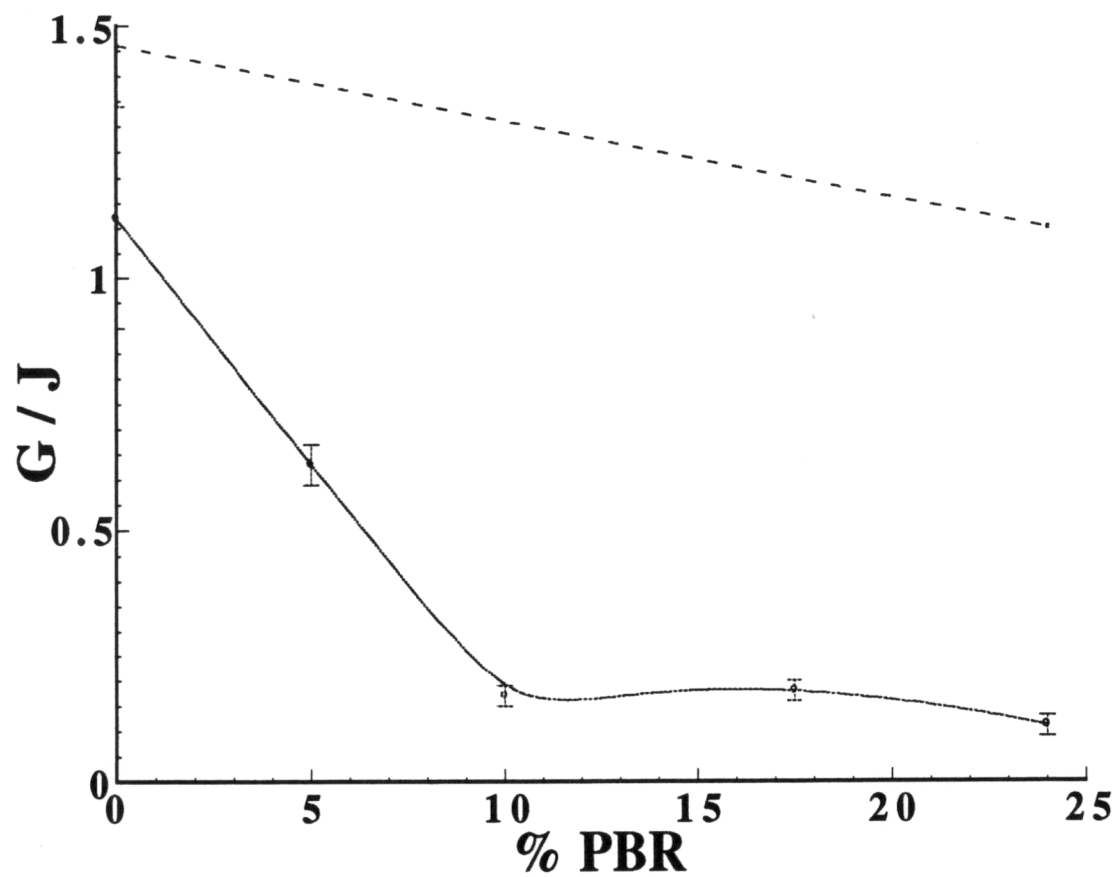


Figura 3.16. Gráfica de la energía necesaria para la ruptura, en función del contenido de PBR, para mezclas 1:1.

Al igual que los esfuerzos a la cedencia y máximos, así como las elongaciones en el punto de ruptura y los módulos de Young, se obtiene la Energía necesaria para la ruptura de las muestras, dicha Energía es "asociada" con la resistencia al impacto. En la figura 3.16 se presenta la gráfica de los valores obtenidos para la energía con sus respectivas incertidumbres en función del contenido de PBR, así como los valores obtenidos con la regla de aditividad, dichos valores son representados con una línea recta punteada. En esta gráfica se observa que la energía cae drásticamente con la adición de elastómero, reflejándose este comportamiento en una disminución en la resistencia al impacto en todo el intervalo de composiciones.

Una vez que han sido sometidas las muestras a las pruebas de deformación unidireccional, estas son preparadas para someterlas a dispersión de rayos-X, con el fin de poder determinar el grado de cristalinidad. De dichas pruebas se obtienen primeramente los espectros para cada una de las mezclas, los cuales son similares a los mostrados en la figura 3.2. Posteriormente de los espectros obtenidos se determinan las partes amorfa y cristalina (áreas), para determinar posteriormente el grado de cristalinidad para cada una de las mezclas y de esta forma determinar cual fué la influencia del elastómero en la propiedad en estudio. En la figura 3.17 se muestra la gráfica del porcentaje de cristalinidad en función del contenido de PBR para las mezclas 1:1, en donde la etiqueta que representa a cada valor es del mismo orden de magnitud a la incertidumbre asociada a todas las muestras; en dicha figura se observa claramente cómo la cristalinidad tiende a permanecer casi constante en el intervalo de 0 a 5 % de PBR, para a partir de este último valor disminuir en una forma fluctuante, la disminución observada se debe principalmente a que a las mezclas se agrega un material amorfo como lo es el elastómero utilizado.

De los resultados obtenidos experimentalmente y los obtenidos con la regla de aditividad, se puede observar que la propiedad en estudio se ve fuertemente incrementada en casi todo el intervalo de composición, excepto en el intervalo de 8 a 12 % de PBR aproximadamente, en donde la propiedad es similar a la obtenida con

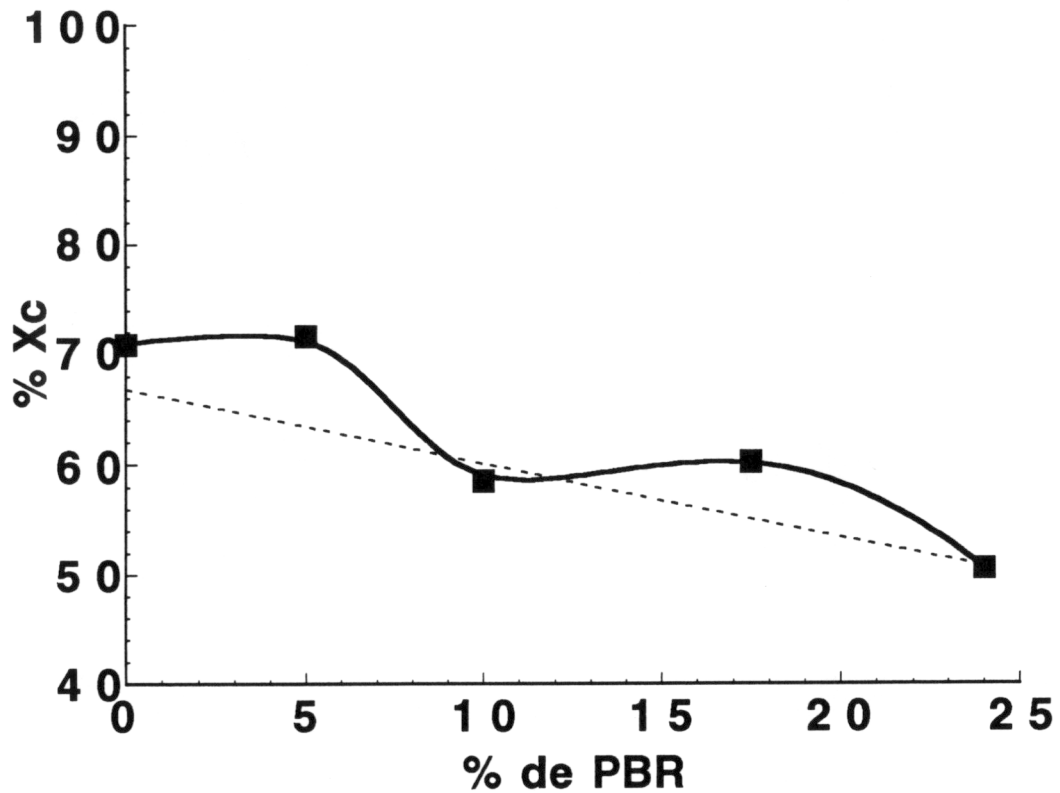


Figura 3.17. Gráfica del porcentaje de cristalinidad (% Xc) como función del contenido de PBR para mezclas con proporciones iguales de HDPE / LDPE.

la regla de aditividad, con lo cual se puede concluir (desde el punto de vista de propiedad mecánica) que la propiedad se ve fuertemente beneficiada casi en todo el intervalo de composición excepto en el pequeño intervalo en donde la propiedad no se ve afectada.

En términos generales, las mezclas 1:1 tienden a disminuir casi todas las propiedades excepto la cristalinidad en todo el intervalo de composición, observándose una disminución mínima en el intervalo de 0 a 5 % de PBR, en donde las propiedades presentan desviaciones pequeñas, con lo cual se da pauta a poder explorar en que medidas se ven afectadas las propiedades de los dos polietilenos mezclados a contenidos fijos de PBR, en este caso a 5 y 10 % de PBR, que es el intervalo en donde se observa que las propiedades de las mezclas 1:1 se ven menos afectadas.

3.3.2 MEZCLAS TERNARIAS A CONTENIDOS FIJOS DE PBR.

Una vez que se han analizado las propiedades de las mezclas 1:1, se procede a analizar las propiedades de las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR, pero a contenido fijos de PBR, siendo estos contenidos a 5 y 10 %; para pasar después a una comparación de los resultados obtenidos para estas mezclas con los resultados obtenidos para las mezclas binarias, y así evaluar la influencia del PBR a contenidos fijos, para las mezclas de los dos polietilenos.

a) Mezclas con 5 % de PBR.

El análisis y discusión de las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR a contenidos fijos de PBR se inicia con el torque de extrusión en función del contenido de HDPE a contenidos fijos de PBR, siendo en esta primera parte de 5 %, para pasar posteriormente a las elongaciones en el punto de ruptura, esfuerzos máximos y a la cedencia (al 2 %), módulo de Young, y por último la energía necesaria para romper las muestras, en donde esta energía es asociada con la resistencia al impacto.

Las mezclas ternarias son procesadas a las mismas condiciones que las mezclas binarias; de dicho procesamiento se obtienen directamente los torques de extrusión, los cuales como ya se mencionó anteriormente, son indicativos de la procesabilidad de las mezclas, es decir, nos indica el trabajo desarrollado por el tornillo del extrusor al transportar el material en estado fundido a través del cañón. Los resultados obtenidos directamente del extrusor se presentan en forma gráfica. En la gráfica de la figura 3.18 se presenta el comportamiento del torque de extrusión en función del contenido de HDPE para las mezclas ternarias a un contenido fijo de 5 % de PBR, en dicha gráfica los resultados obtenidos son presentados con sus respectivas incertidumbres, así como la línea que representa la regla de aditividad, la cual es representada con una línea punteada.

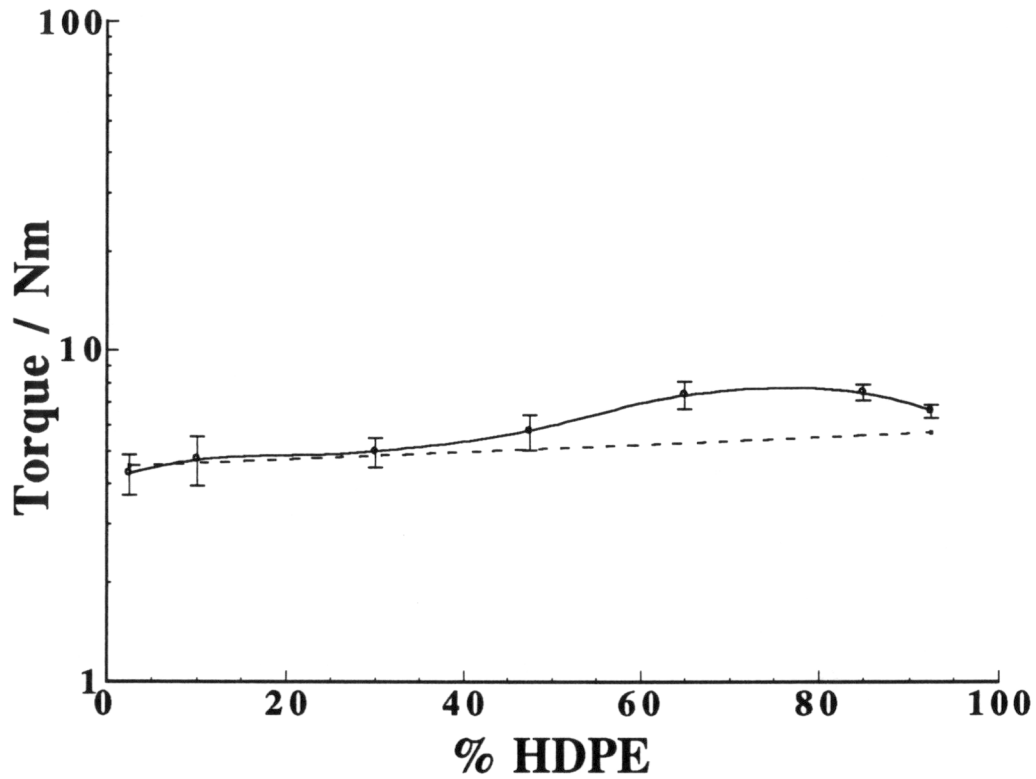


Figura 3.18. Gráfica de torque de extrusión en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 5 % de contenido fijo de PBR.

En la gráfica de la figura 3.18 se observa claramente que cuando la matriz esta constituida por LDPE, los torques de extrusión para las mezclas que contienen 5 % de contenido fijo de PBR no presentan variación alguna en el intervalo de 0 a 35 % de HDPE, este comportamiento es indicativo de que al menos la procesabilidad no se ve afectada, si no que permanece constante. En cambio a medida que se incrementa el contenido de HDPE los torques tienden a aumentar, reflejandose en una disminución en cuanto a la procesabilidad, notandose aun más cuando la matriz esta constituida por HDPE.

Una vez que las muestras han sido extruidas, estas son sometidas a pruebas de deformación unidireccional, obteniendose curvas simiñares a las de la gráfica de la figura 3.4. De dichas pruebas son determinados los valores para las elongaciones en el punto de ruptura para cada un de las mezclas (siete en total), los cuales son presentados en forma gráfica. En la gráfica de la figura 3.19 se presentan los valores obtenidos, en los cuales estan representadas las incertidumbres asociadas a cada una de las muestras, asi como la línea que marca los valores que se obtienen con la regla de aditividad.

En la gráfica de la figura 3.19 se presenta el comportamiento de las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE para las mezclas ternarias con 5 % de PBR, en dicha gráfica se observa que las elongaciones en el punto de ruptura se ven fuertemente afectadas a medida que se incrementa el contenido de HDPE, como podrá observarse al comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos con la regla de aditividad. Pero también se observa que la mezcla que esta constituida con 2.5 % de HDPE, 92.5 % de LDPE y 5 % de PBR muestra una ligera ganancia en las elongaciones, con lo cual se podrá pensar que al menos para esta mezcla se esta presentando una regular adhesión de los componentes, la cual se ve fuertemente afectada a medida que se incrementa el contenido de HDPE. Si esta ligera ganancia se asocia con la procesabilidad, se podrá observar que en dicha mezcla la procesabilidad no se ve afectada y en cambio presenta una ligera ganancia en la elongacion en el punto de ruptura, con lo cual nos

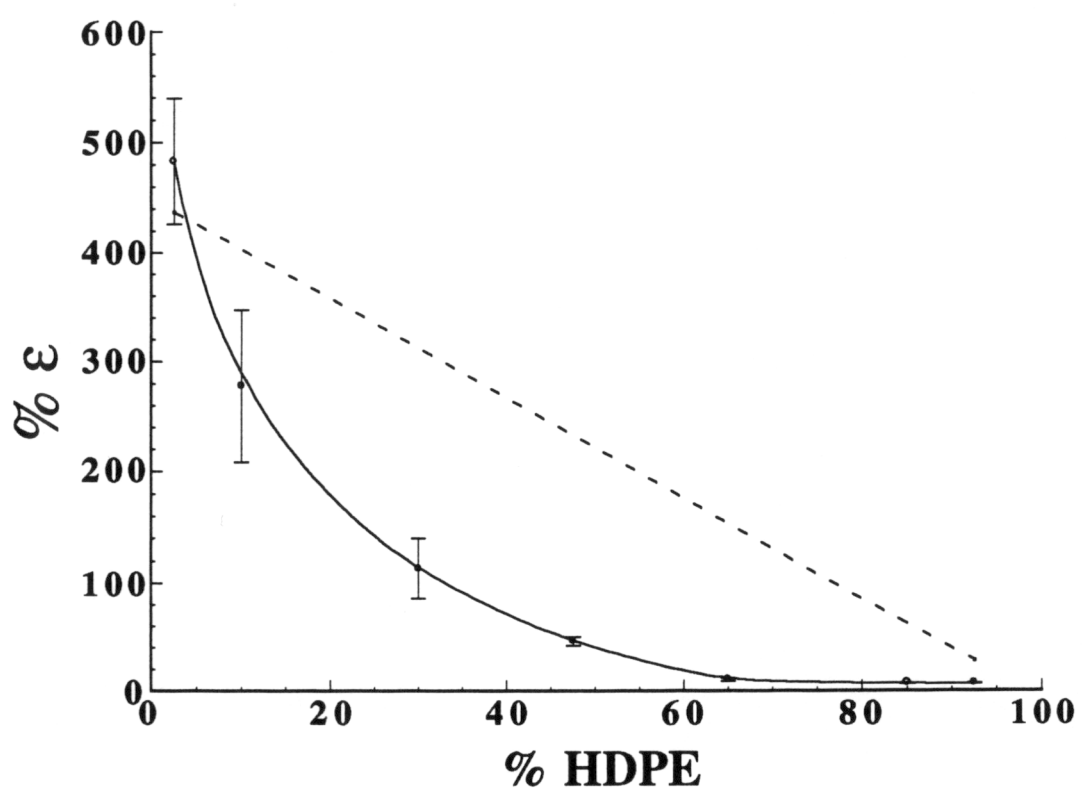


Figura 3.19. Gráfica de % de elongación en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 5 % de PBR constante.

podemos aventurar a encontrar una pequeña región (ventana) en la cual se puede considerar que las mezclas muestran una ligera ganancia. Dicha ventana se podrá considerar como una ventana de compatibilidad, pero esta aseveración se verá reforzada con el análisis de las propiedades restantes, las cuales se presenta a continuación.

De las mismas pruebas de deformación unidireccional se obtienen los valores del esfuerzo máximo y el esfuerzo a la cedencia al 2 % de elongación, en función del contenido de HDPE, para las mezclas con un contenido fijo del 5 % de PBR, como podrá observarse en las gráficas de las figuras 3.20 y 3.21. En figura 3.20 se presenta el comportamiento del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, los valores obtenidos son representados con sus respectivas incertidumbres, así como la línea que describe el comportamiento que se obtiene con la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que la propiedad en general se ve ligeramente afectada con el incremento del HDPE, pero presentando un comportamiento muy similar al que se obtiene con la regla de aditividad, es decir, las curvas son muy similares, con la excepción de la mezcla que contiene un alto contenido de LDPE (92.5 %) y un 2.5 % de HDPE, la propiedad es igual a la que se obtiene con la regla de aditividad, con lo cual se dice que la propiedad no se ve afectada y refuerza aún más la posibilidad de encontrar una ventana de compatibilidad.

En la gráfica de la figura 3.21 se ilustra el comportamiento del esfuerzo a la cedencia en función del contenido del HDPE, los valores son presentados con sus respectivas incertidumbres, así como la línea que marca la regla de aditividad, en dicha gráfica se observa que los resultados que se han obtenido experimentalmente son más similares a los que se obtienen con la regla de aditividad, con lo cual la propiedad se ve menos afectada que los esfuerzos máximos. También se observa claramente que en el intervalo de 2.5 a 10 % de HDPE la propiedad se encuentra ligeramente por arriba de la línea que representa a la regla de aditividad, con lo cual la propiedad en estudio se ve beneficiada, lo cual nos lleva a reforzar más nuestra aseveración de poder determinar una pequeña ventana de compatibilidad.

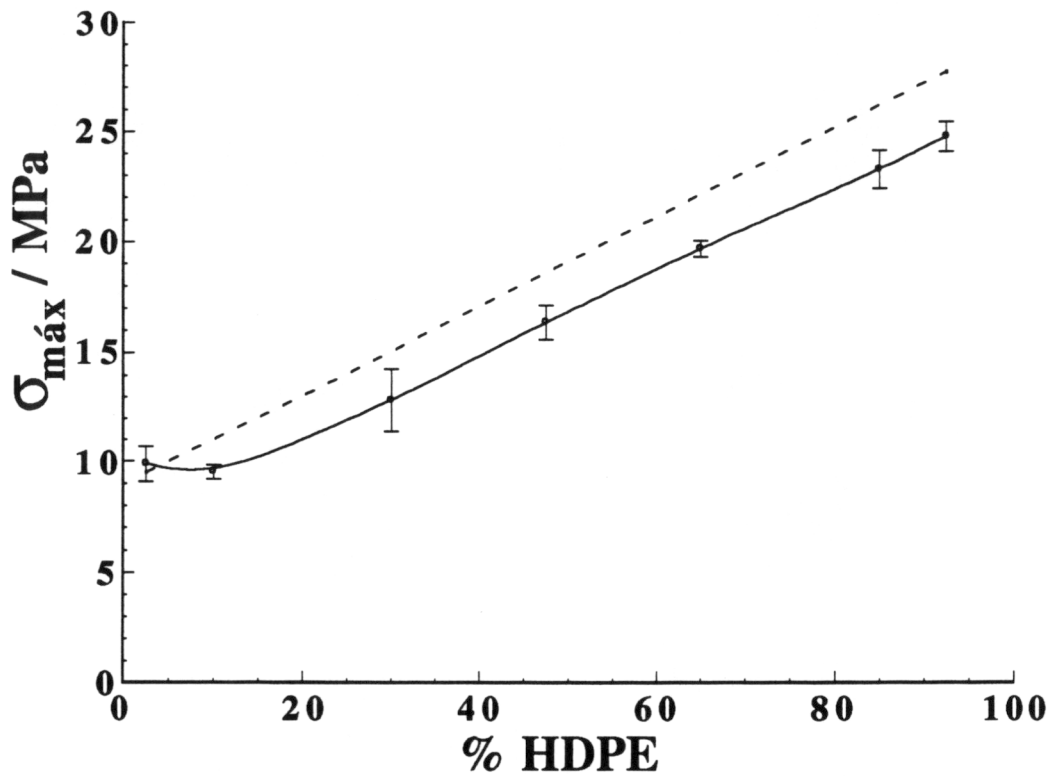


Figura 3.20. Gráfica del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 5 % de PBR constante.

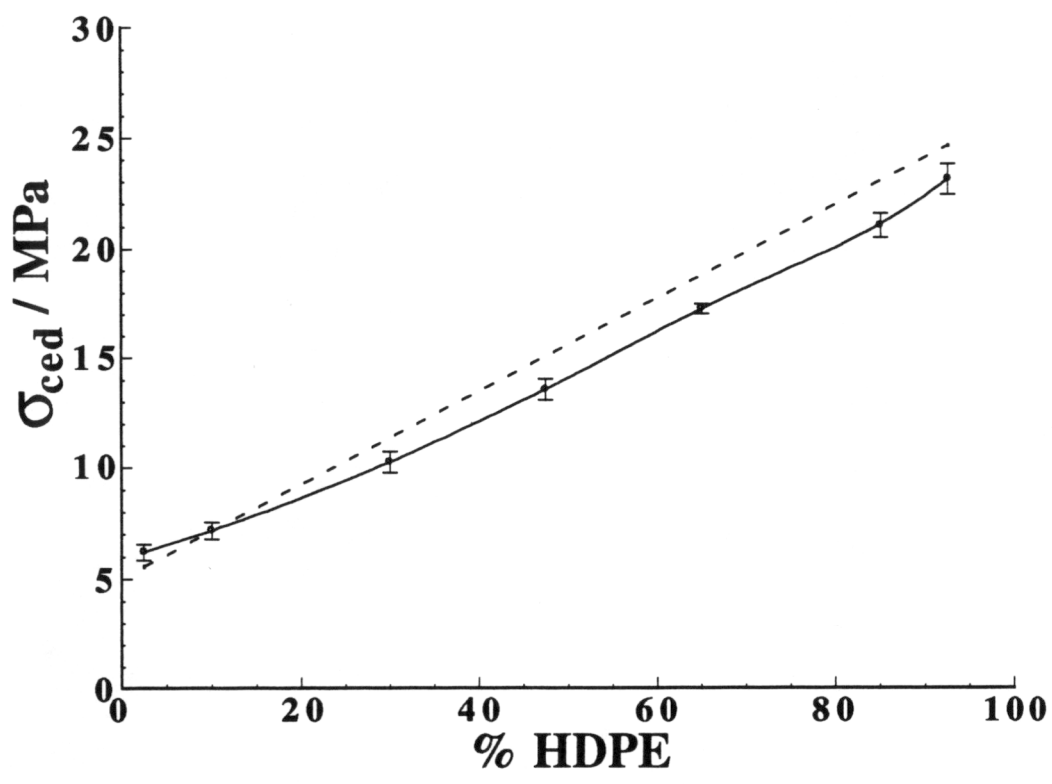


Figura 3.21. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 5 % de PBR constante.

De igual forma que se obtienen los esfuerzos se obtienen los valores para el módulo de Young y la energía necesaria para la ruptura de las muestras, dichos resultados también son presentados en forma gráfica como en las figuras 3.22 y 3.23 respectivamente. En la gráfica de la figura 3.22 se presenta el comportamiento del módulo de young en función del contenido de HDPE, también se ilustran sus respectivas incertidumbres, así como la línea que describe el comportamiento que se obtiene con la regla de aditividad, representado con una línea punteada. En esta gráfica a pesar de que en las propiedades anteriores se ha observado una disminución en general, el módulo no presenta disminución alguna, es decir, la propiedad no se ve afectada ya que su comportamiento es similar a que se obtiene con la regla de aditividad.

En cambio en la gráfica de la figura 3.23 se presenta el comportamiento de la energía necesaria para la ruptura de las mezclas en función del contenido de HDPE, así como las incertidumbres asociadas a cada una de las mezclas y la línea que representa el comportamiento que se obtiene al utilizar la regla de aditividad. La propiedad en estudio es asociada con la resistencia al impacto, de aquí que las mezclas presenten una ganancia en cuanto a resistencia al impacto como podrá observarse en la gráfica, en donde se tiene que en el intervalo de 2.5 a 17.5 % de HDPE aproximadamente, la resistencia al impacto se ve fuertemente beneficiada, ya que en dicho intervalo los resultados obtenidos experimentalmente se encuentran por arriba de lo que marca la regla de aditividad.

Una vez que las mezclas ternarias han sido sometidas a prueba de deformación unidireccional, éstas son preparadas para ser sometidas a dispersión de rayos-X, con la finalidad de determinar el grado de cristalinidad en cada una de las mezclas. De las pruebas realizadas se obtienen espectros similares a los mostrados en la figura 3.2, de donde se obtienen las áreas bajo las curvas para cada una de las mezclas con las cuales se determina la cristalinidad, los resultados obtenidos también se presentan en forma gráfica. En la figura 3.24 se presenta la gráfica del porcentaje de cristalinidad para las mezclas ternarias con 5 % de PBR constante, en función del contenido del HDPE. En dicha

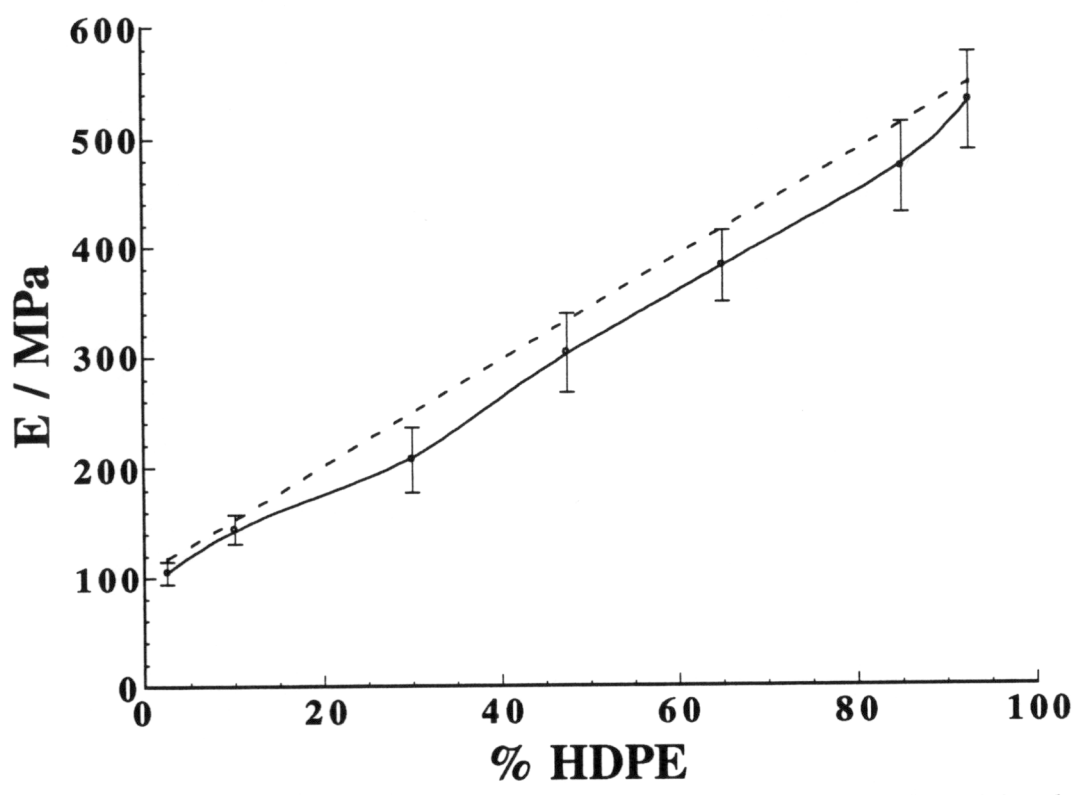


Figura 3.22. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de PBR, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 5 % de PBR constante.

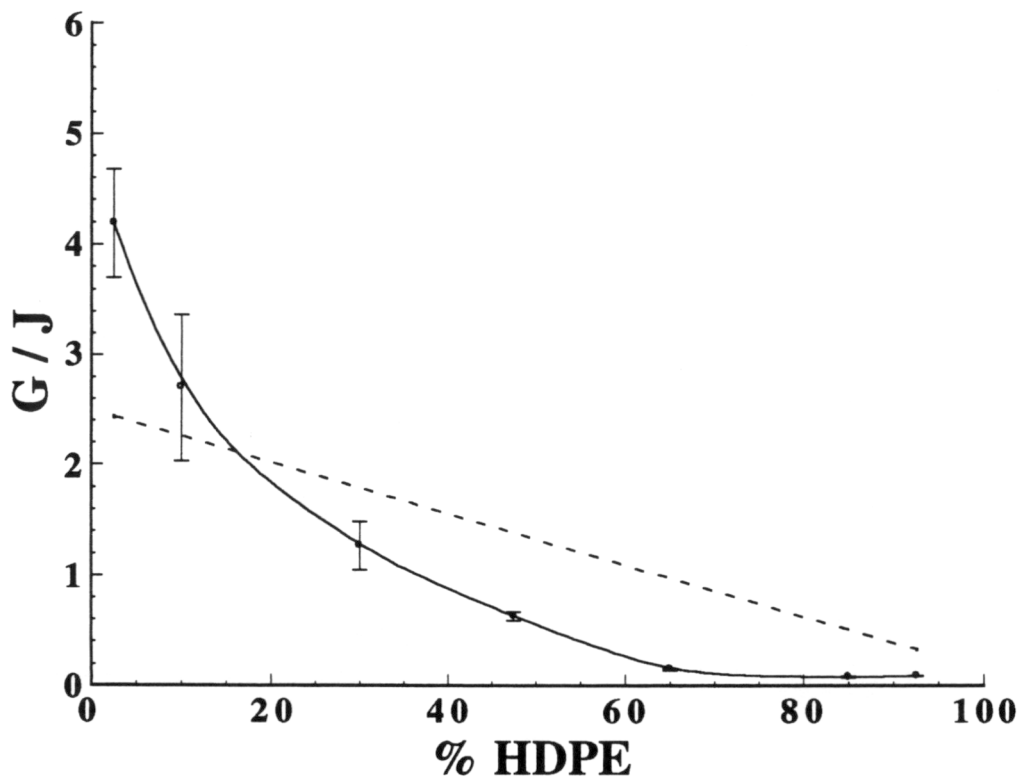


Figura 3.23. Gráfica de la energía necesaria para la ruptura en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 5 % de PBR constante.

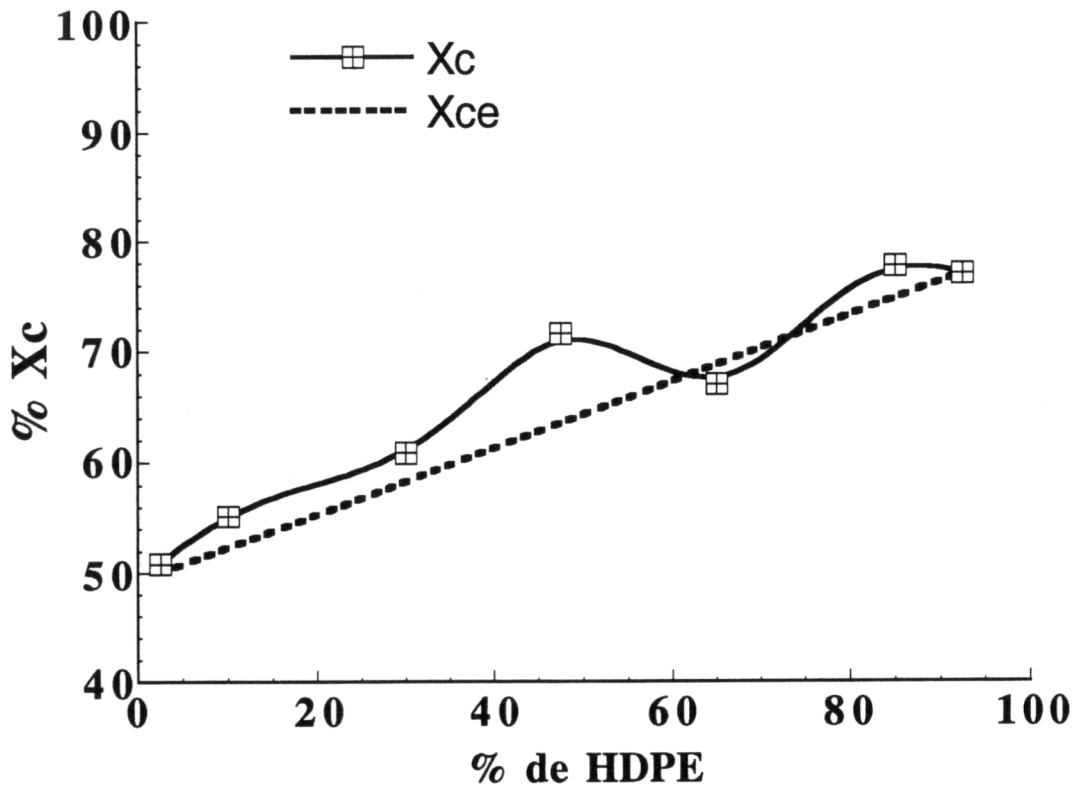


Figura 3.24. Gráfica del porcentaje de cristalinidad ($\% X_c$) como función del contenido de HDPE para mezclas con 5 % de PBR.

gráfica se observa claramente que la cristalinidad tiende a aumentar a medida que se incrementa el contenido de HDPE, presentando algunas fluctuaciones, las cuales son difíciles de explicar, ya que no se cuenta con los elementos suficientes.

Analizando los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos con la regla de aditividad, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.24, en donde los resultados que se obtienen con la regla de aditividad están representados en la línea punteada. En dicha gráfica se observa claramente que la cristalinidad que se obtiene experimentalmente se ve ligeramente beneficiada, ya que es mayor a la que se obtiene con la regla de aditividad, excepto en un pequeño intervalo de 62.5 a 75 % de HDPE aproximadamente, en donde la cristalinidad no se ve afectada, con lo cual se concluye que la propiedad se ve fuertemente beneficiada.

Si se asocian todas las propiedades en estudio, se podrá observar que en general las propiedades tienden a ser desfavorecidas casi en todo el intervalo de composición, con la excepción del módulo de Young y la cristalinidad, las cuales aparentemente no se ven afectadas a medida que se va incrementando el HDPE, por un lado, y por otro lado, se observa que realmente existe un pequeño intervalo en donde las propiedades tienden a ser muy similares e inclusive mejores a las que se obtienen utilizando la regla de aditividad. Los valores que se ven fuertemente incrementados en esta pequeña ventana, como se había mencionado anteriormente, es la Energía requerida para poder romper las muestras y la cristalinidad, con lo cual se puede concluir que al menos en esta pequeña ventana, las mezclas se pueden considerar como compatibles, desde el punto de vista de propiedad mecánica.

b). Mezclas con 10 % de PBR.

En esta sección se analizan las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR, a 10 % de PBR; las propiedades analizadas son el torque de extrusión, el cual es asociado con la procesabilidad; las elongaciones en el punto de ruptura, los esfuerzos máximos y de cedencia, el módulo de Young, la energía necesaria para la ruptura de las mezclas, la cual es asociada con la resistencia al impacto y el grado de cristalinidad de las mezclas.

Al igual que todas las muestras anteriores, las mezclas ternarias en estudio son extruidas (a las mismas condiciones de 180 °C y 25 rpm), de donde se obtienen directamente los torque de extrusión para cada una de las mezclas, siendo siete el total de las mismas, también se obtienen las incertidumbres; los resultados obtenidos son presentados en forma gráfica. En la figura 3.25 se muestra la gráfica del torque de extrusión en función del contenido de HDPE para las mezclas ternarias con 10 % de PBR constante, así como sus respectivas incertidumbres, mostrándose también la línea que se obtiene utilizando la regla de aditividad, en donde dicha línea es representada con una línea punteada. En dicha gráfica se observa que la procesabilidad se ve ligeramente afectada (negativamente) cuando la matriz esta constituida por LDPE, mostrándose este comportamiento con una ligera desviación positiva al comparar los resultados experimentales con los resultados que se obtienen utilizando la regla de aditividad (de 5 a 45 % de HDPE aproximadamente), dicha desviación tiende a aumentar más a medida que se incrementa el contenido de HDPE. Como podrá observarse, casi en todo el intervalo de composición la procesabilidad se ve afectada negativamente, ya que los resultados experimentales se encuentran por arriba de la línea que marca la regla de aditividad, con lo cual se considera que es menos procesable la mezcla.

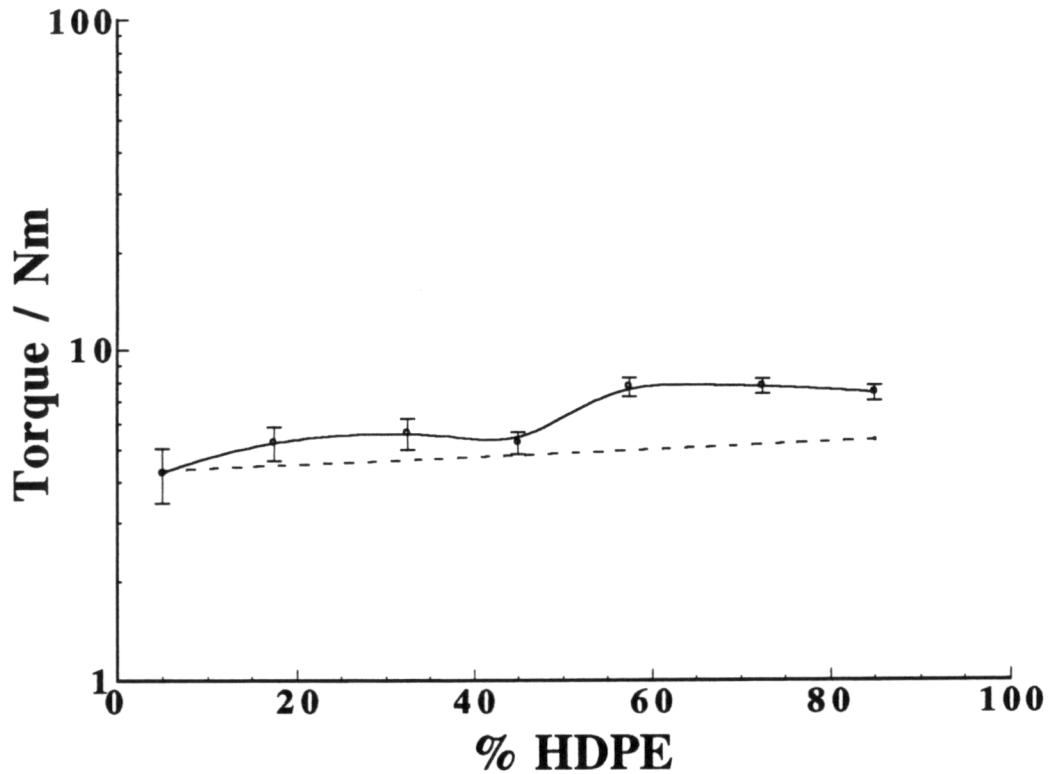


Figura 3.25. Gráfica del torque de extrusión en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 10 % de PBR constante.

Una vez que han sido extruidas las mezclas se efectúan las pruebas de deformación unidireccional, obteniéndose curvas similares a las mostradas en la gráfica de la figura 3.4 como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.26. De dichas pruebas se determinan las elongaciones en el punto de ruptura, esfuerzos máximos y a cedencia, así como los módulos de Young y las Energías necesarias para las rupturas de las muestras, dichos valores son representados en forma gráfica como podrá observarse en figuras 3.27 a 3.31.

La figura 3.27 se muestran las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, así como sus respectivas incertidumbres y la línea (punteada) que se obtiene al utilizar la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que todas las mezclas muestran una drástica disminución en la propiedad en estudio, pero siendo menor en los extremos, es decir, para las mezclas que contienen 5/85/10 y 85/5/10 (HDPE/LDPE/PBR respectivamente), este tipo de comportamiento podría ser indicativo de una mala adhesión de los componentes e incluso una posible segregación de fases, con lo cual se podrá concluir que las mezclas se ven afectadas negativamente con 10 % de PBR, esta aseveración se vera más clara cuando se presente la evaluación del elastómero en las mezclas de los dos polietilenos a contenidos fijos de PBR, dicha discusión se presenta en la siguiente sección.

En la gráfica 3.28 se presenta el esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE (con sus respectivas incertidumbres), en donde también se ilustra la línea que representa a los valores que se obtienen al utilizar la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que en general la propiedad en estudio se ve afectada, observándose que esta disminución cree aún más a contenidos mayores de 45 % de HDPE. En cambio en la gráfica de la figura 3.29 donde se muestra el esfuerzo a la cedencia al 2 % de elongación, en función del contenido de HDPE, la disminución de la propiedad se nota menos afectada que los esfuerzos máximos, más aún, en un pequeño intervalo la propiedad casi no se ve afectada, en donde dicho intervalo es de 5 a 30 % de HDPE aproximadamente, pero a partir de este último valor se ve ligeramente

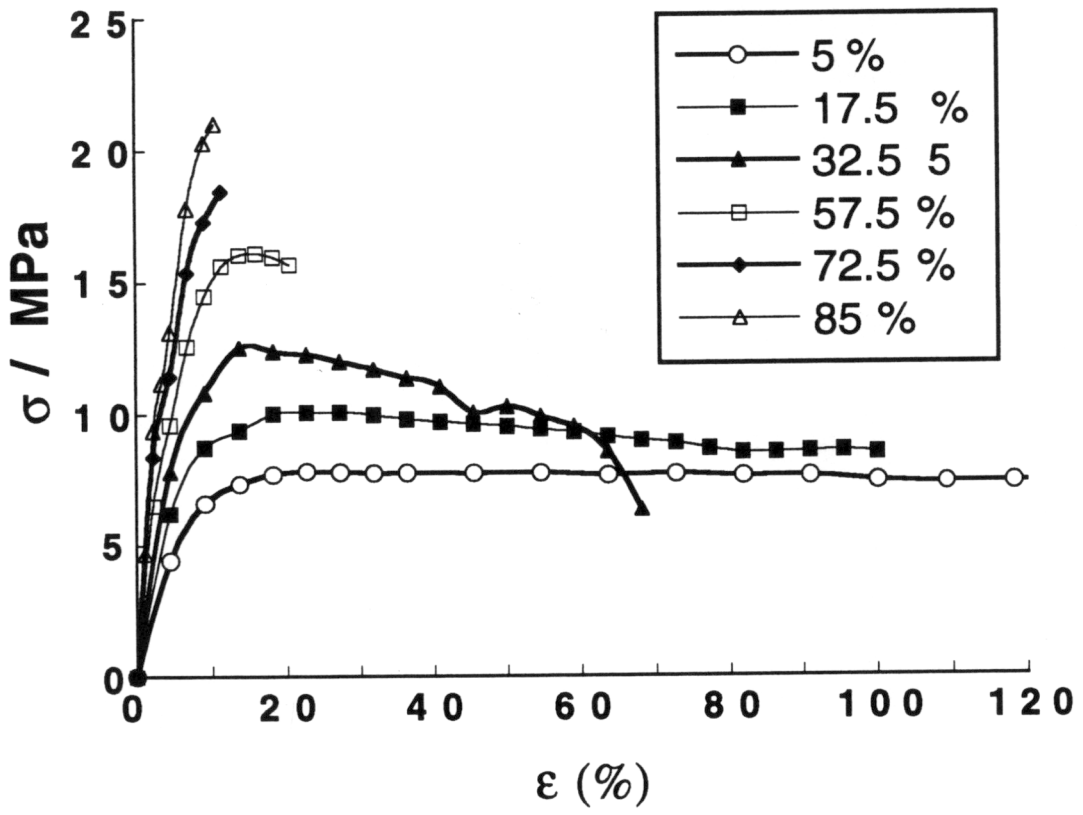


Figura 3.26. Gráfica de esfuerzo-deformación para mezclas con 10 % de PBR y diferentes concentraciones de HDPE /LDPE . El recuadro da el porcentaje de HDPE.

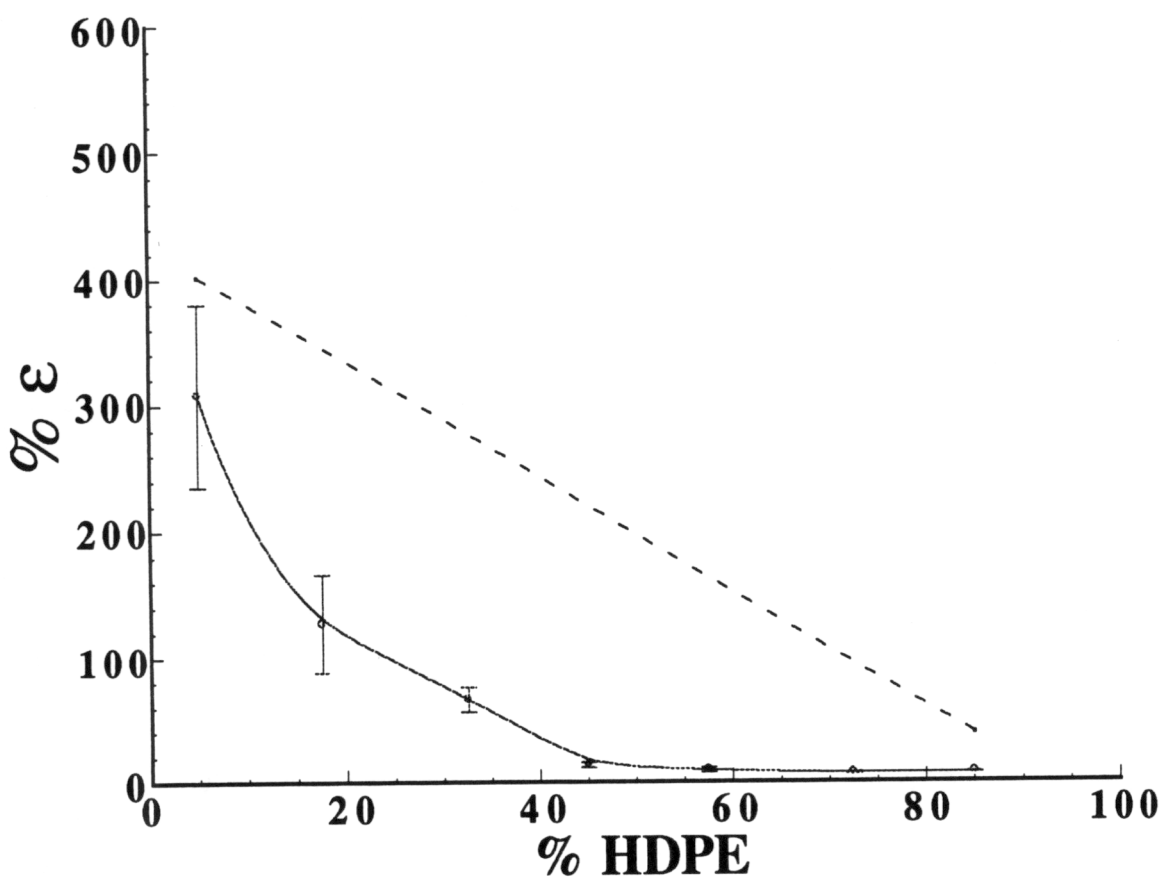


Figura 3.27. Gráfica del % de elongación en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 10 % de PBR constante.

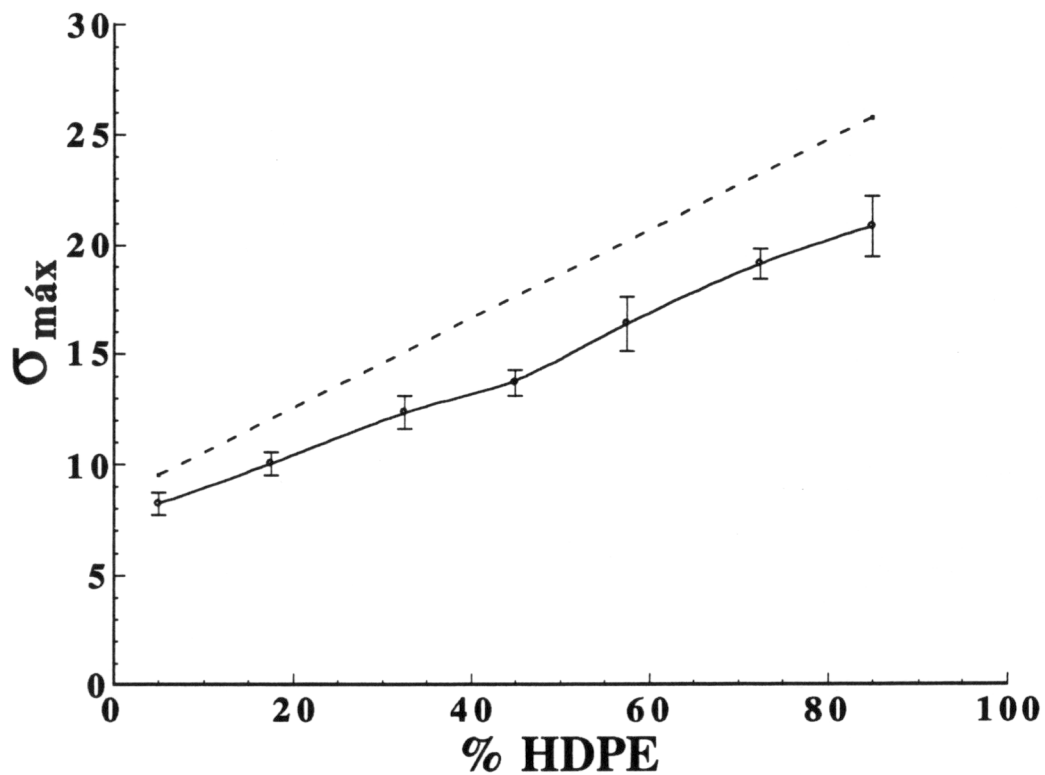


Figura 3.28. Gráfica del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 10 % de PBR constante.

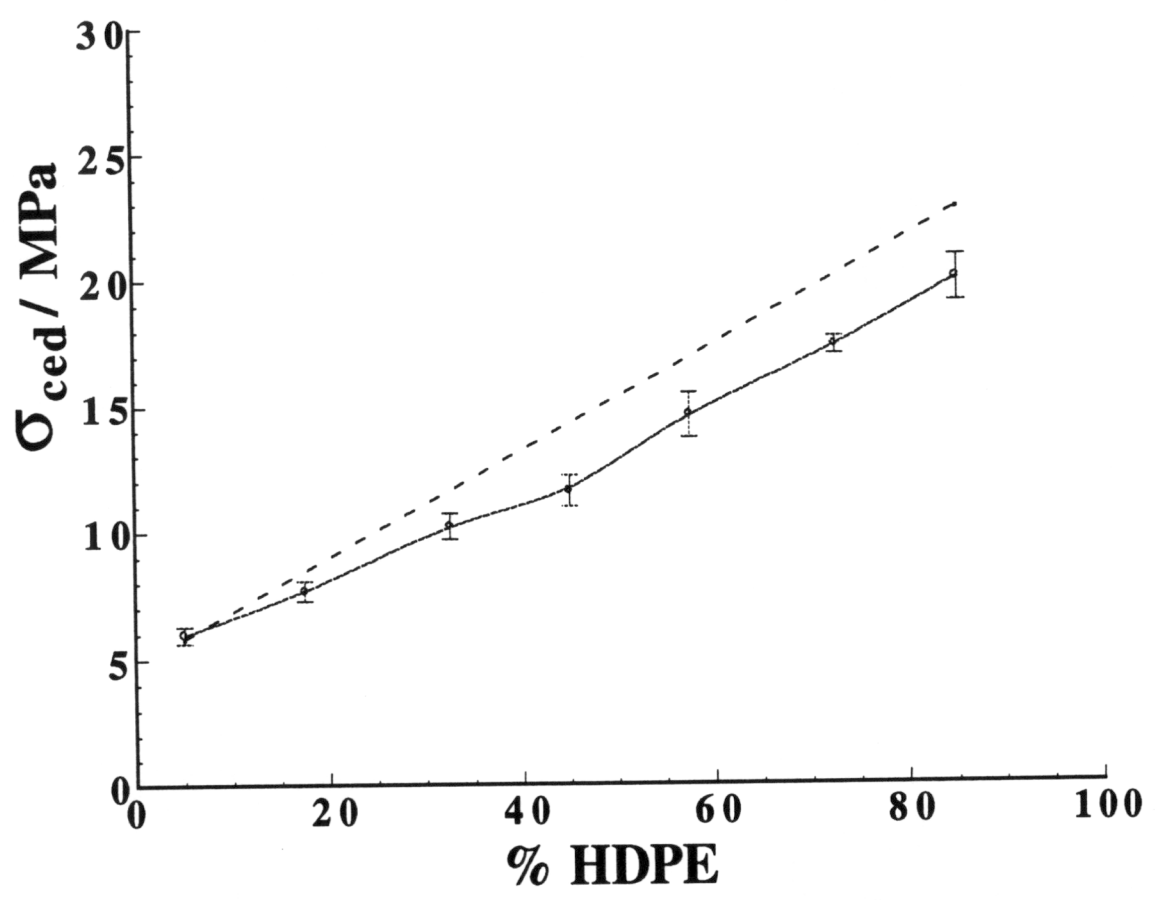


Figura 3.29. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR. Con 10 % de PBR.

afectada la propiedad. En general las propiedades del esfuerzo máximo y de cedencia no se ven beneficiadas a un contenido constante de 10 % de PBR, si no al contrario estas se ven disminuidas, como podrá observarse en las gráficas (3.28 y 3.29) al comparar los resultados experimentales con los resultados que se obtienen al utilizar la regla de aditividad.

En la figura 3.30 se presenta el comportamiento del módulo de Young en función del contenido de HDPE, los valores se presentan con sus respectivas incertidumbres, en donde también esta representada la línea que se obtiene al utilizar la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que las mezclas que se encuentran principalmente en los extremos, no sufren alteración alguna; en cambio las mezclas que se encuentran contenidas en el intervalo de 20 a 95 % de contenido de HDPE, la propiedad en estudio resulta afectada. Este tipo de comportamiento es similar al observado en la resistencia al impacto, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.27, en la cual es representado el comportamiento de la Energía necesaria para la ruptura de las muestras en función del contenido de HDPE, así como la línea que describe a los valores de la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que la resistencia al impacto cae drásticamente a medida que se incrementa el contenido de HDPE, notándose que las caídas son menores en las mezclas que se encuentran en los extremos del intervalo de composición.

Una vez que las mezclas han sido sometidas a pruebas de deformación unidireccional, estas también son sometidas a dispersión de rayos-X, con la finalidad de determinar el grado de cristalinidad. De las pruebas realizadas se obtienen espectros similares a los mostrados en la figura 3.2, de donde es determinada la cristalinidad para cada una de las mezclas, los valores obtenidos se presentan en forma gráfica. En la gráfica de la figura 3.32 se presenta el porcentaje de cristalinidad en función del contenido de HDPE, en donde las etiquetas que representan dichos valores, son del mismo orden de magnitud que las incertidumbres asociadas a todos los datos obtenidos experimentalmente. En dicha gráfica se puede observar que la

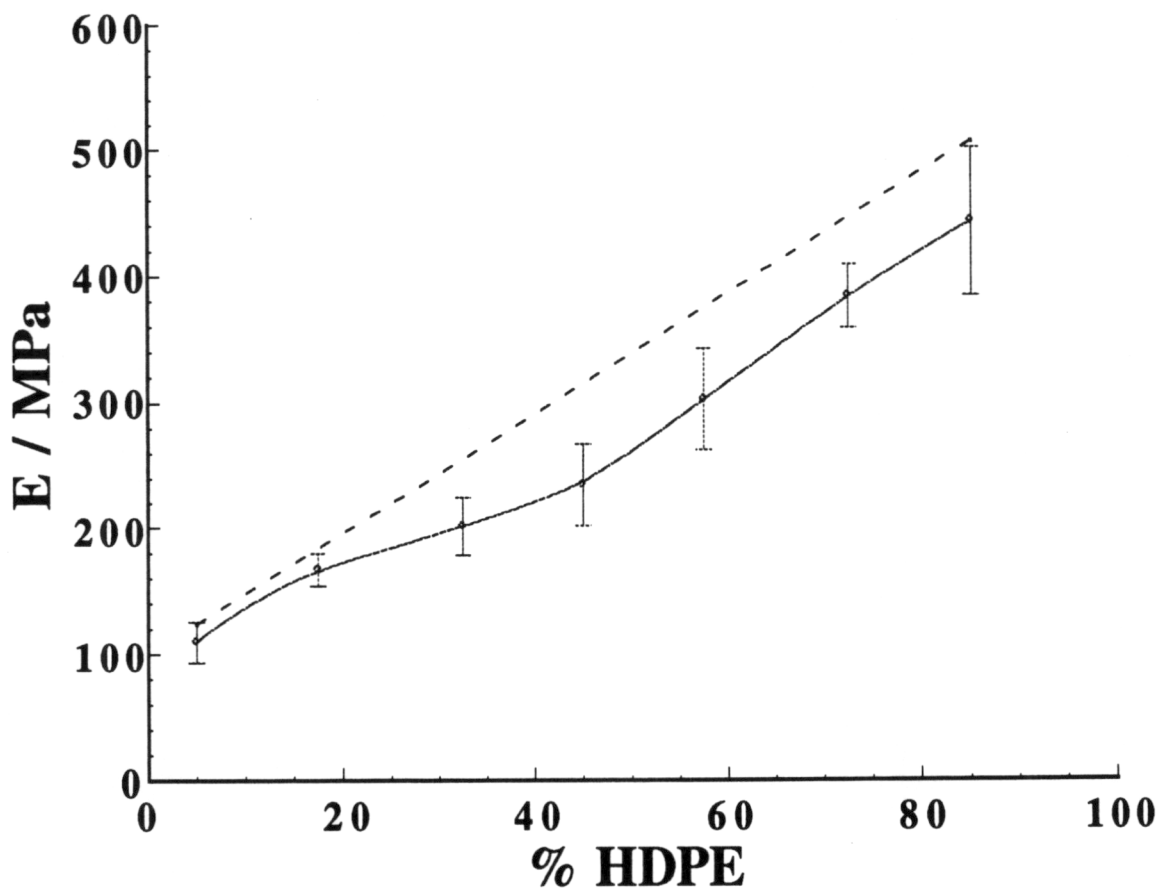


Figura 3.30. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR, con 10 % de PBR.

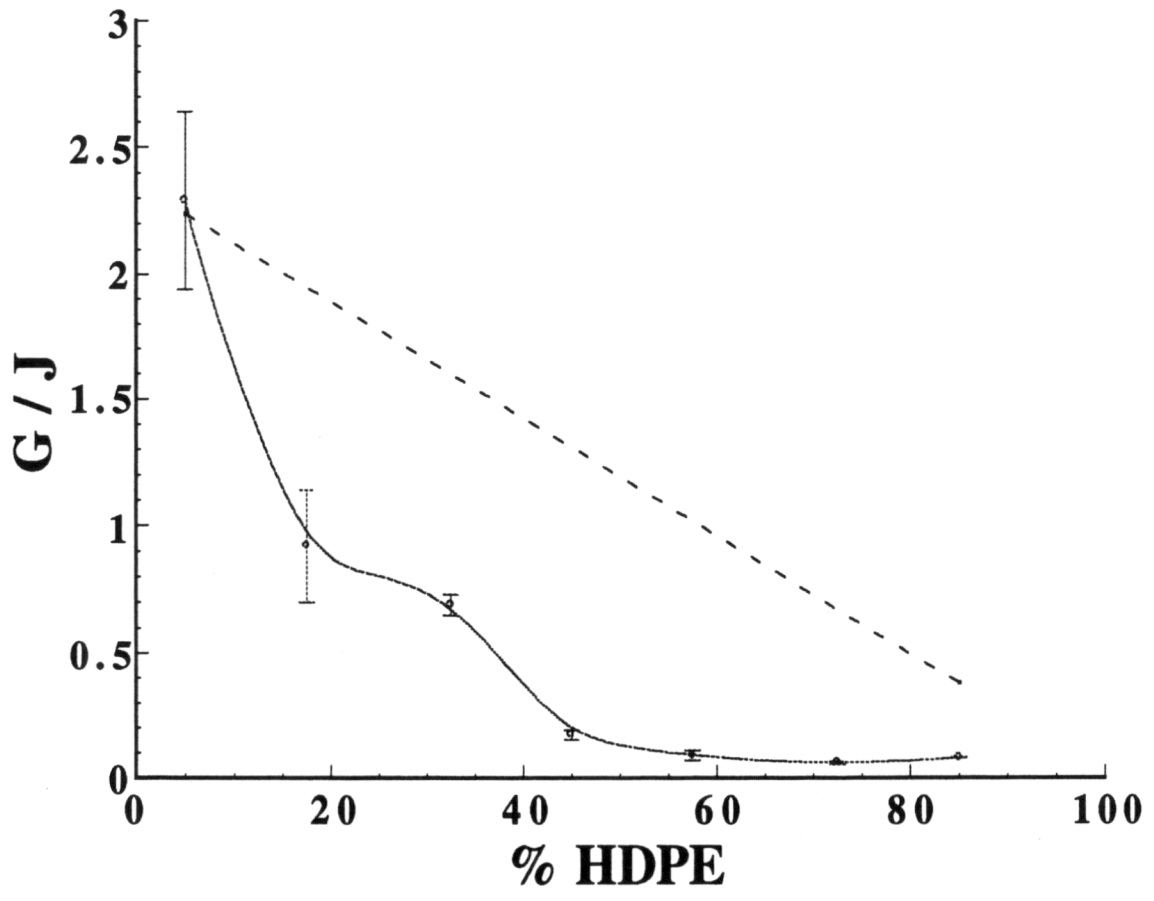


Figura 3.31. Gráfica de la energía necesaria para la ruptura en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/PBR, con 10 % de PBR.

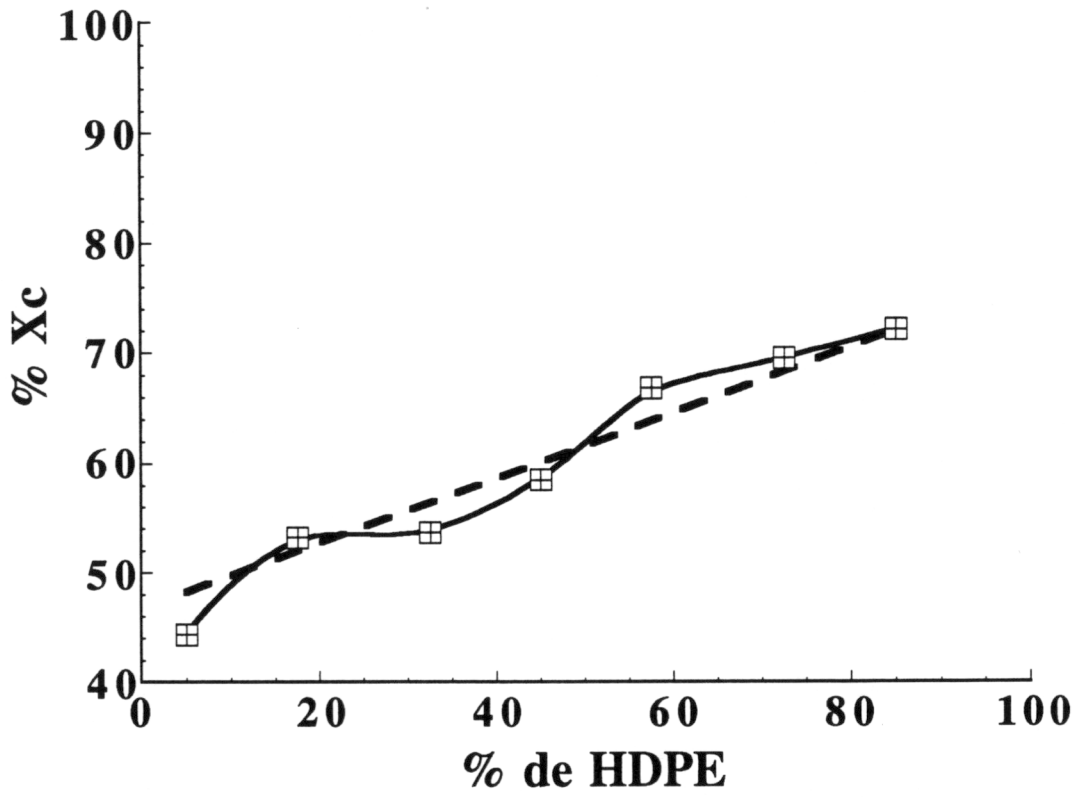


Figura 3.32. Gráfica del porcentaje de cristalinidad (% Xc) como función del contenido de HDPE para mezclas con 10 % de PBR.

cristalinidad tiende a aumentar con el contenido de HDPE, pero presenta fluctuaciones, las cuales no son fáciles de explicar; de aquí que únicamente se realiza la comparación cuantitativa de los resultados experimentales, con los resultados que se obtienen al utilizar la regla de aditividad, dichos resultados son representados con una línea punteada (ver figura 3.32).

En la gráfica de la figura 3.32 se observa que al comparar los resultados, la cristalinidad se ve ligeramente afectada en el intervalo de 25 a 48 % de HDPE aproximadamente, en donde se observa una desviación negativa la cual indica una ligera disminución; en cambio en el intervalo restante se obtiene una ligera ganancia la cual está representada con desviaciones positivas, indicativas de una ganancia, con lo cual se dice que la propiedad se ve beneficiada y por lo tanto desde el punto de vista de propiedad mecánica, se podrá considerar que existe un pequeño intervalo de compatibilidad.

En general las propiedades mecánicas en las mezclas ternarias con 10 % de PBR constante, se ven afectadas negativamente casi en todo el intervalo de composición, excepto en los extremos, en donde aparentemente las propiedades son similares a las que se obtienen con la regla de aditividad.

c) Análisis Global de las Mezclas con 0, 5 y 10 % de PBR.

Una vez que se han analizado las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias a 5 y 10 % de contenido de PBR constante, ahora realizamos una comparación cuantitativa de dichas mezclas con las mezclas binarias de los dos polietilenos (dichas mezclas se consideran como las mezclas con 0 % de PBR), y a su vez son comparados con los resultados obtenidos con la regla de aditividad. Dicho estudio comparativo se inicia con los torque de extrusión, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.33; para pasar posteriormente a las elongaciones en el punto de ruptura (figura 3.34), esfuerzo máximo (figura 3.35), esfuerzo a la cedencia (figura 3.36), módulo de Young (figura 3.37), energía (figura 3.38) y por último la cristalinidad (figura 3.39).

En la gráfica de la figura 3.33 se muestra el torque de extrusión en función del contenido de HDPE para diferentes contenidos de PBR. En dicha gráfica se observa que la influencia del elastómero es mínima en el intervalo de 0 a 50 % de HDPE aproximadamente, en cambio a medida que se incrementa el contenido de HDPE, el torque de extrusión se ve fuertemente afectado; pero a medida que se incrementa el contenido de PBR, tiende a disminuir, con lo cual se va mejorando la procesabilidad en el intervalo restante. Se podría pensar que si se sigue incrementando ligeramente el contenido de PBR la procesabilidad tendería a igualarse a la que se obtiene con la regla de aditividad e inclusive mejora notablemente, pero esto no es el objetivo de la investigación, ya que el disminuir los torque de extrusión nos llevaría a disminuir algunas de las propiedades restantes.

En la gráfica de la figura 3.34 se presentan las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, para diferentes contenidos de PBR constante, en dicha gráfica se observa que a medida que se incrementa el contenido de HDPE por un lado, y por otro lado se incrementa el contenido de PBR, se observa que la propiedad en estudio se ve fuertemente afectada, excepto en un pequeño intervalo

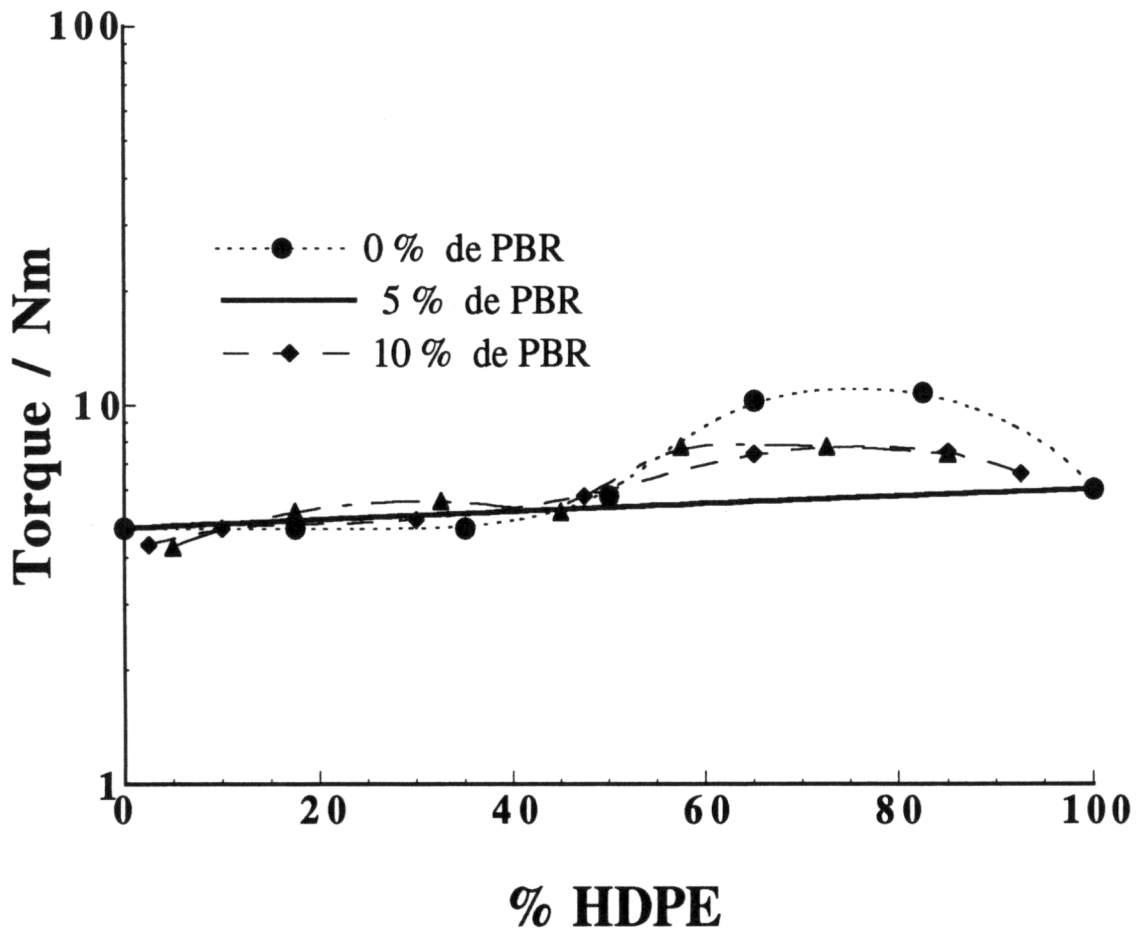


Figura 3.33. Gráfica del torque de extrusión en función del contenido de HDPE, para diferentes concentraciones de PBR.

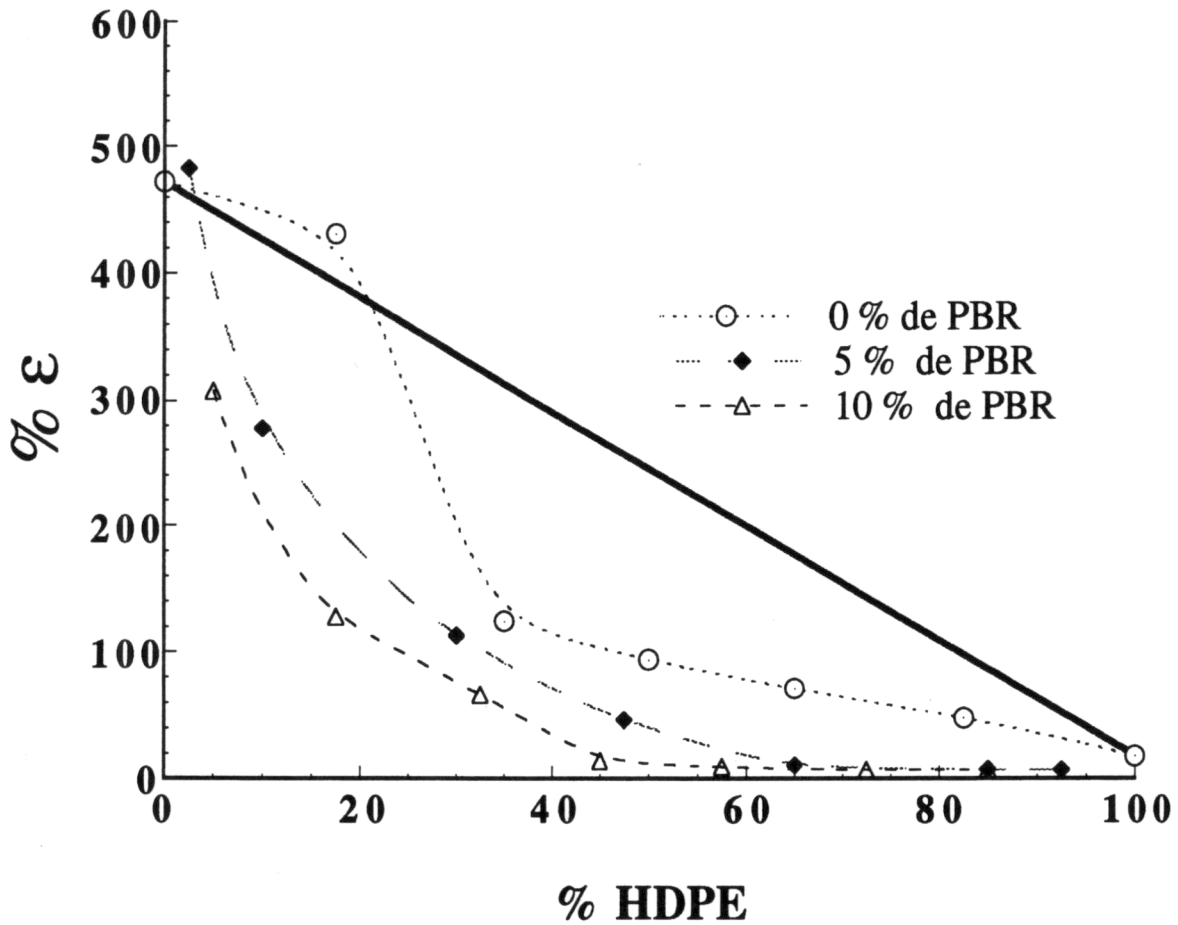


Figura 3.34. Gráfica del % de elongación en función del contenido de HDPE a diferentes contenidos de PBR.

en donde las mezclas con 0 % de PBR (recordando que son las mezclas binarias) se ven ligeramente beneficiadas, en cambio las mezclas con 5 % de PBR también se ven beneficiadas pero en un intervalo mucho más reducido, y dicho intervalo tiende a desaparecer para las mezclas con 10 % de PBR. En general, excepto en estos pequeños intervalos la propiedad se ve afectada fuertemente.

En los esfuerzos máximos se observa que a medida que se incrementa el contenido de PBR, dicha propiedad se ve ligeramente afectada, ya que las desviaciones que se observan al comparar los resultados experimentales con los que se obtienen con la regla de aditividad, se van haciendo mayores, con lo cual la propiedad se ve fuertemente afectada, como podrá observarse en la gráfica de la figura 3.35 en donde se ilustra el comportamiento del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias a diferentes contenidos de PBR constante. En cambio el esfuerzo a la cedencia se ve menos afectado con el incremento del contenido del PBR. En la gráfica de la figura 3.36 se ilustra este comportamiento. En dicha gráfica se observa que las mezclas binarias son muy idénticas a las que se obtienen con la regla de aditividad, especialmente en el intervalo de 0 a 35 % de HDPE aproximadamente, pero a medida que se incrementa el contenido del HDPE la propiedad se ve ligeramente afectada, a valores mayores de PBR, de donde se puede concluir que la propiedad se ve afectada cuando se incrementa el contenido de PBR, es decir, la influencia del PBR tiende a desfavorecer las propiedades.

En lo que se refiere al módulo de Young como podrá observarse en la figura 3.37, donde se ilustra el módulo en función del contenido de HDPE para las mezclas con 0 5 y 10 % de PBR, la propiedad es similar para los tres contenidos en un pequeño intervalo, viéndose desfavorecida en el intervalo de composición restante a medida que se incrementa el contenido de HDPE, con la variante que las mezclas binarias (0 % de PBR) son más similares a los que se obtienen con la regla de aditividad, con lo cual se demuestra que la propiedad en estudio se ve afectada a medida que se incrementa los contenidos de PBR. Cabe mencionar que en el primer intervalo mencionado, la

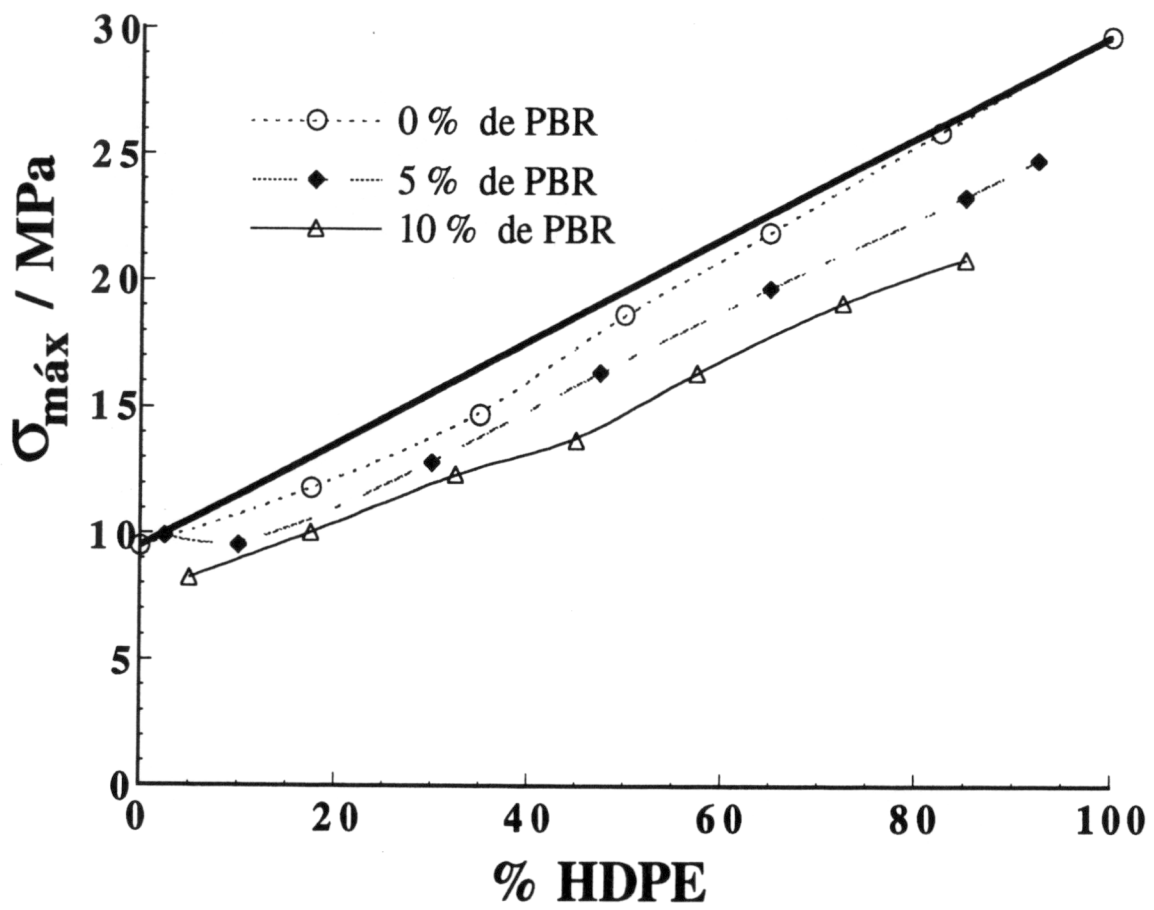


Figura 3.35. Gráfica del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, para diferentes contenidos de PBR.

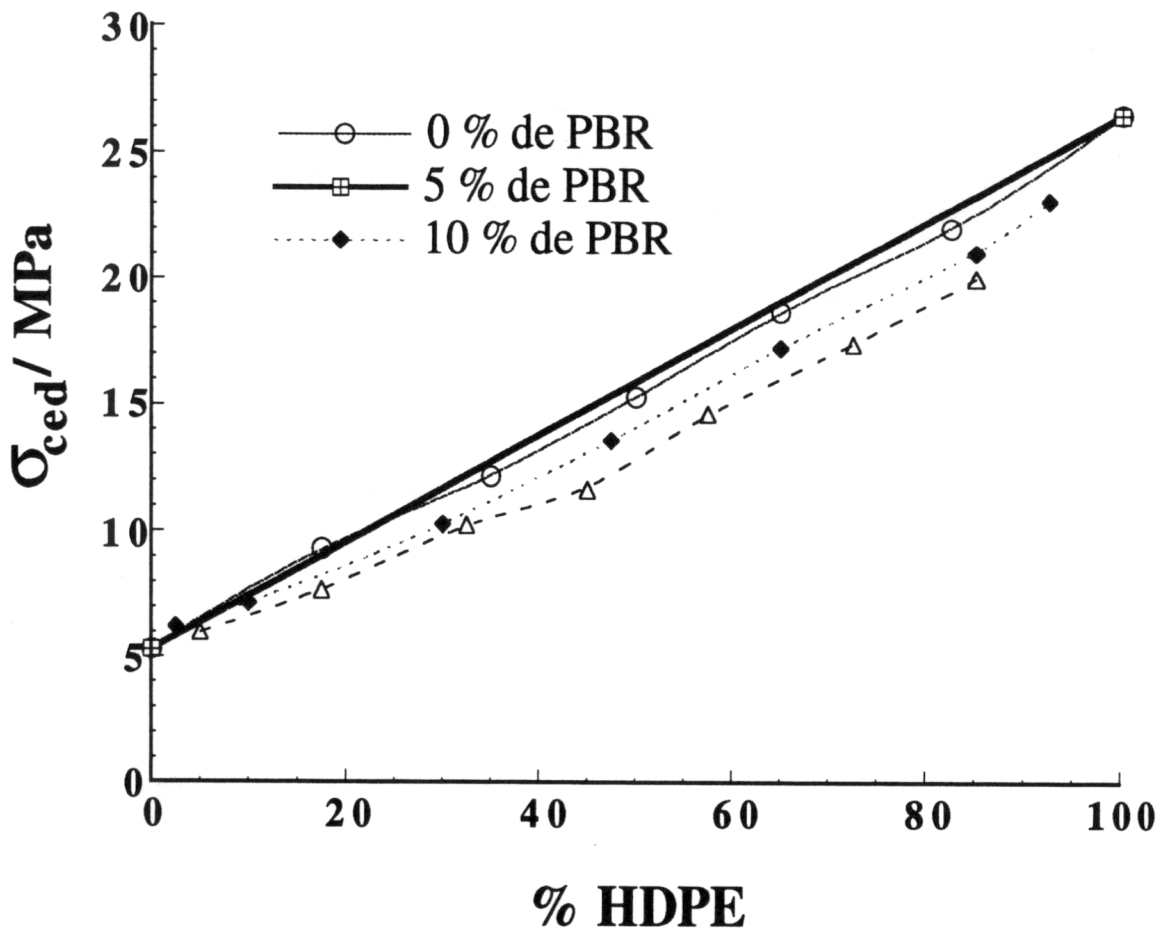


Figura 3.36. Gráfica del esfuerzo a la cendecia en función del contenido de HDPE, para diferentes contenidos de PBR.

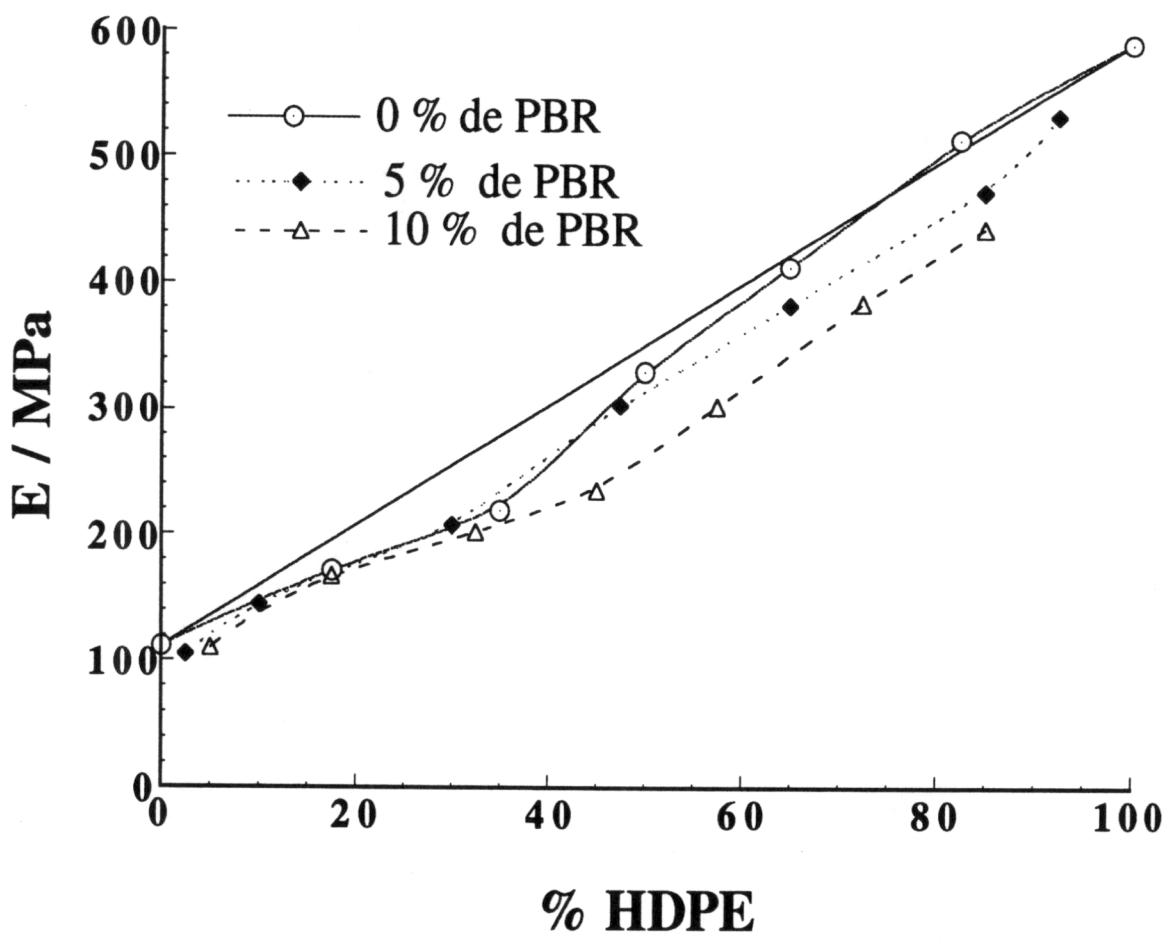


Figura 3.37. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de HDPE, para diferentes contenidos de PBR.

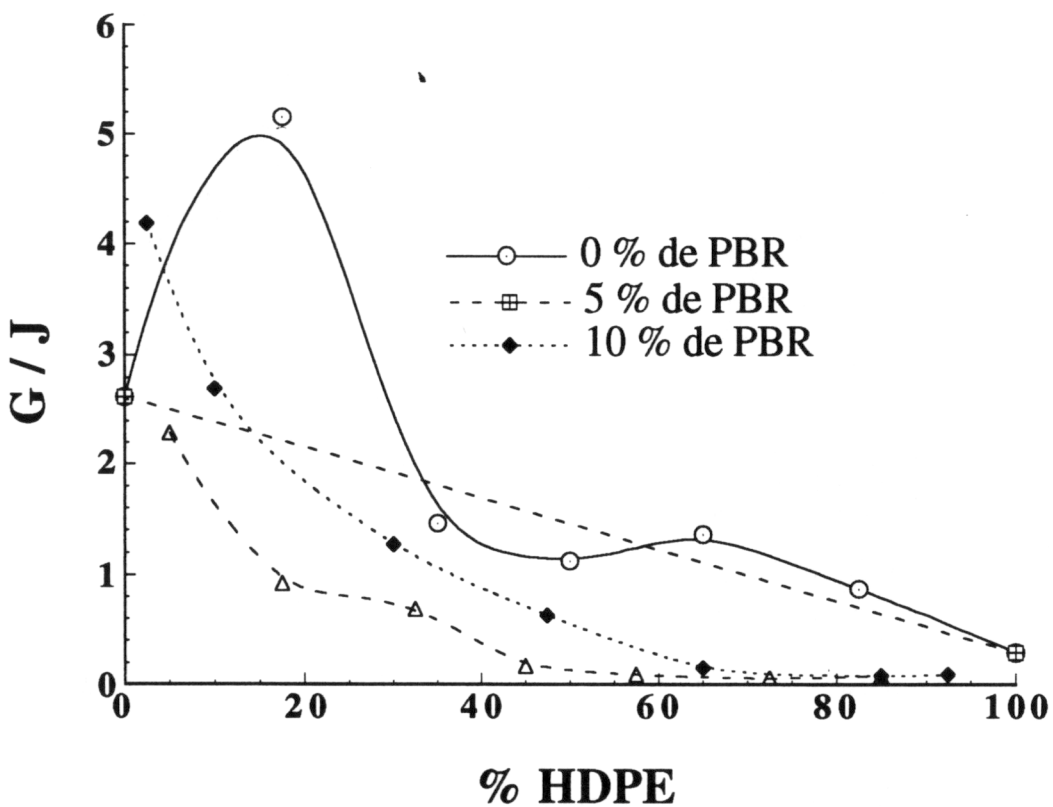


Figura 3.38. Gráfica del la Energía necesaria para la ruptura de las mezclas en función del contenido de HDPE, a diferentes contenidos de PBR.

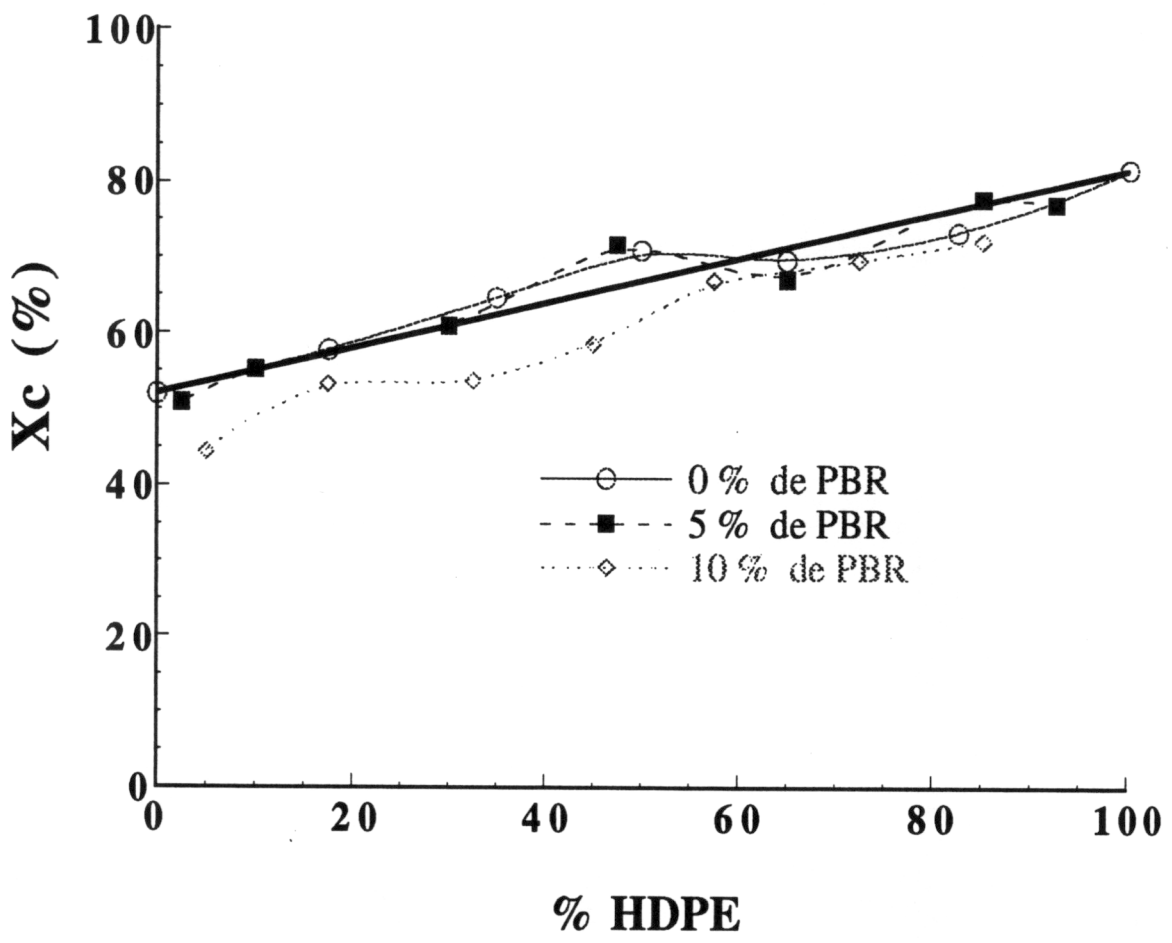


Figura 3.39. Gráfica de la cristalinidad (Xc) como función del contenido de HDPE, en mezclas con 0, 5 y 10 % de PBR.

propiedad en estudio es similar a la que se obtiene con la regla de aditividad, en donde la propiedad no se ve afectada para los tres contenidos de PBR como se ha mencionado anteriormente, en cambio en el intervalo de 65 a 100 % , las desviaciones para las mezclas binarias desaparecen y para las mezclas con 5 y 10 % tienden a aumentar, reflejandose en una disminución en la propiedad.

En cambio en la energía necesaria para la ruptura de las muestras, como podra observarse en la figura 3.38, en donde se ilustra el comportamiento de la resistencia al impacto en función del contenido del PBR, se observa claramente que a medida que se incrementa el contenido del elastómero la propiedad se ve fuertemente afectada, ya que en las mezclas binarias se obtiene un intervalo en donde la propiedad se ve fuertemente beneficiada, pero a medida que se incrementa el contenido de PBR, estas ganancias tienden a disminuir drásticamente, con lo cual se ve la influencia negativa del elastómero en todo el intervalo de composición.

En la gráfica de la figura 3.39 se presenta el comportamiento del porcentaje de cristalinidad en función del contenido de HDPE para los tres contenidos de elastómero, en donde se observa una mayor complejidad en cuanto a los resultados obtenidos. Por ejemplo las mezclas con 0 y 5 % de PBR se ven beneficiadas en el intervalo de 0 a 60 % de HDPE aproximadamente, para verse afectadas en el intervalo restante. En cambio las que contienen 10 % de PBR muestran en general una disminucion en todo el intervalo de composicion.

CAPITULO 4

MEZCLAS DE HDPE/LDPE/EPDM

En este capítulo se presenta el análisis y discusión de las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias de HDPE / LDPE / EPDM (etileno-propileno-dieno), en todo el intervalo de composiciones descrito en la parte experimental, comenzando con las propiedades de las mezclas 1:1 (mismas proporción de HDPE y LDPE) en función del contenido del EPDM; para pasar posteriormente a las mezclas con contenidos fijos de EPDM; iniciando con las mezclas a 5 % de EPDM y pasando posteriormente a las mezclas con 10 % de EPDM constante.

El análisis de las propiedades es iniciado con los torques de extrusión (τ) los cuales son asociados con la procesabilidad; posteriormente se analizan las pruebas de deformación unidireccional las cuales consisten en: elongaciones en el punto de ruptura ($\% \epsilon$); esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$); esfuerzo a la cedencia (σ_{ced}) al 2 % de elongación; módulo de young (E) y la Energía necesaria (G) para la ruptura de las muestras, en donde dicha energía es asociada con la resistencia al impacto.

4.1. Mezclas 1:1, en función del contenido de EPDM.

En esta sección se discute y analiza la influencia del elastómero (en este caso la del EPDM) en las mezclas de los dos polietilenos a las mismas concentraciones, es decir, en mezclas 1:1. Las composiciones empleadas son de 5, 10, 17.5 y 24 % de contenido de EPDM, incluyendo además las mezclas de los dos polietilenos sin elastómero, dichas mezclas son renombradas como las mezclas con 0 % de EPDM. La discusión se inicia con los torques de extrusión, pasando posteriormente a las elongaciones en el punto de ruptura, esfuerzos máximo y a la cedencia (al 2 % de deformación), módulo de young y la energía para la ruptura de las muestras, la cual es asociada con la resistencia al impacto.

El estudio es iniciado con los torques de extrusión de las mezclas 1:1 en función del contenido de EPDM. Las condiciones de extrusión son las utilizadas en las mezclas que contienen PBR, es decir, a 180 °C de temperatura, en el cañón y dado y 25 rpm, las condiciones de extrusión se eligieron en base a lo espuesto en la parte experimental. De la extrusión se obtienen directamente los torques de extrusión, los cuales son asociados a la procesabilidad de las mezclas, ya que entre más alto sea el torque, más trabajo realiza el tornillo del extrusor al transportar el material en estado fundido a través del cañón; y cuando los torques tienden a disminuir, se presenta una ganancia en cuanto a procesabilidad, ya que el trabajo tiende a disminuir. Los torques son obtenidos en forma gráfica, de donde se determina el torque que se asociará a cada una de las mezclas (que en esta parte es de siete), así como la incertidumbre, la cual es diferente para cada una de las mezclas. Una vez que se han determinado los torques de extrusión para cada una de las mezclas estos son presentados en forma gráfica para su descripción y discusión.

En la gráfica de la figura 4.1 se presentan los torques de extrusión en función del contenido de EPDM, para las mezclas 1:1, así como las incertidumbres asociadas y la línea que representa los valores obtenidos con la regla de aditividad (línea recta); en dicha gráfica se observa que el torque se incrementa fuertemente en el intervalo de 0 a 5 % de EPDM, con lo cual se ve fuertemente incrementado el trabajo que realiza el tornillo del extrusor al transportar las mezclas, que se encuentran contenidas en dicho intervalo, pero a partir de este último valor el torque tiende a estabilizarse, es decir, permanece casi constante en todo el intervalo de composición restante. A modo de conclusión, se tiene que en general todas las mezclas 1:1 en función del contenido de EPDM se ven desfavorecidas, con lo cual indica que la procesabilidad se incrementa hasta alcanzar un valor máximo (fijo) a medida que se incrementa el contenido del elastómero, ya que los valores experimentales presentan desviaciones negativas al ser comparados con la línea que representa a la regla de aditividad. El comportamiento que presenta el torque de extrusión será relacionado con las demás pruebas en estudio, para de esta forma determinar la influencia del elastómero.

Una vez que las mezclas han sido extruidas, del material obtenido en forma de láminas, se prepara probetas tipo hueso, para poder ser sometidas a las mismas pruebas de deformación unidireccional practicadas a las mezclas que contienen PBR, en una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron), a las mismas condiciones a las que se practicarán las mezclas con PBR (temperatura ambiente y una velocidad de cruceta de 20 mm/min). De las pruebas realizadas se obtienen las curvas de esfuerzo-deformación, las cuales se muestran en la figura 4.2, en donde se observa claramente la influencia del EPDM. De las curvas de esfuerzo-deformación de cada una de las mezclas se determinan las elongaciones en el punto de ruptura; esfuerzo máximo, que es el punto en donde los esfuerzos alcanzan su valor máximo; esfuerzo a la cedencia, que es el punto en donde las muestras se consideran que tienden a fluir, y se considera que es aproximadamente al 2 % de elongación; módulo de young, que representa la pendiente inicial de las curvas esfuerzo-deformación, y por último la energía que es

necesaria para la ruptura de las muestra, dicha energía es asociada a la resistencia que presentan las mezclas al impacto, es decir, resistencia al impacto. Los valores obtenidos para cada una de las propiedades son presentados en forma gráfica para una mejor descripción y discusión, como podrá observarse en las figuras 4.3 a 4.7.

De las curvas esfuerzo-deformación mostradas en la figura 4.2 se determinan las elongacione en los punto de ruptura de las mezclas 1:1 en función del contenido de EPDM, los valores que se obtienen se presentan en forma gráfica. En la figura 4.3 se presenta el comportamiento de las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de EPDM, en donde los valores determinados para cada una de las muestras es presentado cos sus respectivas incertidumbres, asi como también se ilustra la línea que representa los valores que se obtienen al utilizar la regla de aditividad. De dicha gráfica se observa claramente que la influencia del elastómero en el intervalo de 0 a 17 % de EPDM es negativa ya que las rupturas se presentan a menores elongaciones que las que presentarón las mezclas binarias (mezclas sin elastómero), con lo cual se considera una disminución, a pesar que aparentemente cuando los torque (que se pueden asociar también con la viscosidad) presentan desviaciones negativas, se asegura que la muestra esta compuesta por "granos" pequeños, con lo cual se podría pensar que en dichas composiciones se podría favorecer la adhesión de los componentes, pero sin embargo no es nuestro caso, ya que en este pequeño intervalo a pesar de incrementarse los torques de extrusión, aparentemente la adhesión de los componentes es mala ya que las rupturasde las mezclas 1:1 se presentan a menores elongaciones que las mezclas 1:1 sin elastómero.

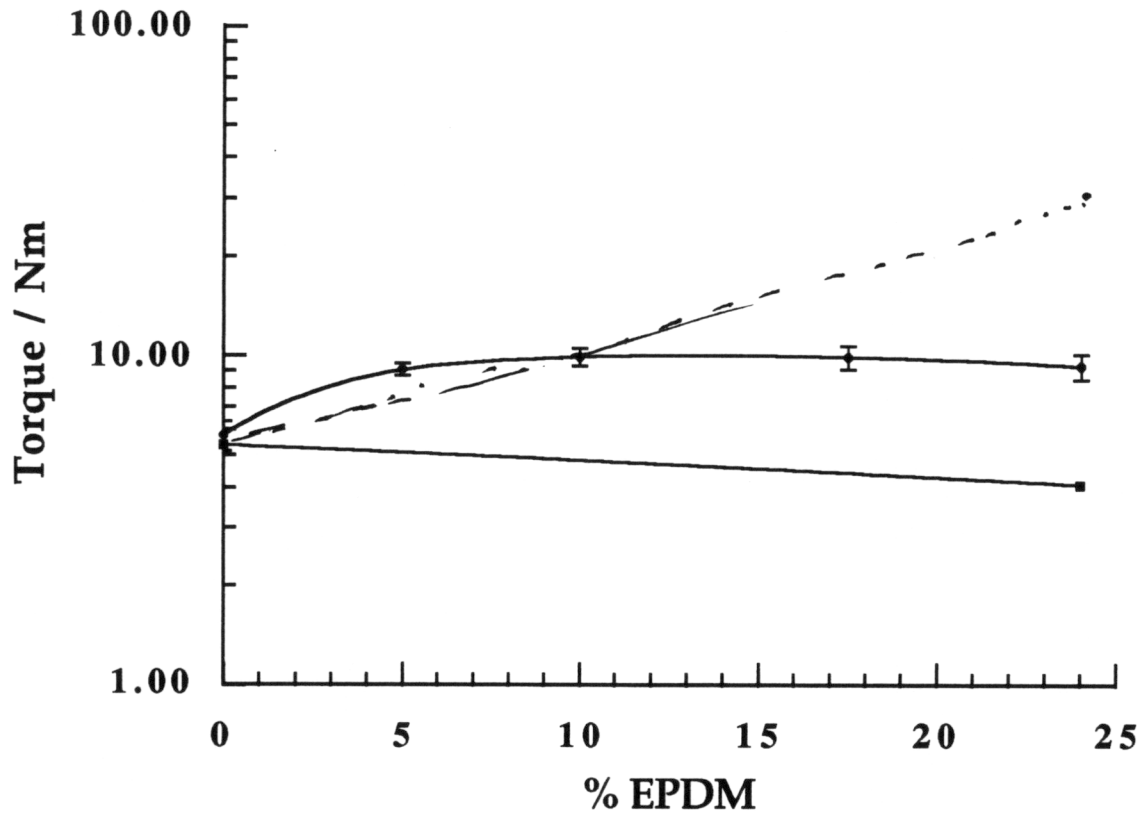


Figura 4.1. Gráfica del torque de extrusión en función del contenido de EPDM, para mezclas 1:1.

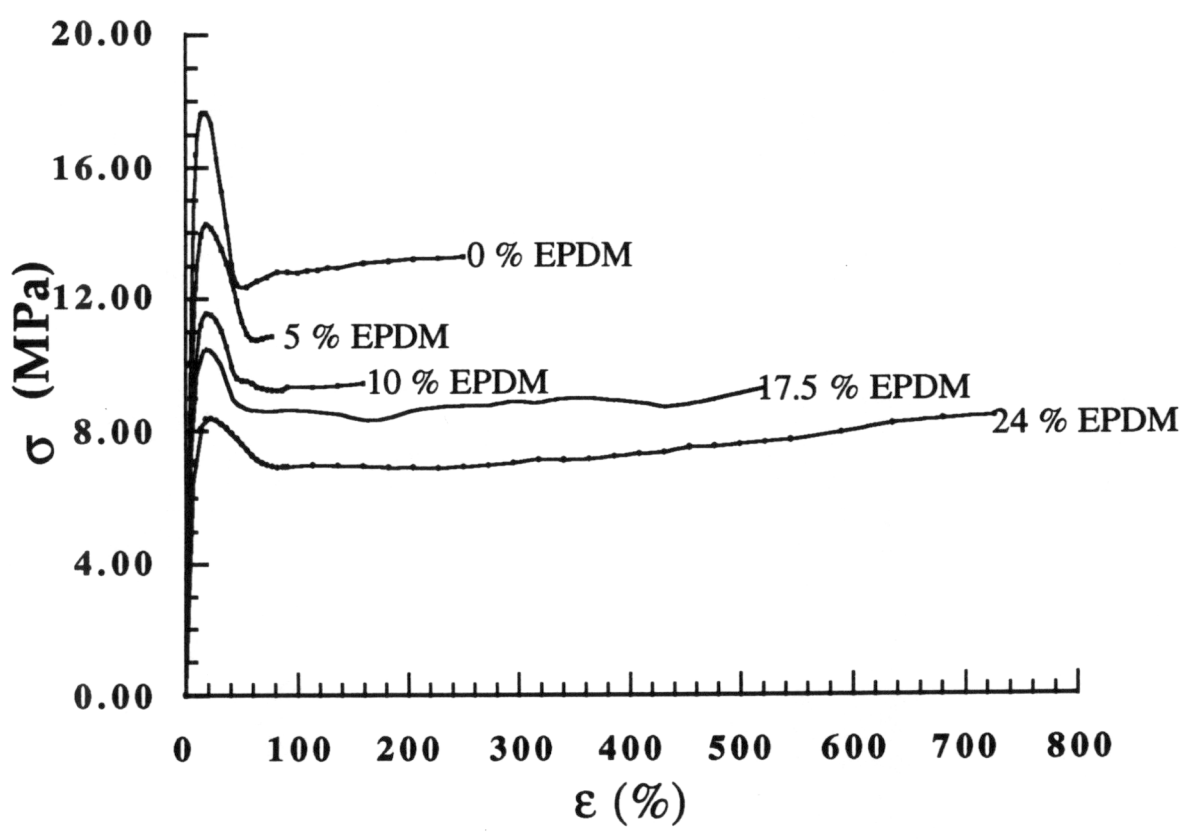


Figura 4.2. Gráficas de esfuerzo-deformacion para mezclas 1:1, variando el contenido de EPDM.

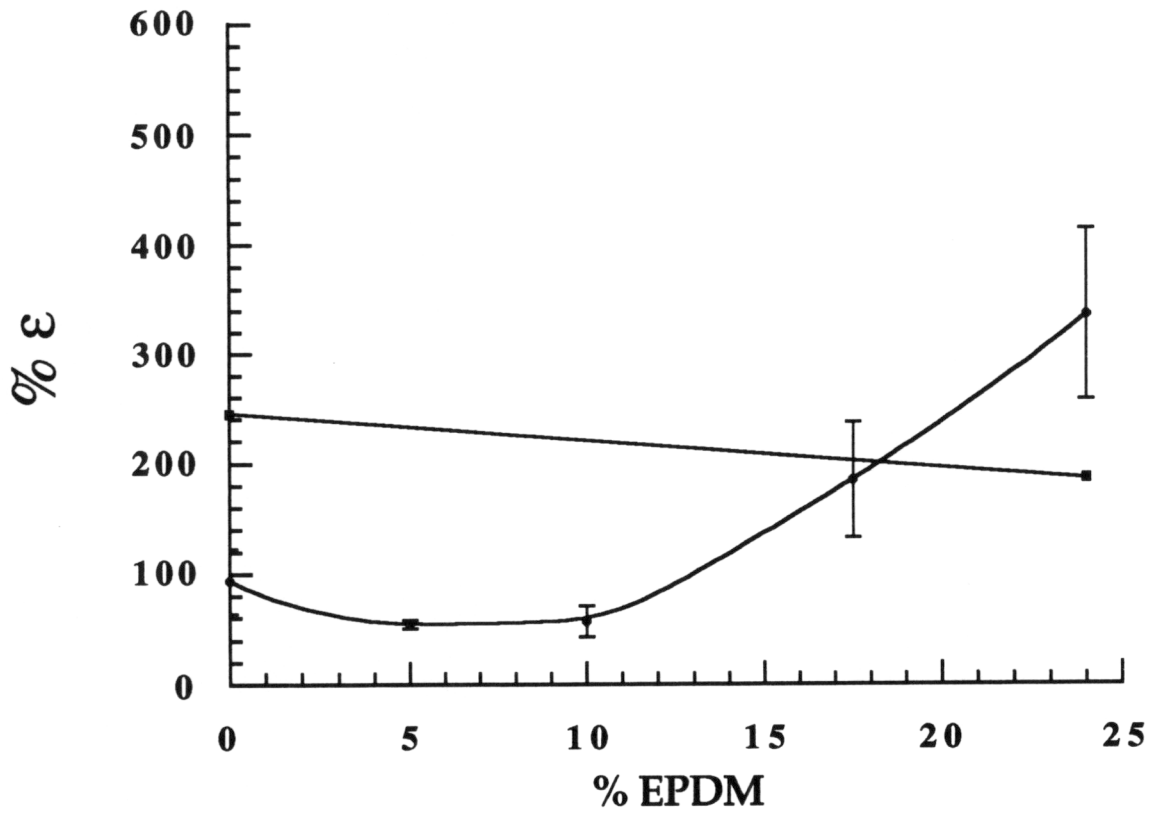


Figura 4.3. Gráfica de elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de EPDM, para mezclas 1:1.

Pero a partir del último valor (es decir, a partir del 17 % de EPDM) se nota una ligera ganancia en la elongaciones, ya que como podrá observarse a contenidos mayores del 17 % de EPDM se observa una desviación positiva. Al comparar los datos experimentales con los que se obtienen con la regla de aditividad se observa en este intervalo se presenta una desviación negativa, la cual es indicativa de una ganancia en la propiedad, esta ganancia podría ser indicativa de una buena adhesión de los componentes, reflejandose en mayores elongaciones en los puntos de ruptura, primero comparando los resultados obtenidos con la mezcla sin elastómero y después con las mezclas que contienen contenidos mayores a 17 % de elastomero, con lo cual la influencia del mismo es positiva en las elongaciones en el punto de ruptura.

Al igual que se obtuvieron las elongaciones en el punto de ruptura se obtienen los esfuerzos máximos y los esfuerzos a la cedencia, en donde los valores que se obtienen también se presentan en forma gráfica como podrá observarse en las figuras 4.4 y 4.5. En la gráfica de la figura 4.4 se ilustra el comportamiento del esfuerzo máximo en función del contenido de EPDM, en donde a cada valor determinado se le asocia su respectiva incertidumbre, en dicha gráfica también se presentan los valores obtenidos con la regla de aditividad, los cuales son representados por la línea recta. En dicha gráfica se observa que el esfuerzo máximo tiende a disminuir casi linealmente a medida que se incrementa el contenido de EPDM; dicho comportamiento es casi igual al que se obtiene con la regla de aditividad, es decir, la propiedad disminuye en forma casi lineal a medida que se incrementa el contenido de EPDM. Si se comparan los resultados experimentales con los resultados que se obtienen al utilizar la regla de aditividad, se observa que los datos experimentales presentan en todo el intervalo de composición una ligera desviación negativa, aumentando ligeramente a medida que se incrementa el contenido de EPDM, lo cual es indicativo de que la propiedad en estudio se ha visto ligeramente desfavorecida.

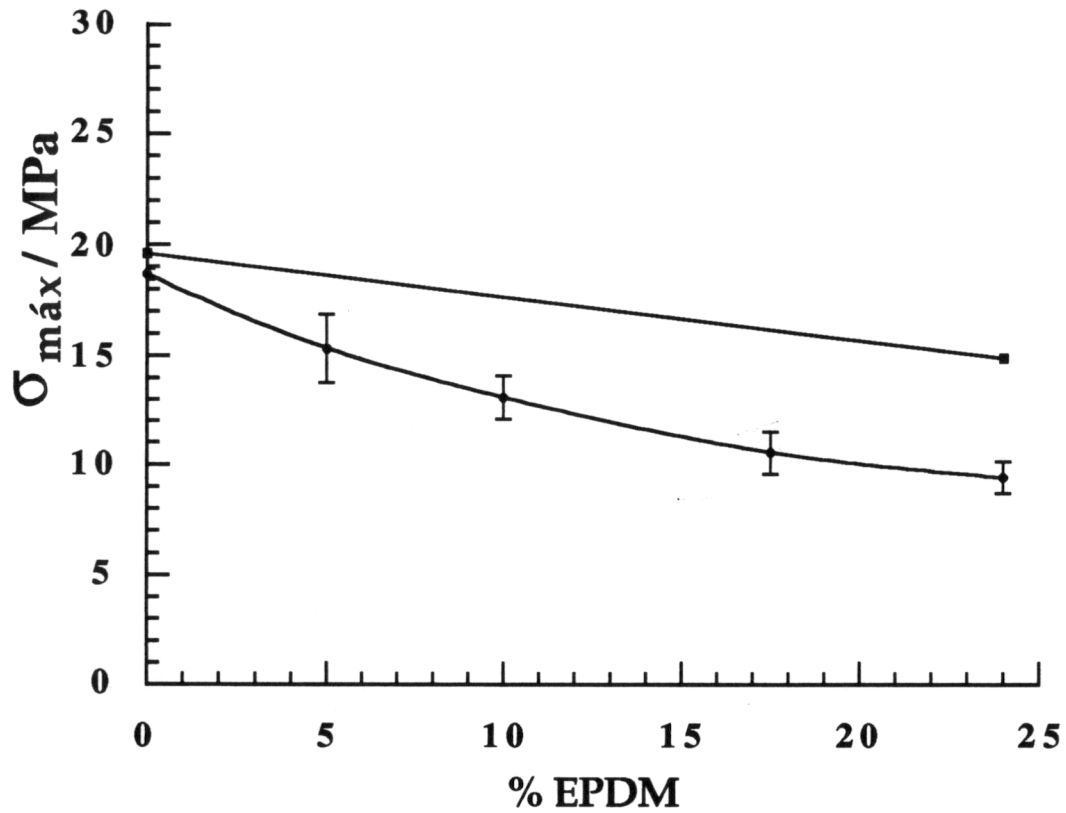


Figura 4.4. Gráfica del esfuerzo máximo en función del contenido de EPDM, para mezclas 1:1.

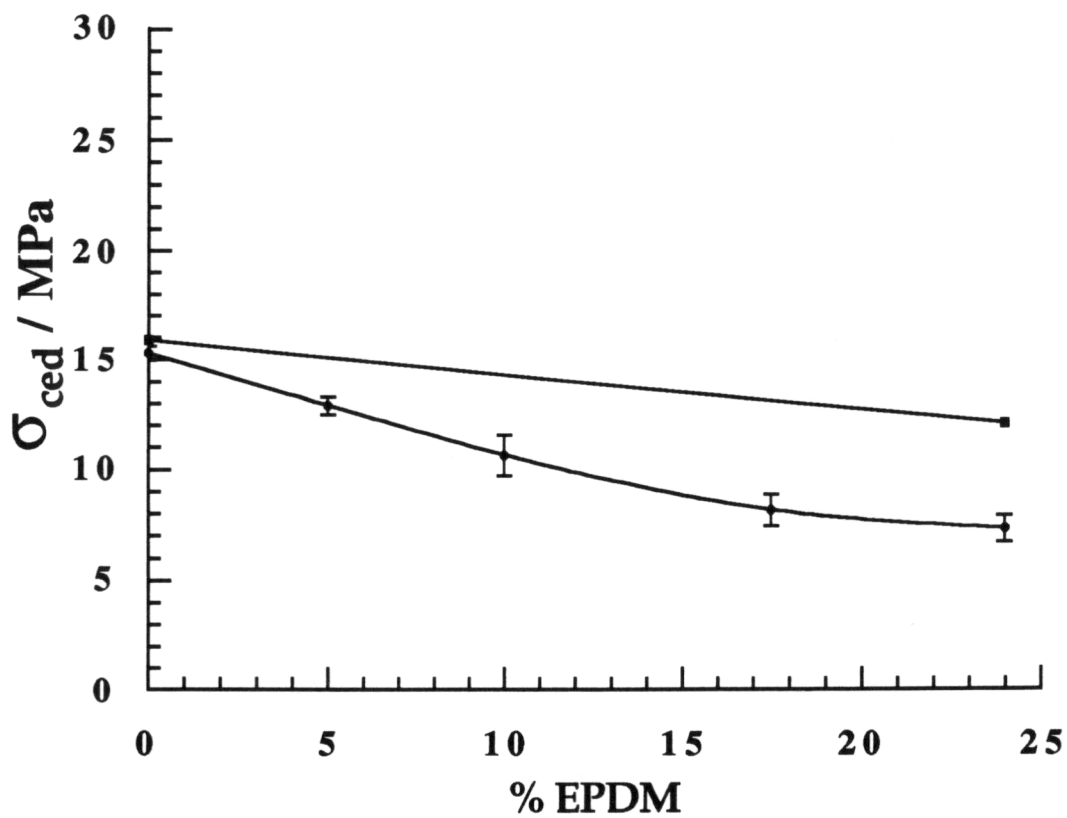


Figura 4.5. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido del EPDM, para mezclas 1:1.

Este tipo de comportamiento es muy similar al observado en el esfuerzo a la cedencia (al 2 % de elongación) como podrá observarse en la figura 4.5, en donde se presenta la gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de EPDM, así como los valores que se obtienen al utilizar la regla de aditividad, los cuales son representados con la línea recta (en la gráfica). En dicha gráfica se observa que el comportamiento tanto de los datos experimentales como los que se obtienen al utilizar la regla de aditividad, es muy similar a lo que se obtiene en los esfuerzos máximos, es decir, a medida que se incrementa el contenido de EPDM el esfuerzo a la cedencia tiende a disminuir paulatinamente, claro está que los datos experimentales disminuyen aún más que los que se obtienen con la regla de aditividad, reflejándose este comportamiento es una desvaición negativa, la cual es indicativa de una disminución de la propiedad en todo el intervalo de composición.

De lo anterior se desprende que a pesar de observarse una ganancia en las elongaciones en el punto de ruptura en un pequeño intervalo, en donde se podría obtener una mejor homogeneidad, esta lleva a una disminución en los esfuerzos máximos y a la cedencia así como a un incremento en la procesabilidad.

De igual manera que se obtienen los esfuerzos, se obtienen las pendientes iniciales de las curvas de esfuerzo-deformación, las cuales son llamados módulos de Young. Para cada una de las mezclas se obtiene un valor, dichos valores también son presentados en forma gráfica para una mejor observación y discusión, como podrá observarse en la figura 4.6, en donde se muestra la gráfica del módulo de Young en función del contenido de EPDM, además de la recta que representa los valores obtenidos con la regla de aditividad. En la gráfica se observa claramente la influencia del elastómero, en donde se tiene que a medida que se incrementa el contenido de EPDM el módulo de Young tiende a disminuir paulatinamente, tanto en los datos experimentales como en los obtenidos con la regla de aditividad. Sin se comparan ambos

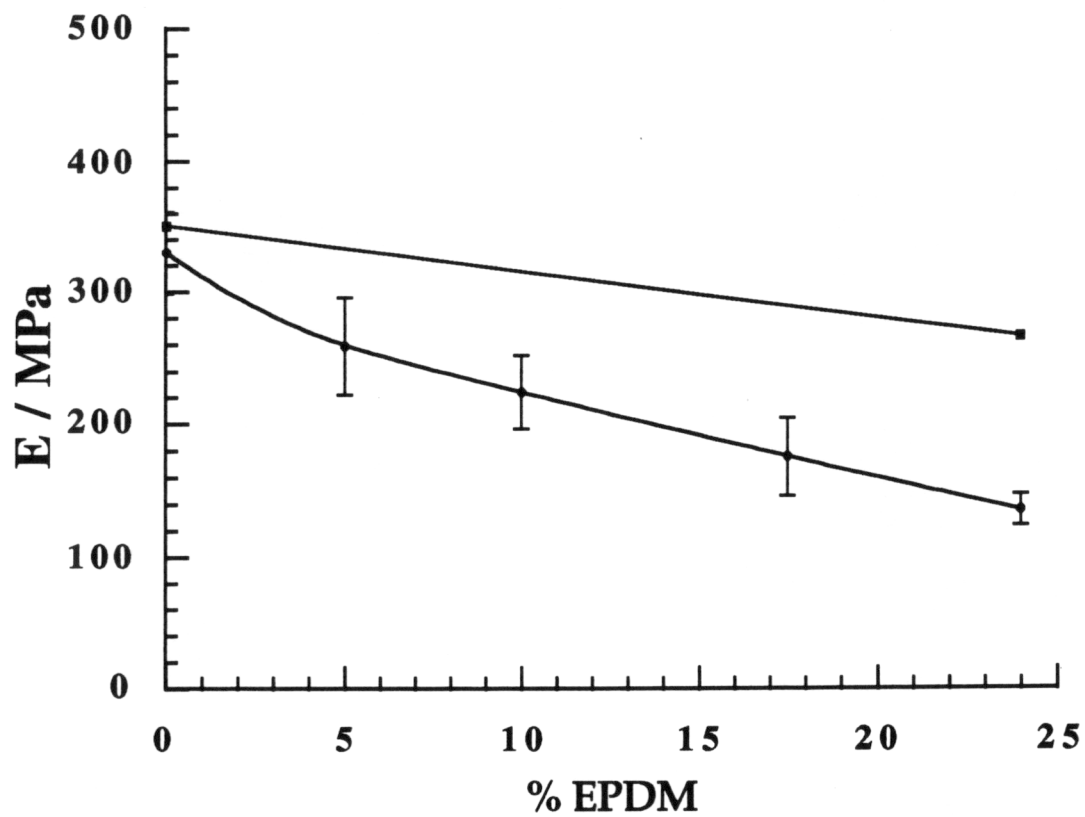


Figura 4.6. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de EPDM, para mezclas 1:1.

resultados se observa claramente cómo los datos experimentales presentan una desviación negativa en todo el intervalo de composición, lo cual es indicativo de que la propiedad en estudio disminuye ligeramente, ya que todos los datos experimentales se encuentran ligeramente por abajo de los que se obtienen con la regla de aditividad.

Como podrá observarse en los esfuerzos máximos y a la cedencia, así como en los módulo de Young, estas propiedades tienden a disminuir paulatinamente a medida que se incrementa el contenido de EPDM, este comportamiento es similar a lo que se obtiene utilizando la regla de aditividad. También este comportamiento se observa en la energía necesaria para la ruptura de las muestras, la cual es asociada con la resistencia al impacto, dicha propiedad tiende a disminuir a medida que se incrementa el contenido de EPDM, lo que marca dicho comportamiento es la línea que representa a los valores que se obtienen con la regla de aditividad. La diferencia de esta propiedad con los esfuerzos y los módulos , es que los resultados experimentales muestran una gran ganancia en cuanto a propiedad en cierto intervalo de composición, lo cual es indicativo de que al menos para esta propiedad el elastómero esta actuando favorablemente.

Como podrá observarse en la figura 4.6, se ilustra el comportamiento descrito anteriormente, es decir, se presenta la gráfica de la energía necesaria para la ruptura de las muestras en función del contenido del EPDM para las mezclas 1:1, así como la línea que representa a los valores que se obtiene al utilizar la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa claramente que la resistencia al impacto presenta desviaciones positivas en el intervalo de composición de 15 a 24 % de EPDM, lo cual es indicativo de que se tiene una ganancia hasta del 200 %, comparando la propiedad con los valores que se obtienen para la mezcla sin elastómero, en cambio en el intervalo restante se presentan desviaciones negativas, las cuales son indicativas de una disminución en la propiedad en estudio.

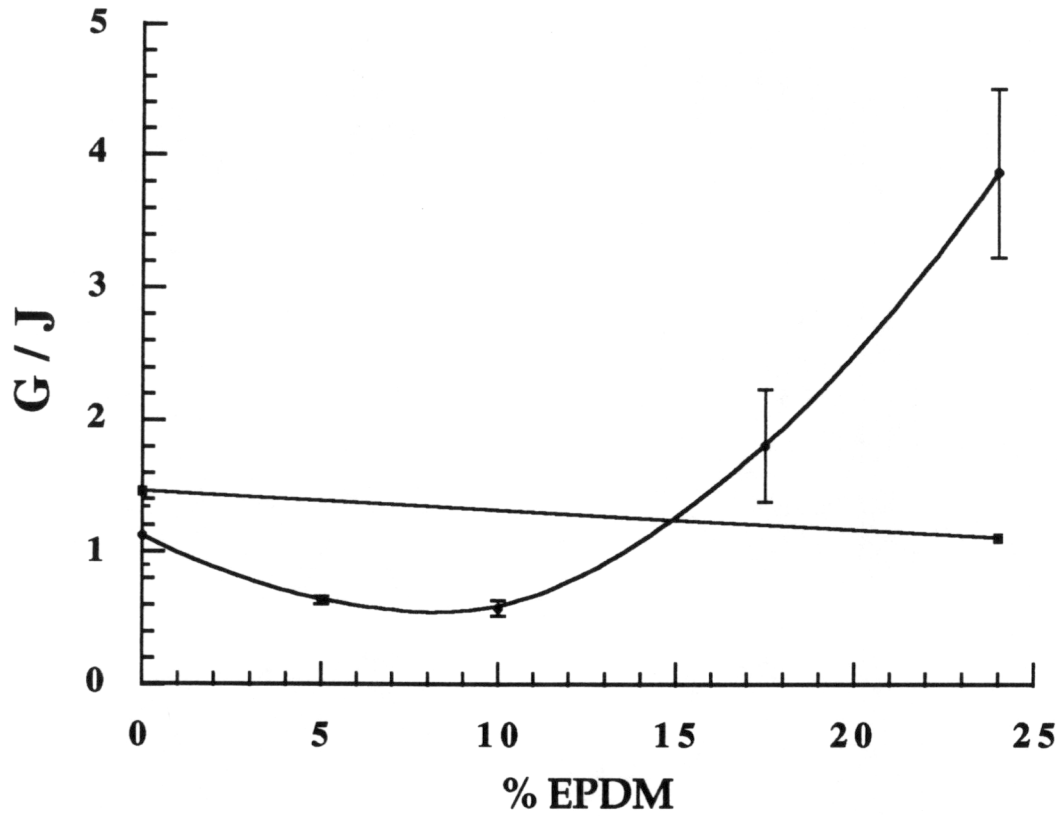


Figura 4.7. Gráfica de la Energía necesaria para la ruptura de las muestras en función del contenido de EPDM. para mezclas 1:1.

Resumiendo las propiedades analizadas en esta sección, se observa claramente que el comportamiento observado en general es el que presentan la mayoría de las mezclas, es decir, al mezclar más de dos elementos, algunas propiedades tiende a ser favorecidas, sacrificando algunas otras. En nuestro caso las propiedades que fueron fuertemente mejoradas se encuentran las elongaciones en el punto de ruptura y la resistencia al impacto, afectando ligeramente la procesabilidad y, así como los esfuerzos máximos y a la cedencia y el módulo de young, lo cual dio pauta a realizar un estudio más detallado, el cual consiste en analizar las mezclas ternarias a contenidos fijos de EPDM, el cual es presentado en las secciones posteriores.

4.2. Meclas ternarias a contenidos fijo de EPDM.

En esta sección una vez que se ha concluido el análisis de las propiedades mecánicas de las mezclas 1:1 en función del contenido de HDPE, ahora se procede a analizar y discutir las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias de los polietilenos de alta y baja densidad, mezclados con un elastómero a contenidos fijos, siendo estos contenidos de 5 y 10 % de EPDM. Ya discutidas las propiedades de las mezclas, posteriormente se analizarán las propiedades en conjunto, es decir, se analizara propiedad por propiedad a diferentes contenidos de EPDM, para determinar la evolución del elastómero en este tipo de mezclas ternarias, incluyendo las mezclas binarias, las cuales denotamos como las mezclas con 0 % de EPDM.

a). Mezclas con 5 % de EPDM

El análisis y discusión de las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias a contenidos fijos de EPDM se inicia con las mezclas con 5 % de contenido de EPDM, iniciandose el estudio con los torques de extrusión en función del contenido de HDPE, para pasar posteriormente al análisis de las elongaciones en el punto de ruptura; esfuerzo máximo; esfuerzo a la cedencia, el cual es considerado al 2 % de elongación; el módulo de young, y por último la energía necesaria para la ruptura de las muestras, en donde dicha energía es asociada con la resistencia al impacto.

Las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM son procesadas a las mismas condiciones que las mezclas 1:1 discutidas en la sección anterior. De dicha extrusión se obtienen directamente las gráficas que representan los torques de extrusión para cada una de las mezclas, que en esta parte hacen un total de siete. De las gráficas obtenidas para cada una de las mezclas, se determina el torque que se le asociará a cada mezcla, así como su respectiva incertidumbre, en donde los torques determinados son directamente asociados con la procesabilidad de las mezclas.

Los resultados obtenidos son presentados en forma gráfica como podrá observarse en la figura 4.8, en donde se ilustra la gráfica de los torques en función del contenido de HDPE, así como la línea que representa a los valores que se obtienen con la regla de aditividad; en dicha gráfica se observa claramente cómo los torques tienden a aumentar ligeramente con el contenido de HDPE, lo cual es indicativo de que la procesabilidad se incrementa ligeramente, es decir, el trabajo que desarrolla el tornillo del extrusor al transportar el material en estado fundido se incrementa ligeramente, esto podría ser debido a que la viscosidad de la mezcla en estudio se incrementa también. Este comportamiento se presenta en todo el intervalo de composición.

Si se hace una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados que se obtienen con la regla de aditividad, se observa que los datos experimentales presentan desviaciones positivas, lo cual es indicativo de que la procesabilidad se incrementa ligeramente en todo el intervalo de composiciones, pero observándose que en un pequeño intervalo la procesabilidad de las mezclas extruidas es muy similar a la que se obtiene con la regla de aditividad, con lo cual se dice que la propiedad no se ve afectada, dicho intervalo es de 2.5 a 10 % de contenido de HDPE aproximadamente.

Una vez que las muestras han sido extruidas, del material que se obtiene en forma de placa, se acondicionan probetas tipo hueso para ser sometidas a pruebas de deformación unidireccional, en una máquina universal de pruebas mecánicas (Instron), a las mismas condiciones a las que fueron sometidas las mezclas 1:1. De dichas pruebas se obtienen directamente las curvas de esfuerzo-deformación, las cuales se muestran en la figura 4.9, en donde la curva de mayor esfuerzo representa a la muestra con 92.5 de HDPE / 2.5 % de LDPE / 5 % de EPDM, y a medida que van disminuyendo los esfuerzos en las curvas se va disminuyendo el contenido de HDPE, hasta llegar a la mezcla con un contenido de 2.5 de HDPE y 92.5 de contenido de LDPE.

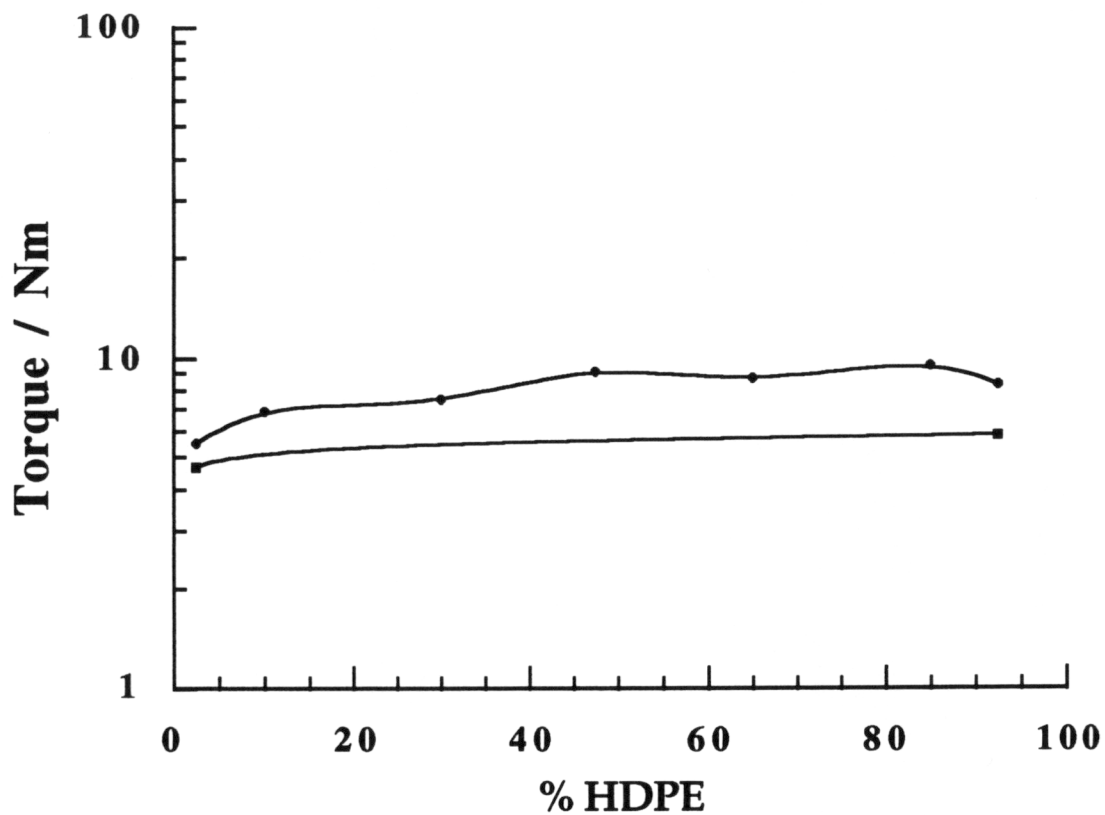


Figura 4.8. Gráfica del torque de extrusión en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, con 5 % de EPDM.

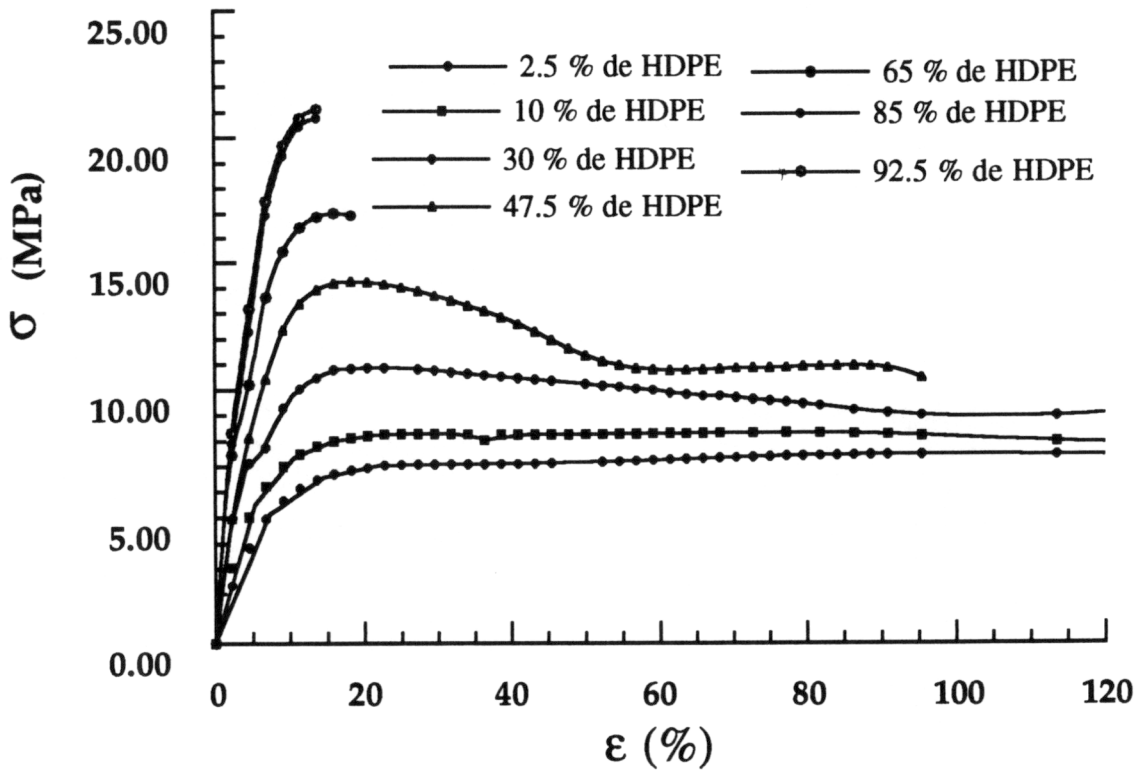


Figura 4.9. Gráfica del esfuerzo en función de la deformación para las mezclas que contienen 5 % de EPDM constante.

De las curvas de esfuerzo-deformación que se obtienen de las pruebas de deformación unidireccional se obtienen directamente las elongaciones en el punto de ruptura para cada una de las mezclas, haciendo un total de siete. Los resultados obtenidos para las elongaciones son presentados en forma gráfica como podrá observarse en la figura 4.10, en donde se presenta la gráfica de las mismas en función del contenido de HDPE, así como la línea que representa los valores que se obtienen con la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa el comportamiento que presentan las mezclas al variar el contenido de los polietilenos a un contenido fijo del 5 % de EPDM, en donde las elongaciones tienden a disminuir drásticamente a medida que se incrementa el contenido de HDPE, tanto en los datos experimentales como en los que se obtienen con la regla de aditividad, claro que los resultados que se obtiene con esta regla disminuyen en forma lineal.

Si se hace una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los que se obtienen con la regla de aditividad, se observa claramente que los datos experimentales presentan casi en todo el intervalo de composición una desviación negativa, lo cual es indicativo de una disminución drástica de la propiedad en estudio. Pero existe un pequeño intervalo en donde se presenta una desviación positiva, la cual es indicativa de una ganancia en la propiedad (de 2.5 a 10 % de HDPE aproximadamente), el cual podría ser indicativo de una pequeña ventana de compatibilidad, es decir, una ventana en donde ciertas propiedades se benefician sin afectar o disminuir drásticamente las restantes. Pero esto no se sabrá hasta que se cuente con el análisis de todas las propiedades en estudio, pero ya es indicativo de que al menos en una propiedad se presente una ganancia (las elongaciones en el punto de ruptura) y en otra no se afecte sustancialmente al menos en este pequeño intervalo de composición.

De las mismas pruebas de deformación unidireccional, en especial de las curvas de esfuerzo-deformación se obtienen los valores para los esfuerzos máximos, que representan los puntos en donde las muestra alcanzan su valor máximo en el esfuerzo.

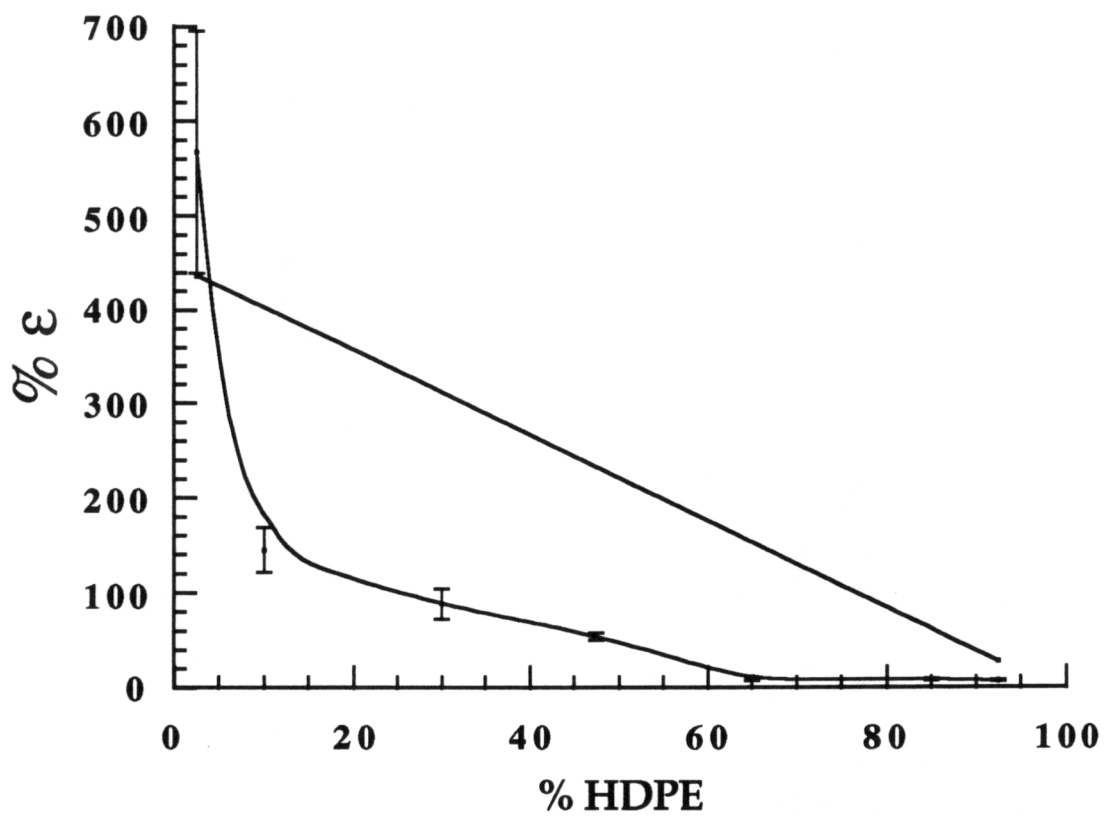


Figura 4.10. Gráfica de las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM. Con 5 % de EPDM.

También son determinados los esfuerzos de cedencia al 2 % de elongación, que es el punto en donde se considera que las muestra empiezan a fluir. Los valores obtenidos para ambos esfuerzos son presentados en forma gráfica como podrá observarse en las figuras 4.11 y 4.12. En la gráfica de la figura 4.11 se presenta el comportamiento del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, así como la línea que representa a los valores que se obtienen con la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que el comportamiento que presentan los datos experimentales y los de la regla de aditividad presentan una tendencia a aumentar a medida que se incrementa el contenido de HDPE.

Si se comparan ambas curvas, se observará que los datos experimentales presentan una pequeña desviación negativa, lo cual es indicativo de que la propiedad se ve ligeramente disminuida, con la excepción de que en un pequeño intervalo que va desde 2.5 a 10 % de contenido de HDPE aproximadamente, en donde la propiedad que se obtiene experimentalmente es muy similar a la que se obtiene con la regla de aditividad, con lo que la propiedad no se ve afectada, lo cual refuerza la existencia de un pequeño intervalo en donde se pueden considerar a las mezclas contenidas ahí, como compatibles, desde el punto de vista de propiedad mecánica.

En cambio en la figura 4.12 se presenta la gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, en donde para cada dato obtenido se representa la incertidumbre asociada a cada valor, así como la línea que representa a los valores que se obtienen con la regla de aditividad, en dicha gráfica también se observa que los esfuerzos obtenidos experimentalmente y los que se obtienen con la regla de aditividad tiende a aumentar paulatinamente con el incremento del HDPE. Si se comparan ambos resultados se observará que los resultados experimentales presentan en casi todo el intervalo de composición una pequeña desviación negativa, la cual es indicativa de una ligera disminución en la propiedad; pero existe una pequeña región en donde las curvas son similares, lo cual es indicativo de que la propiedad no se ve afectada y conlleva a reforzar aún más la teoría de encontrar un intervalo de compatibilidad, claro está que aparentemente la propiedad en

estudio se podría considerar que no es afectada ya que la desviación negativa que presentan los datos experimentales es muy pequeña.

De igual forma que fueron obtenidos los esfuerzos máximos y a la cedencia se determinan los valores para el módulo de Young, que representa la tangente inicial en las curvas de esfuerzo-deformación, determinándose también los valores de las energías necesarias para la ruptura de las muestras, en donde dichas energías son asociadas directamente con la resistencia al impacto que presentarían las muestras. Los resultados obtenidos también son presentados en forma gráfica como podrá observarse en las figuras 4.13 y 4.14, para una mejor visualización y discusión. En la gráfica de la figura 4.13 se presenta el comportamiento del módulo de Young en función del contenido de HDPE, en donde a cada valor se asocia su respectiva incertidumbre; también se presentan los valores obtenidos con la regla de aditividad, los cuales son representados con una línea recta. En dicha gráfica se observa claramente que el módulo de Young tiende a aumentar paulatinamente a medida que se incrementa el contenido de HDPE, observándose este comportamiento en los datos experimentales y los que se obtienen con la regla de aditividad. Al ser comparados ambos datos se observa que los experimentales presentan una ligera desviación negativa en casi todo el intervalo de composición, lo cual también es indicativo de que la propiedad presenta una ligera disminución. Pero también se observa claramente que existe una pequeña región en donde la propiedad es casi idéntica a la que se obtiene con la regla de aditividad, lo cual se interpreta como una región en donde la propiedad no se ve afectada en lo más mínimo.

Lo anterior es claramente un indicativo de la existencia de una pequeña ventana de compatibilidad, la cual se verá aún más reforzada al analizar la última propiedad en estudio para las de este tipo de mezclas.

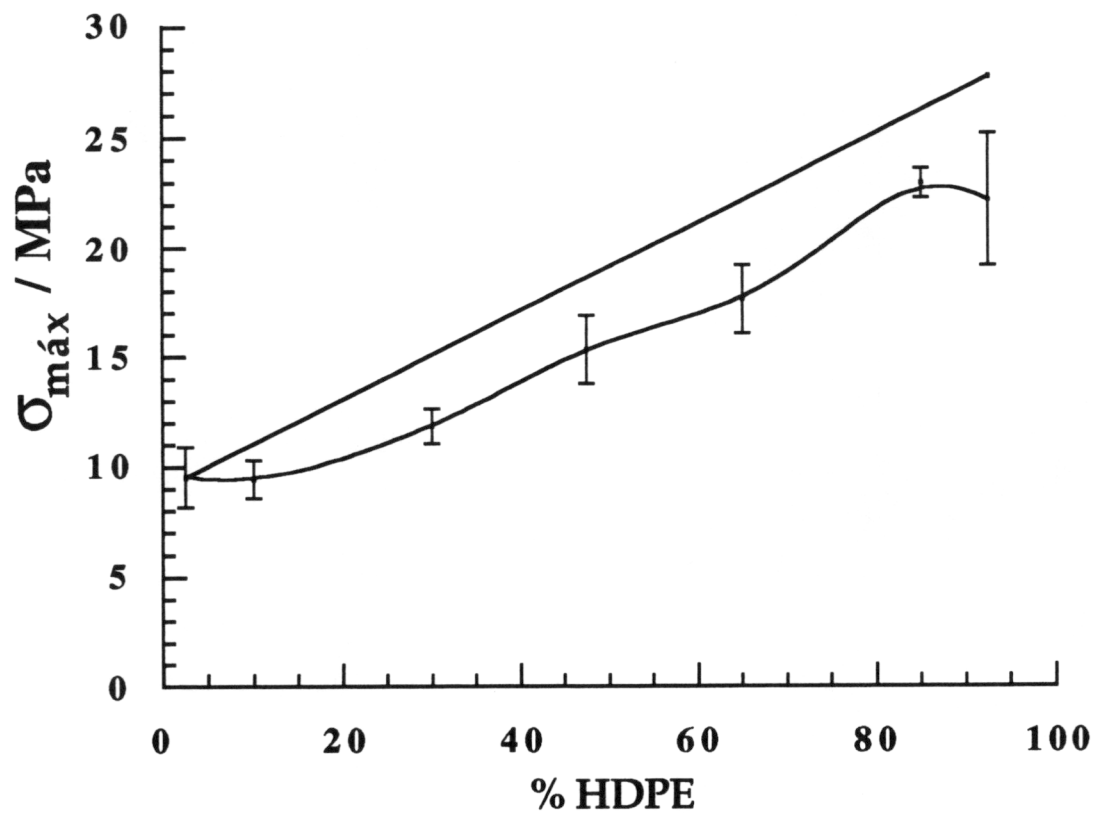


Figura 4.11. Gráfica del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM. Con 5 % de EPDM constante.

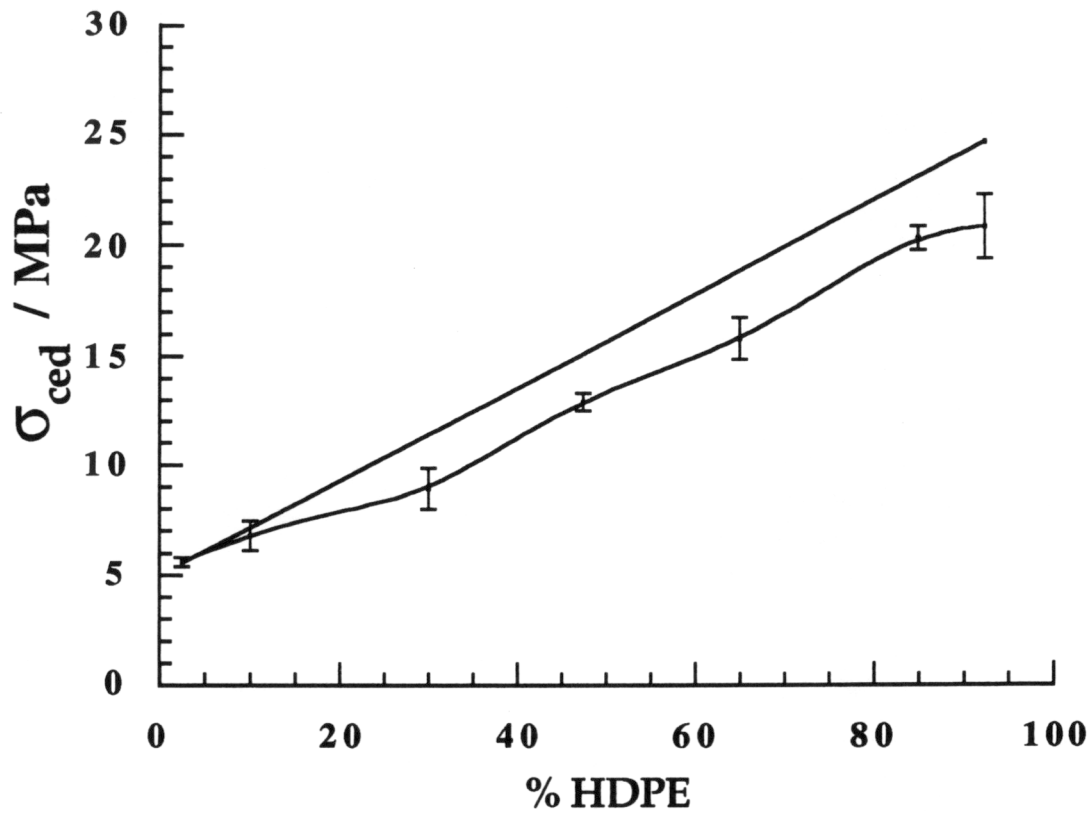


Figura 4.12. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM. Con 5 % de EPDM constante.

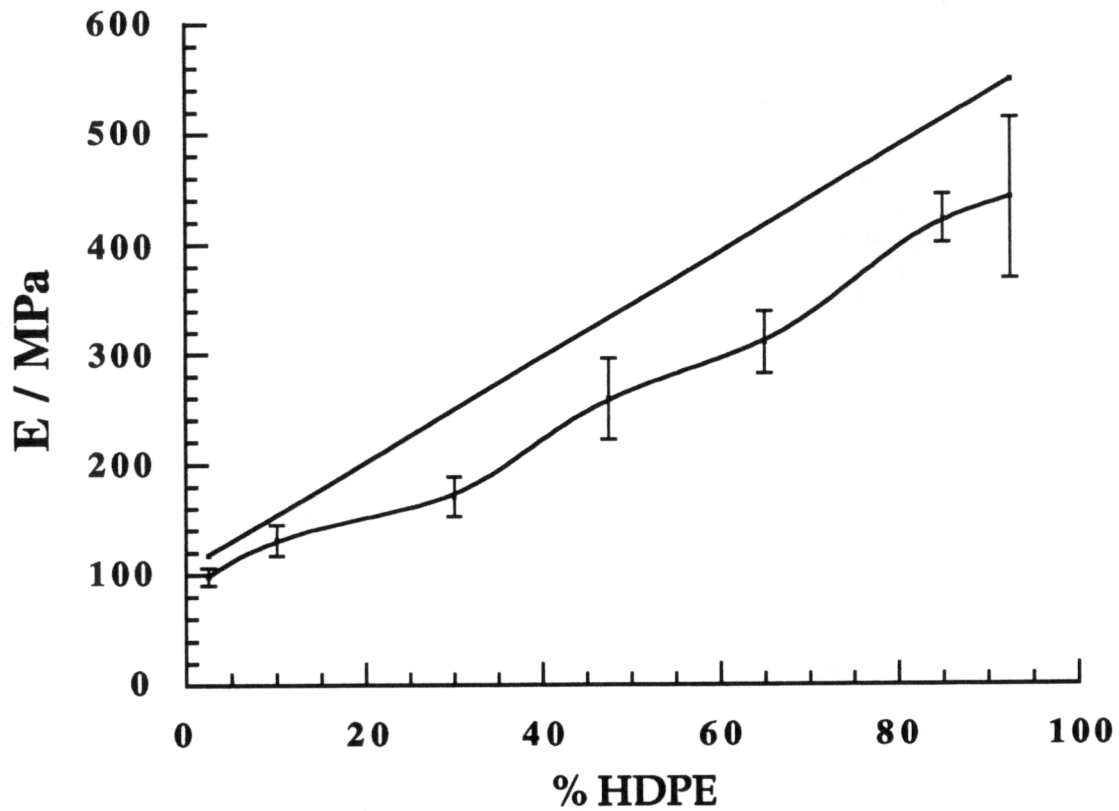


Figura 4.13. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, Con 5 % de EPDM constante.

En la figura 4.14 se presenta la gráfica de la energía necesaria para la ruptura de las mezclas en función del contenido de HDPE, la cual como ya se mencionó, es asociada con la resistencia al impacto, en donde también se representan los valores que se obtienen con la regla de aditividad, los cuales son representados con una línea recta. La propiedad en estudio se ve desfavorecida al incrementarse el contenido de HDPE, tanto en los datos experimentales como para los que se obtienen con la regla de aditividad como podrá observarse en la figura. Al ser comparados los datos experimentales con los que se obtienen con la regla de aditividad, se observa claramente que los experimentales presenta una desviación negativa en el intervalo de composición de 10 a 95 % de contenido de HDPE, lo cual es indicativo de que la propiedad en estudio en ese intervalo se ve afectada negativamente, en cambio existe un pequeño intervalo en donde la propiedad presenta una desviación positiva bien definida, lo cual nos indica que al menos en ese pequeño intervalo la propiedad en estudio presenta una ganancia en cuanto a la propiedad.

Si relacionamos todas las propiedades mecánicas en estudio, observamos claramente que las propiedades que se obtienen experimentalmente se ven ligeramente afectadas en casi todo el intervalo de composición, ya que de la comparación de los datos experimentales con lo que se obtienen con la regla de aditividad, se observa que en casi todo el intervalo de composición se presentan desviaciones negativas, lo cual refuerza la aseveración anterior. Pero también se observa que existe un pequeño intervalo en donde las elongaciones en el punto de ruptura y las resistencias al impacto presentan una ganancia en cuanto a propiedad; en cambio los esfuerzos máximos y de cedencia, el módulo de Young y los torque de extrusión no son afectados en dicho intervalo, por lo que se considerará a ese intervalo como una ventana (aunque sea pequeña) de compatibilidad.

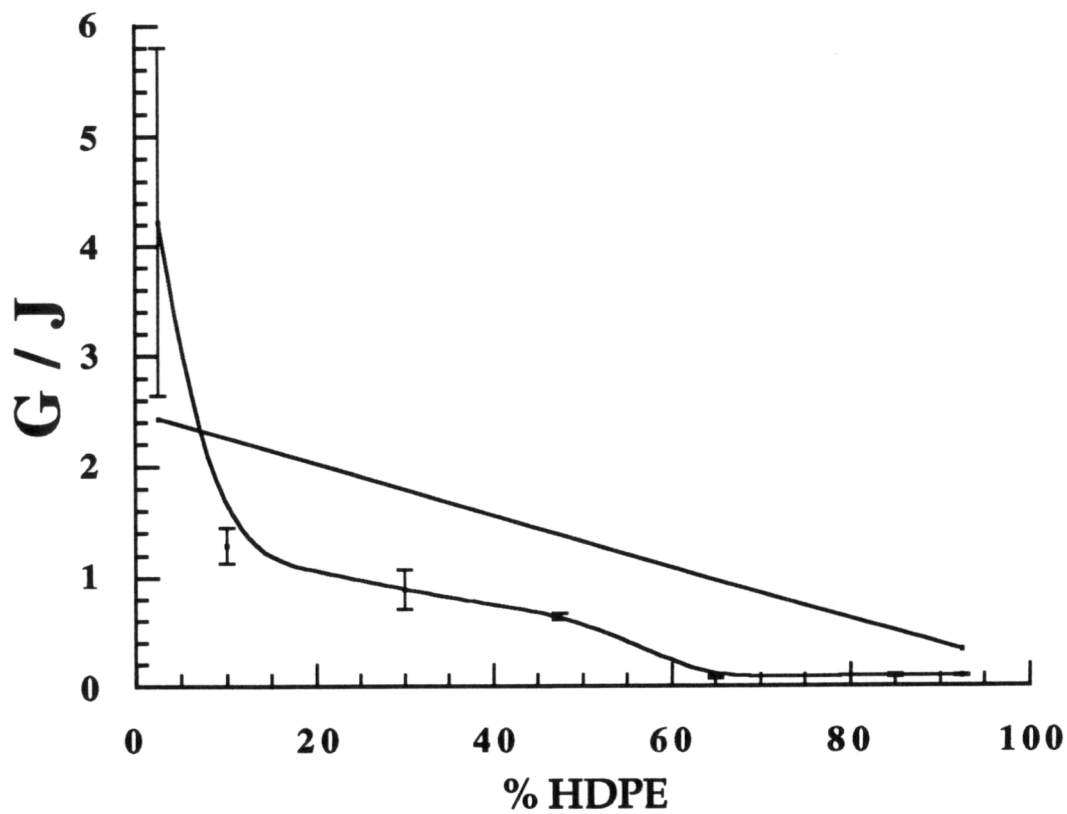


Figura 4.14. Gráfica de la energía necesaria para la ruptura de las muestras en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM. Con 5 % de EPDM constante.

b) Mezclas con 10 % de EPDM.

En esta sección se analizan las propiedades mecánicas de las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, a 10 % de contenido fijo de EPDM; las propiedades analizadas son el torque de extrusión, el cual es asociado con la procesabilidad de las mezclas, las elongaciones en el punto de ruptura, esfuerzos máximos y a la cedencia, módulos de young y las energías necesarias para las rupturas de las muestras, en donde dicha energía es asociada con la resistencia al impacto.

Al igual que las mezclas anteriores, las mezclas ternarias consideradas en esta sección son extruidas a las mismas condiciones, de dicha extrusión se obtienen directamente las gráficas que representan al torque de extrusión para cada una de las mezclas, siendo en total siete. De las gráficas obtenidas se determinan los torques asociados a cada una de las mezclas, así como su respectiva incertidumbre, los resultados obtenidos son presentados en forma gráfica. En la figura 4.15 se muestra la gráfica de los torques de extrusión en función del contenido del HDPE para las mezclas ternarias con 10 % de contenido fijo de EPDM, en donde también se ilustran las incertidumbres correspondientes, así como la línea que representa a los datos obtenidos con la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa claramente que la procesabilidad se ve ligeramente afectada en el primer intervalo de composición, es decir, en el intervalo de 5 a 35 % de HDPE aproximadamente y a partir de este último la procesabilidad se ve afectada aún más. En general la procesabilidad se afecta paulatinamente a medida que se incrementa el contenido de HDPE.

Ahora, si se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los que se obtienen con la regla de aditividad, se podrá observar que los datos experimentales presentan en todo el intervalo de composición una desviación negativa, la cual es indicativa de que la propiedad en estudio se ve fuertemente afectada, con lo cual la procesabilidad se ve disminuida, representando un trabajo mayor, es decir, el trabajo que realiza el tornillo al transportar las muestras en estado fundido

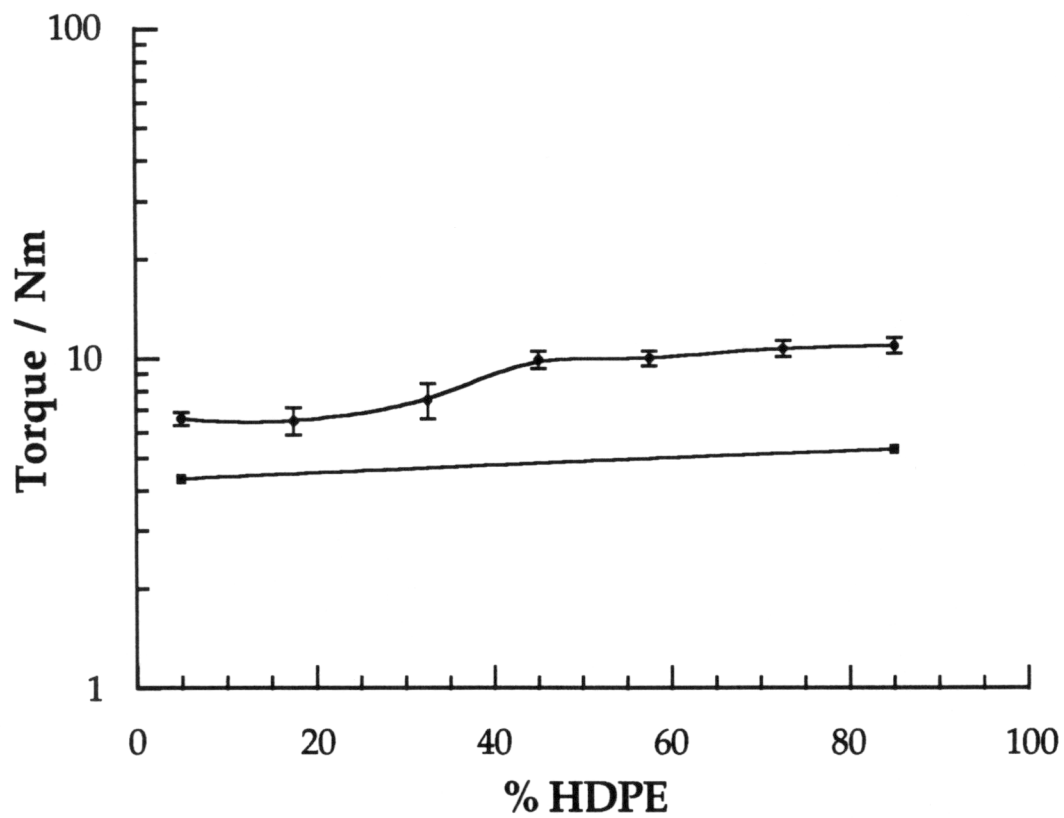


Figura 4.15. Gráfica del torque de extrusión en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, con 10 % de EPDM.

es ligeramente mayor al que se realiza en las mezclas binarias, las cuales estan representadas con la línea.

Una vez que las muestras han sido extruidas, del material que se obtiene en forma de láminas se preparan probetas tipo hueso para ser sometidas a pruebas de deformación unidireccional, obteniendose directamente las curvas de esfuerzo-deformación como podrá observarse en las gráficas de la figura 4.16, en donde la curva de mayor esfuerzo máximo corresponde a la mezcla que contiene 85 % de HDPE, y a medida que disminuye el contenido de HDPE los esfuerzos tienden a disminuir paulatinamente hasta llegar a la última curva (la de menor esfuerzo máximo), la cual corresponde a la mezcla que contiene 5 % de HDPE.

De las curvas observadas en la figura 4.16 se determinan los valores que se asociarán a las propiedades mecánicas en estudio, tales como las elongaciones en el punto de ruptura, esfuerzos máximos y esfuerzos a la cedencia, así como los módulos de Young y las energías necesarias para las rupturas de las muestras, en donde dichas energías son asociadas con la resistencia al impacto. Todos los valores obtenidos se presentan en forma gráfica para una mejor visualización y para facilitar el análisis correspondiente, como podrá observarse en las figuras 4.17 a 4.21.

En la gráfica de la figura 4.17 se muestran las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, con 10 % de contenido fijo de EPDM, en donde también se representan los valores obtenidos con sus respectivas incertidumbre, así como la línea que representa a los valores que se obtienen con la regla de aditividad. En dicha gráfica se observa que en general las elongaciones en los puntos de ruptura tienden a disminuir drásticamente a medida que se incrementa el contenido de HDPE. Este comportamiento es muy similar al observado en la mayoría de las mezclas consideradas en el presenta trabajo, el cual podría ser indicativo de que a medida que se incrementa el contenido de HDPE la adhesión de los componentes se va haciendo más difícil, lo cual conlleva al comportamineto observado en las diferentes mezclas.

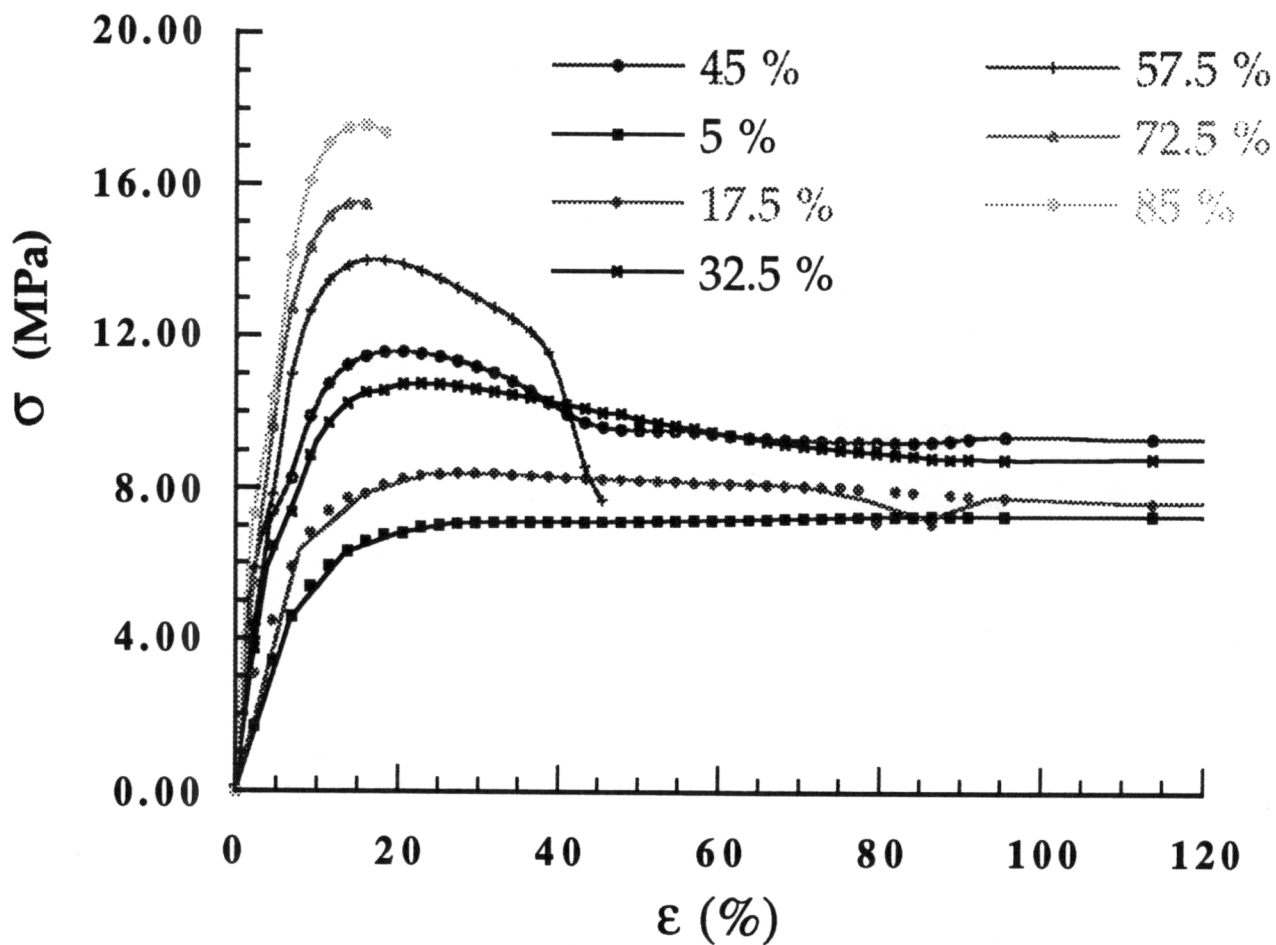


Figura 4.16. Gráfica de esfuerzo deformación para mezclas con 10 % de EPDM, el recuadro marca el porcentaje de HDPE.

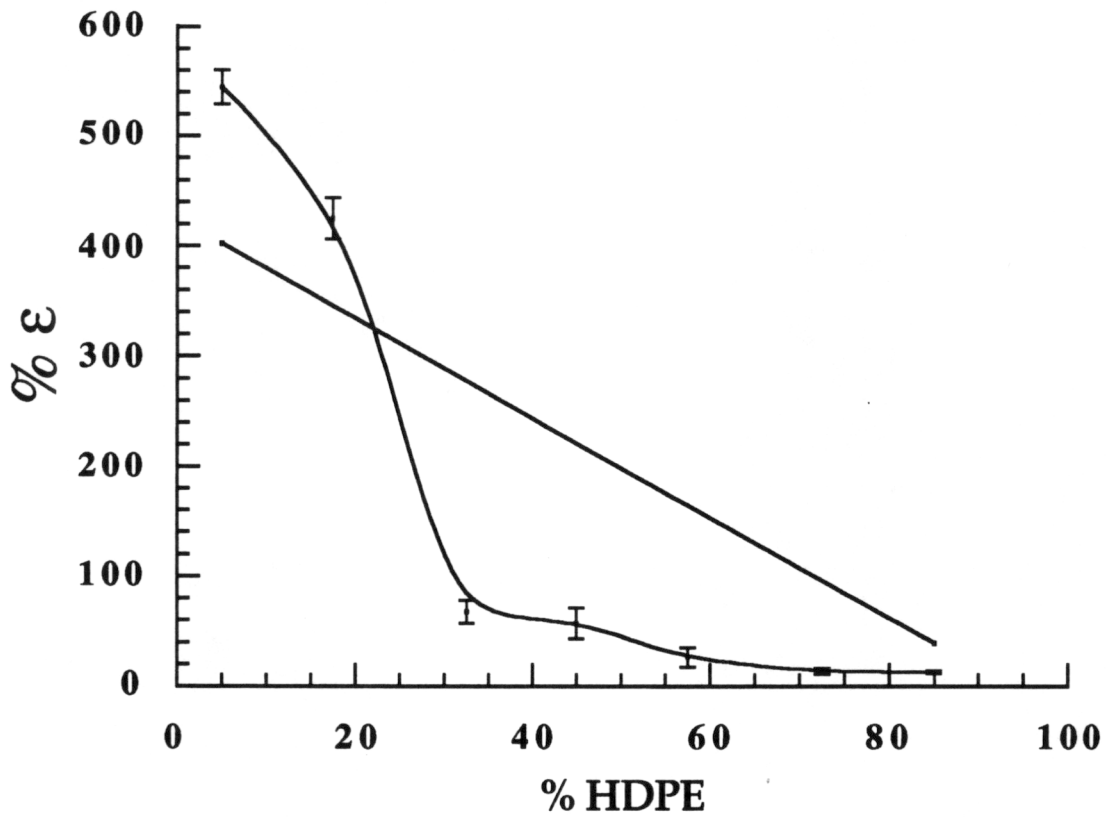


Figura 4.17. Gráfica de elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDE, con 10 % de EPDM.

Si se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los que se obtienen con la regla de aditividad, se observa que en un pequeño intervalo de 0 a 25 % de HDPE aproximadamente, a pesar de presentarse una disminución en la propiedad se observa una desviación positiva al comparar ambos resultados, dicha desviación es indicativa de que al menos en este pequeño intervalo se presenta una ganancia en la propiedad, en donde también se podría considerar que se presenta una buena adhesión de los componentes. En cambio en el intervalo restante (de 25 a 85 % de HDPE aproximadamente) se observa una desviación negativa, la cual es indicativa de una disminución en la propiedad en estudio, en donde este comportamiento también podría ser indicativo de una mala adhesión de los componentes e incluso podría ser indicativo de una posible segregación de fases, con lo cual se concluye que las mezclas contenidas en dicho intervalo se ven afectadas negativamente a contenidos fijos del 10 % de EPDM.

En la gráfica de la figura 4.18 se ilustra el comportamiento del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, en dicha gráfica también se ilustran las incertidumbres asociadas a cada una de las mezclas, así como la línea que representa a los valores que se obtienen al utilizar la regla de aditividad. En esta gráfica se puede observar que a medida que se incrementa el contenido de HDPE los esfuerzos obtenidos tienden a aumentar en una forma lineal, a pesar de que el comportamiento observado en las elongaciones es irregular. Si se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los de la regla de aditividad, se observa que en todo el intervalo de composición que los comportamientos son muy similares, presentando una ligera desviación negativa en los datos experimentales, lo cual es indicativo de que la propiedad en estudio se ve ligeramente disminuida en todo el intervalo de composición, apesar de que en gran parte del intervalo de composición la procesabilidad y las elongaciones en los puntos de ruptura de ven fuertemente afectadas.

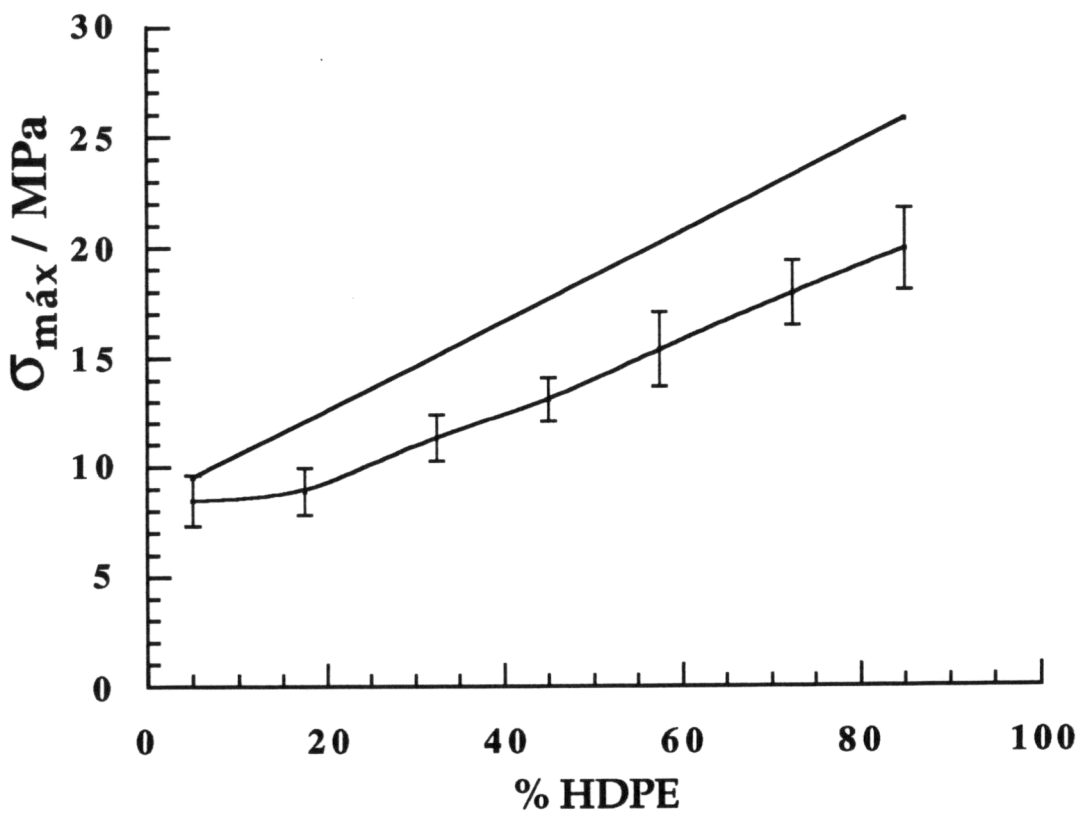


Figura 4.18. Gráfica del esfuerzo máximo en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, con 10 % de EPDM.

En la gráfica de la figura 4.19 se presenta el comportamiento de los esfuerzos a la cedencia en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias con 10 % de EPDM constante, en dicha gráfica también se ilustran las incertidumbres asociadas a cada valor, así como la línea que representa a los valores obtenidos con la regla de aditividad. El comportamiento observado en esta propiedad es similar al observado en los esfuerzos máximos, es decir, a medida que se incrementa el contenido de HDPE, los esfuerzos a la cedencia tienden a aumentar en una forma lineal y al comparar los resultados experimentales con los de la regla de aditividad, en todo el intervalo de composiciones se observa una ligera desviación negativa, la cual también es indicativa de una disminución en la propiedad.

En la gráfica de la figura 4.20 se presenta el comportamiento del módulo de Young en función del contenido de HDPE, así como la línea que representa a los valores obtenidos con la regla de aditividad. El comportamiento observado en los módulos es similar al de los esfuerzos, es decir, a medida que se incrementa el HDPE el módulo se incrementa casi en forma lineal, y al comparar los resultados experimentales con los de la regla de aditividad también se observa una ligera desviación negativa, siendo indicadora de una disminución de la propiedad en todo el intervalo de composición.

Por último en la gráfica de la figura 4.21 se ilustra el comportamiento de las energías necesarias para la ruptura de las muestras en función del contenido de HDPE. Las energías consideradas son asociadas con la resistencia al impacto. En dicha gráfica se presentan los resultados obtenidos así como la línea que representa a los valores que se obtienen con la regla de aditividad. El comportamiento observado en esta propiedad es muy similar al observado en las elongaciones en el punto de ruptura, en donde se observa que la propiedad tiende a disminuir a medida que se incrementa el contenido de HDPE. Por otro lado si se comparan los resultados experimentales con los que se obtienen con la regla de aditividad, se observa que los resultados experimentales presentan

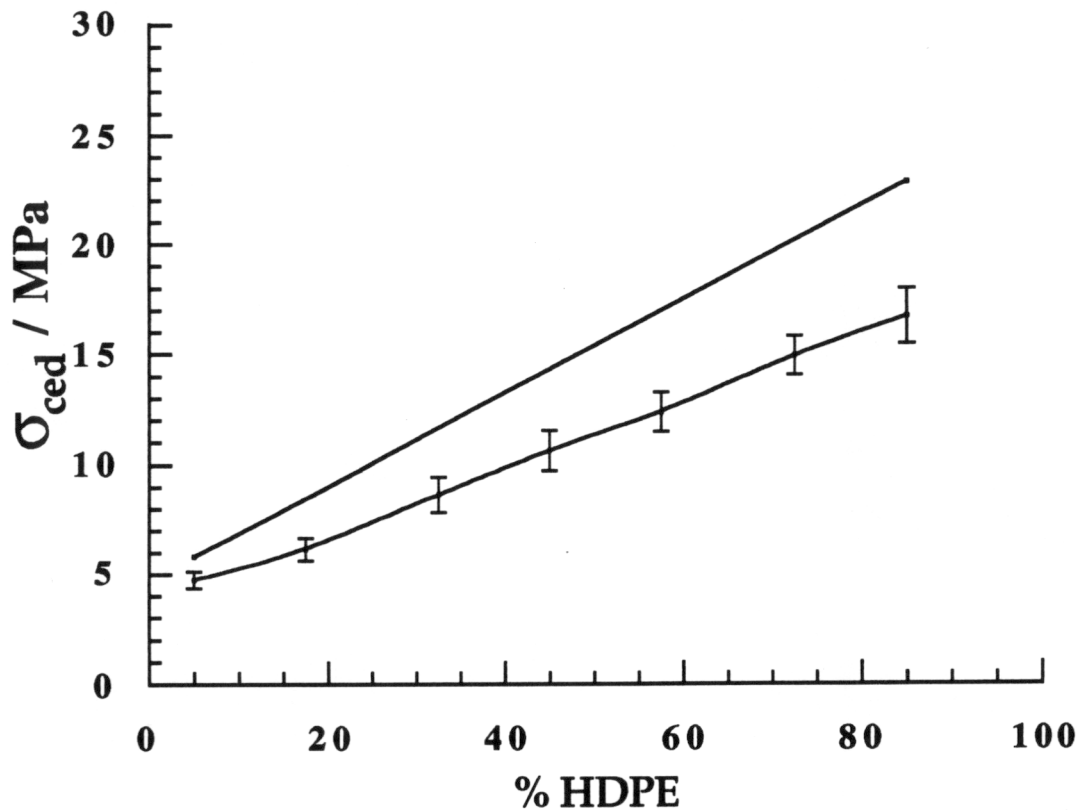


Figura 4.19. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, para mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, con 10 % de EPDM.

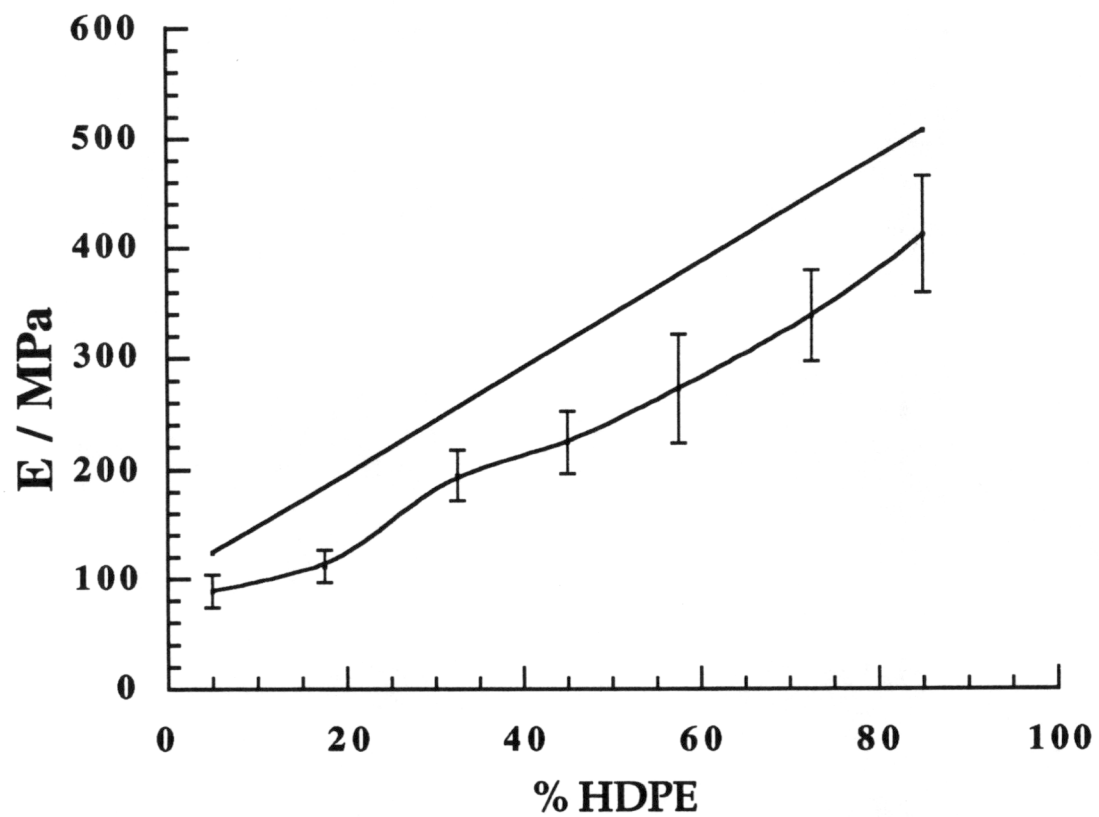


Figura 4.20. Gráfica del Módulo de Young en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, con 10 % de EPDM constante.

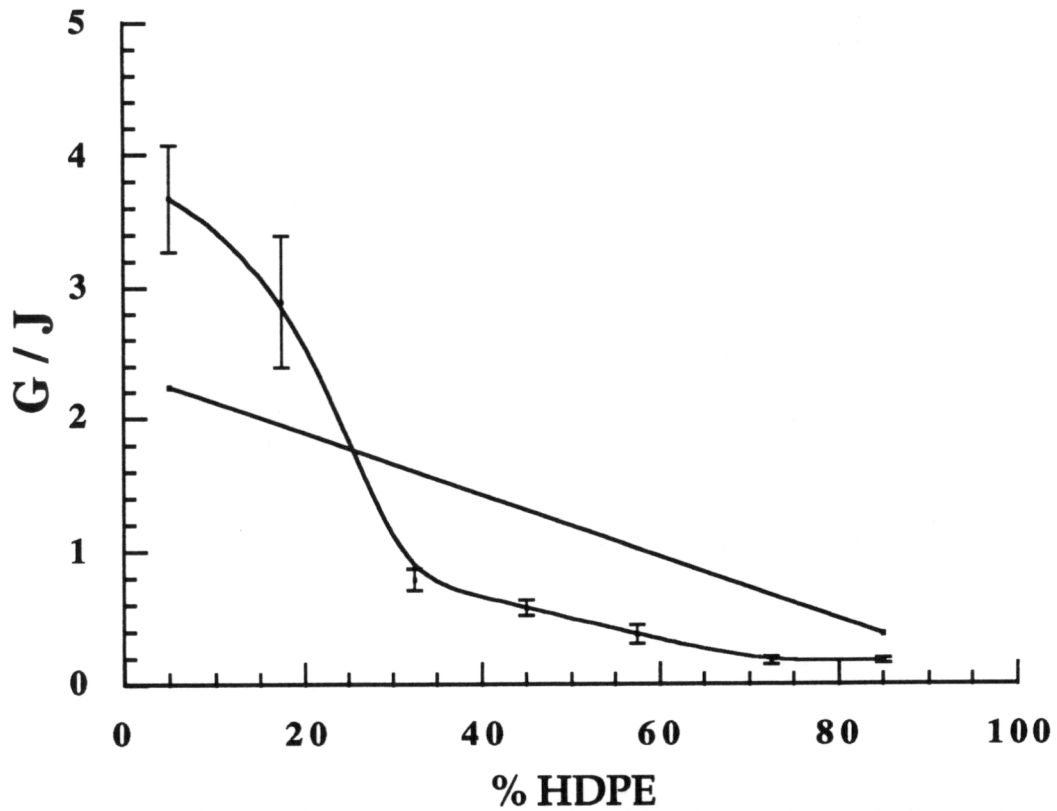


Figura 4.21. Gráfica de la Energía necesaria para la ruptura de las muestras en función del contenido de HDPE, para las mezclas ternarias, con 10 % de EPDM.

también un pequeño intervalo (de 5 a 20 % de HDPE aproximadamente) en donde se obtiene una desviación positiva, la cual es indicativa de una mejora en la propiedad, a pesar de disminuir esta propiedad a medida que se incrementa el contenido de HDPE. En cambio en el intervalo restante (de 20 a 85 % de HDPE aproximadamente) se presenta una desviación negativa, la cual es indicativa de una disminución en la propiedad, al igual que las elongaciones en el punto de ruptura.

Si se relacionan todas las propiedades analizadas se podrá observar que en las mezclas ternarias de HDPE/LDPE/EPDM, a 10 % de EPDM constante, existe un pequeño intervalo en el cual las propiedades en estudio presentan una considerable ganancia, como es el caso de las elongaciones en el punto de ruptura y la resistencia al impacto, por un lado, y por otro lado los esfuerzos máximos y a la cedencia al igual que el módulo de young no sufren disminuciones drásticas, en cambio en la procesabilidad, esta tiende a incrementarse ligeramente en todo el intervalo de composición. De aquí que al menos en el intervalo de 0 a 25 % de HDPE aproximadamente se pueden considerar compatibles (desde el punto de vista de propiedad mecánica) las mezclas comprendidas en ese intervalo.

c) Análisis global de las mezclas con 0, 5 y 10 % de EPDM.

Una vez que se han discutido y analizado las propiedades de las mezclas ternarias a 5 y 10 % de contenido fijo de EPDM, ahora se realiza una comparación cuantitativa con las mezclas binarias de los dos polietilenos, en donde en esta sección se considerarán como las mezclas sin elastomero, o más bien como las mezclas con 0 % de contenido de EPDM. El estudio comparativo se inicia con los torques de extrusión, los cuales como ya se mencionó son asociados con la procesabilidad, para pasar posteriormente a las elongaciones en los puntos de ruptura, esfuerzos máximos y esfuerzos de cedencia, módulos de young y por último las energías necesarias para la ruptura de las muestras, en donde dichas energías son asociadas con la resistencia al impacto.

En la gráfica de la figura 4.22 se muestran los torques de extrusión en función del contenido de HDPE para los diferentes contenidos de EPDM. En dicha gráfica se observa que la influencia del elastómero es desfavorable casi en todo el intervalo de composición, con la excepción de las mezclas binarias (0 % de EPDM) las cuales muestran un comportamiento similar al que se obtiene con la regla de aditividad, es decir, al comparar los datos experimentales con los de dicha regla se observa una ligera desviación negativa, la cual se traduce como una ligera mejora en la propiedad. El comportamiento descrito no es tan drástico ya que como se recordara en las mezclas con 5 y 10 % de EPDM, a pesar de presentar desviaciones positivas en los torques no quiere decir que las mezclas sean incompatibles (desde el punto de vista de propiedad mecánica) ya que existen al menos dos propiedades en donde se obtienen mejoras.

En la gráfica de la figura 4.23 se presentan las curvas para las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, para los diferentes contenidos de EPDM, así como la línea que representa los valores que se obtienen con la regla de aditividad. Al comparar los resultados de la regla de aditividad con los que se obtienen experimentalmente, se observa que las mezclas presentan

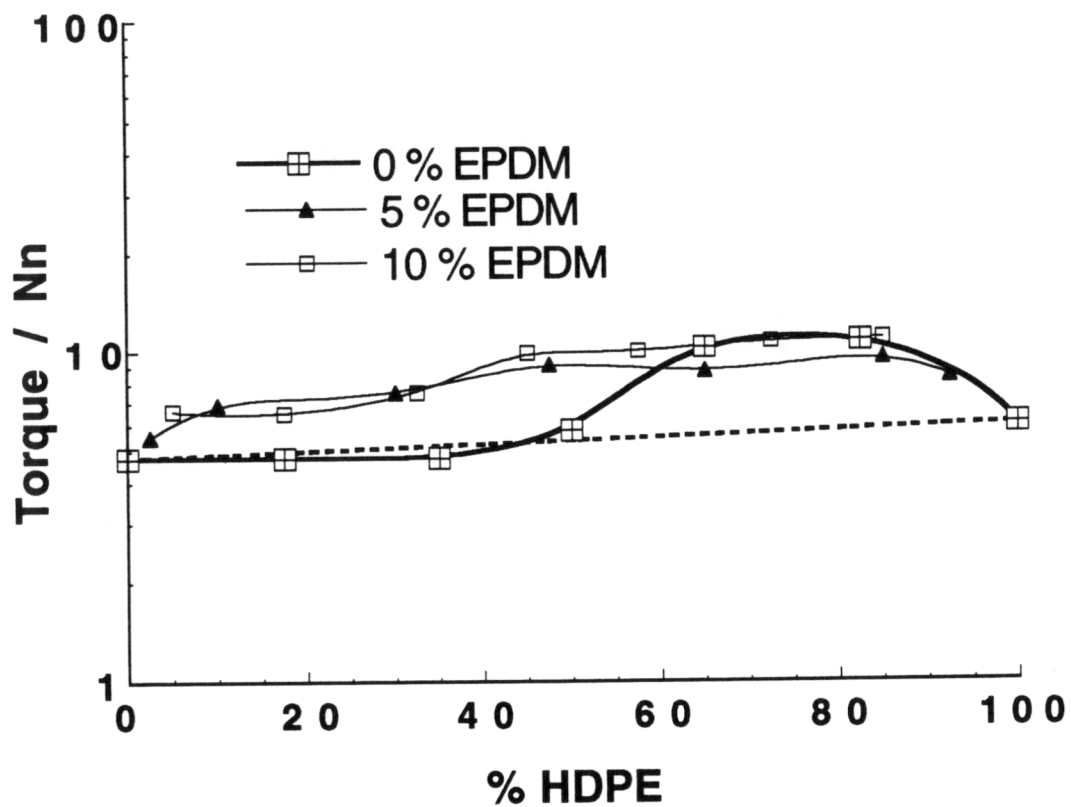


Figura 4.22. Gráficas del torque de extrusión en función del contenido de HDPE, para mezclas a diferentes contenidos de EPDM.

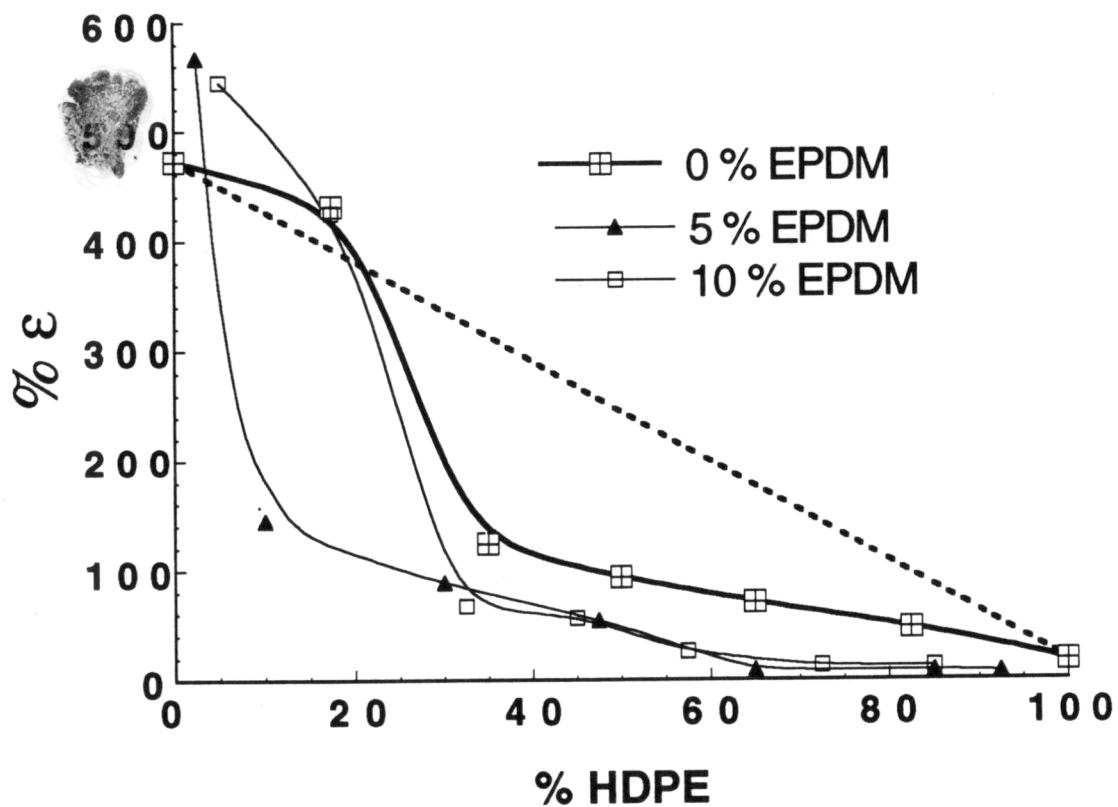


Figura 4.23. Gráficas de las elongaciones en el punto de ruptura en función del contenido de HDPE, para mezclas a diferentes contenidos de EPDM.

una pequeña desviación positiva en el intervalo de 0 a 20 % de HDPE aproximadamente, siendo de 0 a 20 % para mezclas de 0 y 10 % de EPDM y de 2.5 a 7 % de HDPE aproximadamente para las mezclas con 5 % de EPDM. En cambio en el intervalo restante todas las mezclas presentan una desviación negativa, la cual es indicativa de una disminución en la propiedad en estudio.

La influencia del elastómero en el primer intervalo mencionado es de ganancia, ya que en las mezclas con 5 % de EPDM las rupturas se presentan a mayores elongaciones que las mezclas con 0 y 10 % de EPDM, claro está que el intervalo es muy pequeño; en cambio en la mezcla con 10 % de EPDM las rupturas se presentan a menores elongaciones que las mezclas con 5 % de EPDM, pero el intervalo de composición se incrementa notablemente, como podrá observarse en la figura 4.23, con lo cual la influencia del EPDM es favorable.

La influencia del EPDM en los esfuerzos máximos y de cedencia, así como del módulo de Young es ligeramente desfavorable, ya que como podrá observar en las figuras 4.24 a 4.26, en todo el intervalo de composición las propiedades presentan una desviación negativa, incrementándose esta desviación con el incremento de EPDM. Cabe mencionar que las desviaciones son mínimas en el pequeño intervalo de 0 a 20 % de HDPE aproximadamente, y es el intervalo en donde las mezclas presentan una mejora en la elongación en el punto de ruptura.

Por último se presenta la gráfica de la energía en función del contenido de HDPE como podrá observarse en la gráfica de la figura 4.27, en dicha gráfica se observa un intervalo (de 0 a 30 % de HDPE aproximadamente) en el cual las mezclas presentan desviaciones positivas, en donde las mezclas con 0 % de EPDM presentan mayor resistencia en un intervalo mayor que las mezclas con 5 y 10 % de EPDM. En cambio las mezclas con 5 % de EPDM presenta mayor resistencia que las de 10 %, pero en un intervalo menor a este último, y en el intervalo restante ambas mezclas presentan una desviación negativa la cual es indicativa de una disminución en la propiedad.

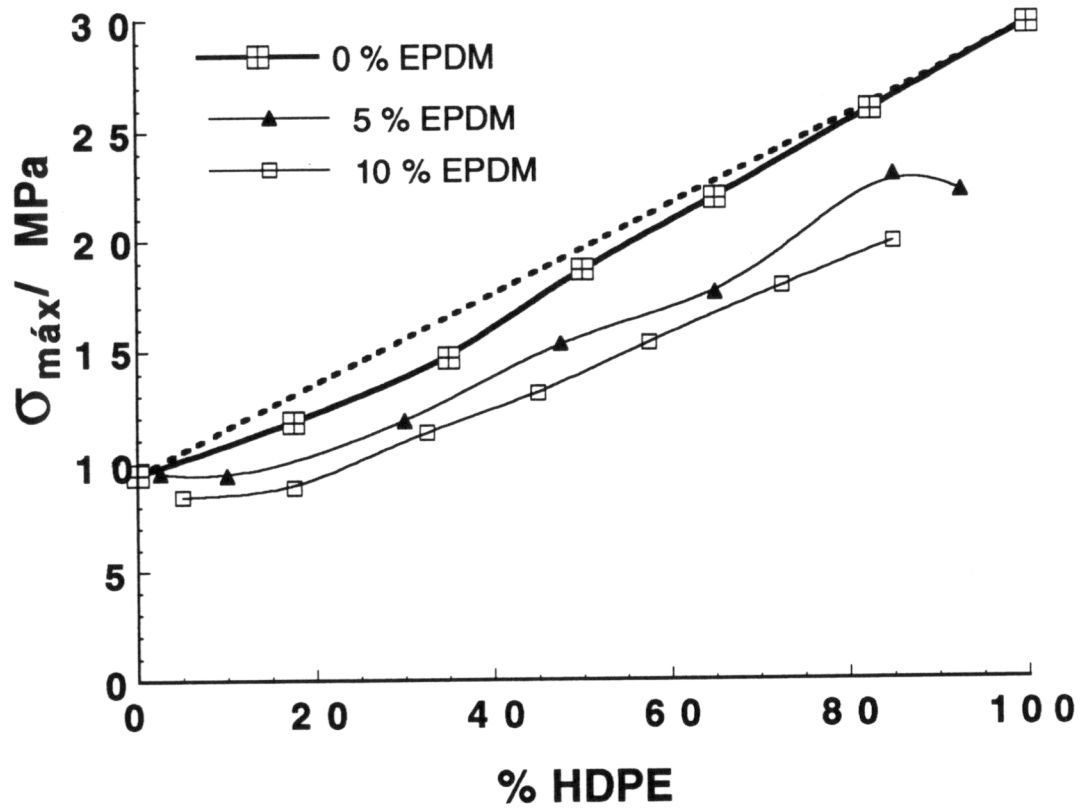


Figura 4. 24. Gráfica del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, para mezclas a diferentes contenidos de EPDM.

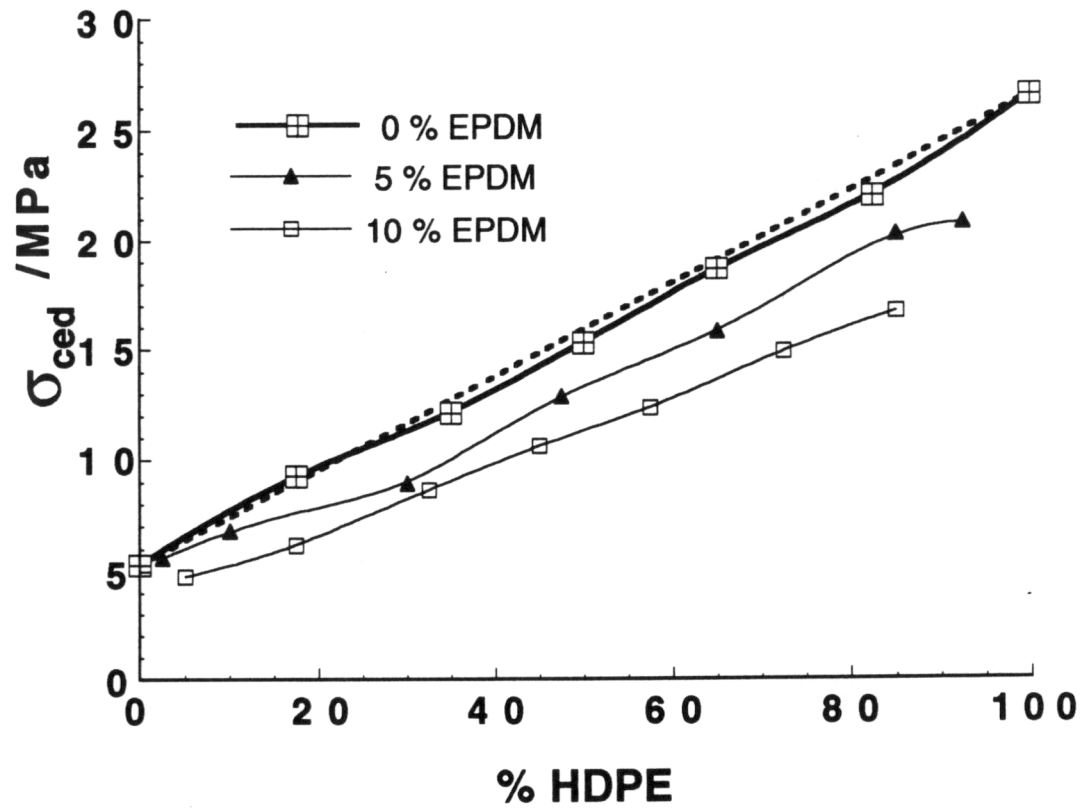


Figura 4.25. Gráficas del esfuerzo a la cedencia en función del contenido de HDPE, para mezclas a diferentes contenidos de EPDM.

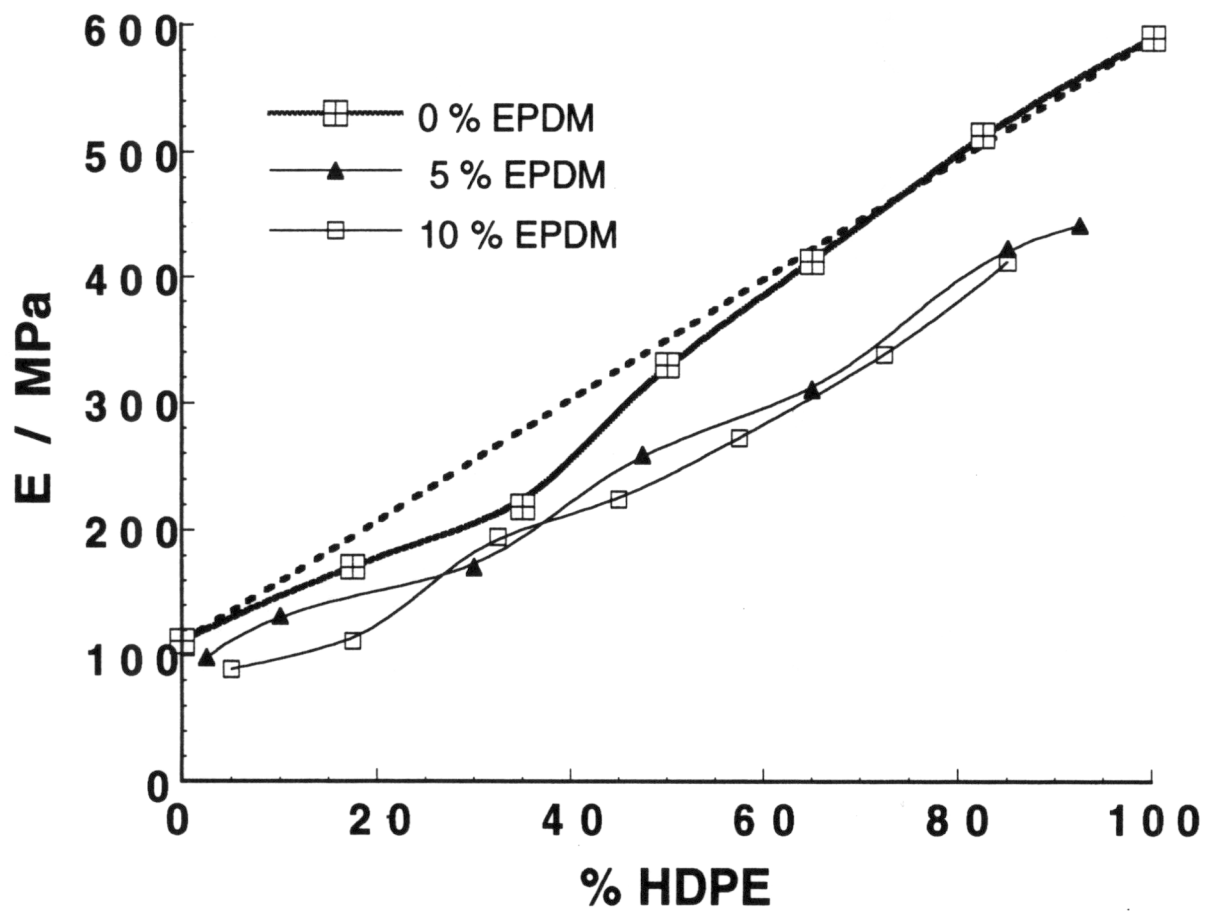


Figura 4.26. Gráfica del módulo de Young en función del contenido de HDPE, para mezclas a diferentes contenidos de EPDM.

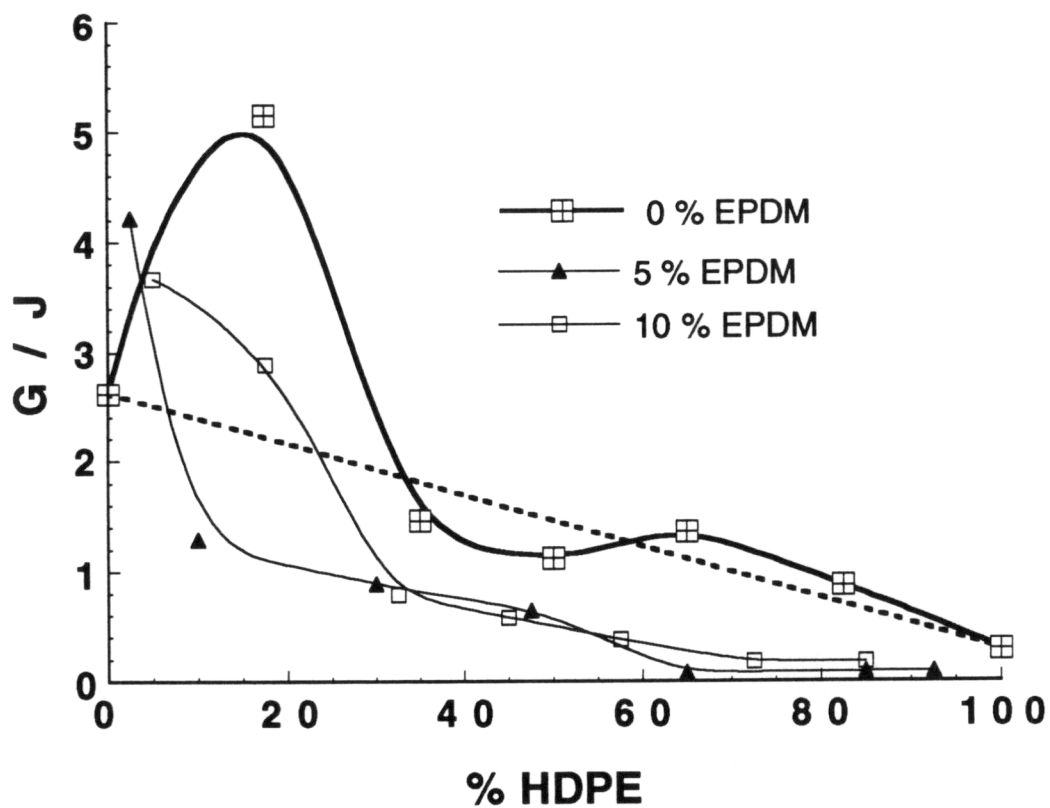


Figura 4.27. Gráficas de la energía necesaria para la ruptura de las muestras en función del contenido de HDPE, para mezclas a diferentes contenidos de EPDM.

A modo de conclusión se tiene que la influencia de elastómero es favorable en un pequeño intervalo en donde se mejora las elongaciones en los puntos de ruptura y la resistencia al impacto, sin afectar sustancialmente los esfuerzos máximos y esfuerzos a la cedencia, así como el módulo de Young, afectando ligeramente la procesabilidad; por lo que se consideran las mezclas contenidas en dicho intervalo como compatibles, desde un punto de vista de propiedades mecánicas en estudio. En cambio en el intervalo restante las propiedades presentan desviaciones negativas (excepto las mezclas sin elastómero en el intervalo de 60 a 100 % de HDPE aproximadamente), las cuales son indicativas de una disminución (drástica en las elongaciones y la resistencia al impacto) de la propiedad en estudio, por lo que las mezclas se considerarán como incompatibles.

CONCLUSIONES

Debido a que el objetivo de la presente investigación, se dirigió a estudiar el efecto que tienen las variables de operación sobre las propiedades mecánicas de los polietilenos en mezclas de HDPE/LDPE y HDPE/LDPE/ELASTOMERO, así como rayos-x para las mezclas bicomponentes y las mezclas tricomponentes que contienen PBR. A continuación se muestran las conclusiones que se obtuvieron de manera específica. Todas las conclusiones son válidas dentro de los rangos de operación y composición utilizados.

Para los componentes puros (HDPE y LDPE) se tiene que el torque de extrusión es ligeramente mayor en el HDPE debido principalmente a su mayor viscosidad, es decir, el trabajo realizado por el tornillo del extrusor para transportar al polietileno en estado fundido, es ligeramente mayor que el realizado para transportar al LDPE. Siendo también mayores los esfuerzos máximos y a la cedencia, el módulo de young y la cristalinidad, en cambio las elongaciones en el punto de ruptura son menores a las del LDPE, por lo que se trata de dos polietilenos completamente diferentes, en propiedades mecánicas.

Para las mezclas de los dos polietilenos (en mezclas binarias, las cuales se consideran más adelante como las mezclas con 0 % de elastómero) se tienen las siguientes conclusiones: El torque de extrusión depende de las concentraciones, observándose que el comportamiento es independiente de la concentración (% de HDPE) en las mezclas contenidas en el intervalo de 0 a 50 % de HDPE aproximadamente, en donde se observa un comportamiento lineal, por un lado, y por otro lado el comportamiento observado al ser comparados estos resultados con los que se obtienen de la regla de aditividad, es idéntico. En cambio a medida que se incrementa el contenido de HDPE el aumento del torque es progresivo, lo cual indica que la procesabilidad se ve desfavorecida.

Las elongaciones en los puntos de ruptura dependen fuertemente de las concentraciones, ya que a medida que se incrementa el contenido de HDPE estas tienden a disminuir progresivamente. Comparativamente con los resultados que se obtienen con la regla de aditividad se determina un intervalo (de 0 a 25 % de HDPE aproximadamente) en donde las elongaciones se ven favorecidas, en cambio en el intervalo restante se ven fuertemente disminuidas. En la evaluación de los esfuerzos máximo y de cedencia al 2 %, así como el módulo de Young, el comportamiento observado es semejante y tiende a aumentar a medida que se incrementa el contenido de HDPE. Comparativamente con los resultados de la regla de aditividad, estos son muy semejantes, con lo que las propiedades no son afectadas.

En las energías para las rupturas de las muestras (las cuales son asociadas con la resistencia al impacto) estas son dependientes de la concentración. Comparativamente con los resultados de la regla de aditividad, se obtiene una ganancia considerable en un pequeño intervalo (de 0 a 30 % de HDPE) en donde las ganancias son del orden del 100 % y muy similares en el intervalo restante. En cambio en la cristalinidad los resultados no indican gran variación al compararlos con los de la regla de aditividad, es decir, la cristalinidad no se ve afectada de manera significativa.

De lo anterior se considera que para las mezclas binarias, existe un intervalo en donde las propiedades de elongación en el punto de ruptura y resistencia al impacto presentan una mejora, en cambio las propiedades restantes no son afectadas, por lo que este pequeño intervalo se considera como una pequeña ventana de compatibilidad.

Para las mezclas 1:1 de los dos polietilenos a diferentes contenidos de PBR, el torque en las mezclas depende de las concentraciones del elastómero, observándose que el comportamiento del torque es independiente en algunas mezclas, como es el caso de las mezclas que contienen 0 (mezclas binarias sin elastómero) y 5 % de PBR, donde presentan un comportamiento similar al observado con la regla de aditividad. En cambio para los

otros contenidos de elastómero, a medida que se incrementa el contenido de PBR, el torque disminuye.

La evaluación de las elongaciones en los puntos de ruptura y la energía, las cuales muestran un comportamiento paralelo, comparativamente con los resultados de la regla de aditividad, el comportamiento que presentan no es semejante y tiende a disminuir progresivamente a medida que se incrementa el contenido de PBR, con lo cual la propiedad se ve desfavorecida en todo el intervalo de composición. Los esfuerzos máximos y a la cedencia, así como el módulo de Young también dependen de la concentración de elastómero, observándose en el comportamiento comparativo con la regla de aditividad que es independiente de la cantidad de PBR en algunas mezclas, como es el caso de las mezclas contenidas en el intervalo de 0 a 5 % de PBR, donde presentan comportamientos similares. En cambio en el intervalo restante a medida que se incrementa el contenido de elastómero, las propiedades tienden a ser desfavorecidas. En la cristalinidad los resultados indican una gran variación comparativamente con la regla de aditividad, mostrando en gran parte del intervalo de composición un aumento considerable en la propiedad.

Para las mezclas de los dos polietilenos a diferentes concentraciones y a contenidos fijos de elastomero (mezclas tricomponentes de HDPE/LDPE/PBR) se tienen las siguientes conclusiones:

Para las mezclas tricomponentes con 5 % de PBR constante, el torque de extrusión es dependiente de la concentración de los polietilenos, observándose que el comportamiento del torque es independiente de la concentración (% de HDPE) presente en algunas mezclas, como es el caso de las mezclas contenidas en el intervalo de 2.5 a 50 % de HDPE, en donde comparativamente con la regla de aditividad, presentan un comportamiento similar. En cambio para otro tipo de composiciones a medida que se incrementa el contenido de HDPE el torque aumenta ligeramente.

La evaluación de las elongaciones y la energía comparativamente con la regla de aditividad se ven favorecidas en un pequeño intervalo (de 2.5 a 8 % de HDPE para las elongaciones y de 2.5 a 15 % para la energía), observándose que son desfavorecidas a medida que se incrementan las concentraciones de HDPE. Las propiedades de los esfuerzos máximos y a la cedencia, así como el módulo de Young, comparativamente con la regla de aditividad muestran comportamientos semejantes en todo el intervalo de composición, por lo que la propiedad no se ve afectada. En la cristalinidad, comparativamente con la regla de aditividad se observa que casi en todo el intervalo de composición la propiedad se ve ligeramente favorecida.

De las mezclas tricomponentes con 5 % de PBR se puede asegurar también que existe un pequeño intervalo, en donde al menos tres propiedades (elongación, energía y cristalinidad) no se ven favorecidas, y las restantes no sufren cambios apreciables, por lo que se considera que existe compatibilidad, al menos en este pequeño intervalo.

Para las mezclas tricomponentes con 10 % de PBR el torque de extrusión también dependen de las concentraciones de los polietilenos, observándose que el comportamiento es independiente de las concentraciones en algunas mezclas, como es el caso de las mezclas contenidas en el intervalo de 5 a 45 % de HDPE, en donde se presentan comportamientos similares. En cambio para las demás mezclas, a medida que se incrementa el contenido de HDPE el aumento del torque es progresivo hasta alcanzar un valor constante en el intervalo de composición de 55 a 85 % de HDPE. Las propiedades de las elongaciones y la energía presentan un fuerte dependencia de las concentraciones, ya que a medida que se incrementa el contenido de HDPE las propiedades disminuyen progresivamente si se las compara con los valores de la regla de aditividad, excepto las mezclas con 5 % de HDPE, en donde el comportamiento es semejante, resultando desfavorecidas las propiedades en casi todo el intervalo de composición.

La evaluación de los esfuerzos a la cedencia, y el módulo de Young comparativamente con la aditividad presentan un comportamiento similar en todo el intervalo de composición, no así el esfuerzo máximo el cual es ligeramente menor, con lo cual se ve ligeramente afectado. En cambio en la cristalinidad el comportamiento no se ve afectado.

Para las mezclas tricomponentes de HDPE/LDPE/EPDM se tienen las siguientes conclusiones: Para las mezclas 1:1 en función del contenido de EPDM el torque de extrusión depende de las concentraciones del elastómero, en donde a medida que se incrementa el contenido de EPDM el aumento del torque es progresivo, alcanzando su valor máximo alrededor del 10 % de elastómero, y apartir de este último valor permanece constante, lo cual indica que para las mezclas contenidas en el último intervalo, el torque es independiente de la concentración. Comparativamente con la regla de aditividad, los torques son ligeramente mayores en todo el intervalo de composición, con lo cual la procesabilidad es afectada. La evaluación de las elongaciones y energía, comparativamente con al regla de aditividad muestra en gran parte del intervalo de composición un incremento progresivo a medida que se aumenta el contenido de elastómero, obervándose ganancias en el intervalo de 17.5 a 24 % de EPDM.

Las propiedades de esfuerzo máximo y de cedencia, asi como el módulo de Young muestran una disminución a medida que se incrementa el contenido de elastómero. Comparativamente con la regla de aditividad se observa que en todo el intervalo de composición las propiedades se ven afectadas. Por lo anterior unicamente se obtuvieron ganancias considerables en las propiedades de elongación y energía en el intervalo de 17.5 a 24 % de EPDM aproximadamente.

Para las mezclas tricomponentes a contenidos fijos de elastómero se obtuvieron los siguientes resultados: Para las mezclas con 5 % de elastómero, el torque de extrusión depende del contenido de los polietilenos, en donde a medida que se incrementa el contenido, el aumento del torque es progresivo, afectando la

procesabilidad. La evaluación de las elongaciones y energía también muestran una dependencia de las concentraciones de los polietilenos, comparativamente con la regla de aditividad las propiedades tienden a disminuir progresivamente a medida que se incrementa las concentraciones, presentando un pequeño intervalo en donde se obtienen ganancias apreciables, como es el caso de las mezclas contenidas en el intervalo de 0 a 7 % de HDPE aproximadamente.

Las propiedades del esfuerzo máximo y de cedencia, así como el módulo de Young, comparativamente con la regla de aditividad muestran comportamientos muy semejantes, con lo que la propiedad no se ve afectada significativamente. De lo anterior se proponen como mezclas compatibles las que se encuentran contenidas en el intervalo de 0 a 7 % de HDPE, ya que dos de ellas muestran ganancias y las restantes se ven ligeramente afectadas.

En las mezclas tricomponentes de los dos polietilenos a 10 % de EPDM muestran que el torque de extrusión es dependiente de las concentraciones de los polietilenos, observándose que el comportamiento del torque es independiente de la cantidad de polietileno presente en algunas mezclas, como es el caso de las mezclas contenidas en el intervalo de 0 a 30 % de HDPE aproximadamente. Comparativamente con la regla de aditividad, las mezclas contenidas en este intervalo muestran ganancias. Las propiedades de elongación y energía también muestran un comportamiento dependiente de las concentraciones, ya que a medida que se incrementa los contenidos de HDPE las propiedades disminuyen drásticamente. Comparativamente con la regla de aditividad, las mezclas contenidas en el intervalo de 0 a 30 % de HDPE aproximadamente se ven beneficiadas.

La evaluación de los esfuerzos máximos y de cedencia, así como el módulo de Young también dependen de las concentraciones, ya que a medida que se incrementan las concentraciones de HDPE la propiedad va en aumento progresivo. Comparativamente con la regla de aditividad, las propiedades se ven ligeramente afectadas, ya que presentan valores menores en casi todo el intervalo de composición, excepto las contenidas en el primer intervalo, en donde presentan

comportamientos similares. De lo anterior se ha encontrado un intervalo en donde al menos dos propiedades se ven beneficiadas y las restantes se ven ligeramente afectadas, con lo cual las mezclas contenidas en ese intervalo, son compatibles.

NOMENCLATURA.

NR	Hule natural
PE	Polietileno
PEM	Polietileno modificado
EPDM	Hule etileno-propileno-dieno
ENR	hule natural epoxidizado
CPE	Polietileno clorado
DCP	Diámicil peróxido
LDPE	Polietileno de baja densidad
HDPE	polietileno de alta densidad
BR	Hule butilo
PBR	Hule polibutadieno
ABS	Acrolitrilo-butadieno-estireno
SBS	Estireno-butadieno-estireno
ACS	Acilonitrilo-clorinado
HIPS	Poliestireno de alto impacto
PU	Poliuretano
PVC	Cloruro de polivinilo
PS	Poliestireno

PP	Polipropileno
η	Viscosidad [Pa.s]
η^*	Viscosidad compleja [Pa.s]
G'	Módulo de almacenamiento [Pa]
G''	Módulo de pérdida [Pa]
T	Temperatura [°C]
T_g	Temperatura de transición vítrea [°C]
T_m	Temperatura de fusión [°C]
X_c	Porcentaje de cristalinidad [%]
ΔH	calor de fusión
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
N_A, N_B	Grado de polimerización
S	Entropía [J/g]
ϕ, ϕ_A, ϕ_B	Fracciones volumen
F	Energía libre de mezclado
X	Parámetro de flory
R	Constante de los gases [cal/mol K]
VE	Velocidad de extrusión
rpm	Revoluciones por minuto
%ϵ	Por ciento de elongación
G	Energía necesaria para la ruptura de las muestras

σ_{rup}	Esfuerzo de ruptura [MPa]
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Esfuerzo máximo [MPa]
σ_{ced}	Esfuerzo a la cedencia [MPa]
E	Módulo de young [MPa]

BIBLIOGRAFIA.

O. Olabisi "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", third Ed., J. Wiley and Sons, Inc., New York, 1982, vol. **18**, p. 443.

D. R. Paul and S. Newman, eds., "Polymer Blends", vol I y II, Academic Press, New York, 1978.

P. J. Flory "Principles of Polymer Chemistry", Cornell Univ. Press, Ithaca, New York, 1953.

O. Olabisi, L. M. Robeson and M. T. Shaw, "Polymer - Polymer Miscibility", Academic Press, New York, 1979.

Pierre-Gilles de Gennes, "Scaling Concepts in Polymer Phisicas", Cornell University Press, Ithaca and London., 1979, pp 98-123.

Donald Paterson "Polymer Compatibility with and without a Solvent", Polymer Engieneering and Science, vol **22**, No. 2, pp 64-73, 1982.

L. A. Utracki, M. N. Donulow and P. Tomas. "Melt Rheology of High Density Polyethylene / polyamide-6 Blends ", Polymer Engineering and Science, vol **26**, 1986.

N. Inaba, K. Sato, S. Suzuki and T. hashimoto. "Investigation of Ion Transport in Network polymer from Poly (propilene oxide) Using azobenzene probes", Macromolecules, vol **19**, pp 1960, 1986.

C. T. Murray, J. W. Gilmer and R. S. Stein, "On the Molecular Structure of Isotactic Polystyrene Physical also as Revealed by Differential Scanning Calorimetry and Neutron Diffraction", Macromolecules, vol **18**, pp 996, 1985.

H. Vázquez Tunes, Tesis M. en C., Departamento de Química, UAM-I, 1894, cap II.

A. graffar, C. Sadrmoaghegh and G. Scott, "The use of Solid Phase Dispersants to Improve the properties of Binary Mixtures of Incompatibles Polymers", European Polymer Journal, vol 17, pp 941- 946, 1981.

C. Sadrmoaghegh, G. Scott and E. Setudih, "The effects of solid Phase Dispersants on ther Properties of ternary Incompatible Blends", European Polymer Journal, pp 81, 1983.

A. García Rejón, C. Rangel Nafaile y C. Alvarez gayoso, " problematica de la Descripción Teórica de las Propiedades Reológicas de Mezclas Fundidas de Polietileno de Alta y Baja Densidad", Memorias del Tercer Congreso Nacional de Polímeros, Tomo I, pp 89-93, sep 1986.

A. García Rejón and C. Alvarez Gayoso, "Mechanical and Flow Properties of High Density Polyethylene / Low Density Polyethylene Blends", Polymer Engineering and Science, vol 27, No 9, pp 640-646, 1987.

N. Roy Choudhurg, T. K. Chaki, A. Dutta and A. K. Bhowmick, "Thermal, X-Ray and Dinamic Mechanical Propeerties of Thermoplastic Natural Rubber Polyethylene Blends", Polymer, vol 30, pp 2047-2053, nov 1989.

E. Etchechury y A. Escobar, "Propiedades Mecánicas de Polietileno de Alta densidad y Polietileno de Baja Densidad", Memorias del Tercer Congreso Nacional de Polímeros, Tomo I, pp 181-184, sep 1986.

A. Escobar, "Condiciones para Obtener Mezclas Compatibles de Polietileno de Alta Densidad y Polietileno de Baja Densidad",

Memorias del II Simposio Latinoamericano de Polímeros. pp 933- 940, oct 1990.

S. K. Sexena and A. K. Nigan, "Restricted Exploration of Mixture by Simetri - Simplex Desing", Technometric, vol 19, No 1 pp 47-51, 1977.

R. A. and V. L. Anseron, "Extreme vertices Desing of Mixtures Experiments", Technometric, vol 8, No 3, pp 447-456, 1966.

M. hajian, C. Sadrnogheh and G. Scott, "Solid Phase Dispersants Synthesidad by a Mechanochemical Procedure", European Polymer Journal, vol 20, pp 135-143, 1984.

D. F. Varnell, J. P. Runt and M. M. Coleman, "Chlorinated Polyethylene Modification of Blends Derived from Waste Plastics part II: Mechanics of Modification", Polymer, vol 24, pp 37, 1983.

C. E. Locke and D. R. Paul, "FT i.r. and Thermal Analysis of Blens of Poly (ϵ -caprolactone) with homo - and Copolymer of Pdoly (vinylideno cloroide)", Polymer Engieneering and Science, vol 13, pp 308, 1973.

A. Rudin , "The Elements of Polymer Eciene and Engineering", Academics Press, N. Y., 1982.

E. P. Laguna Collar y V. E. Ibañes, "Comportamiento en Impacto de Mezclas de Polietileno de Alta y Baja densidad Modificados con un PE de bajo Peso Molecular", Hule Mexicano y Plásticos, pp 27-28, 1984.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

90360735 9A-P

ACTA NUMERO _____

LIBRO NUMERO _____

HOJA NUMERO _____

DENOMINACION DE LA TESIS

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES

MECANICAS DE LAS MEZCLAS -

TRICOMPONENTES DE POLIETILENO

DE ALTA Y BAJA DENSIDAD CON -

LOS ELASTOMEROS POLIBUTADIENO

Y ETILENO-PROPILENO-DIENO.

En México, D. F. SE PRESENTARON a las 10:00 horas del día 30 del mes de AGOSTO del año 1994 en la Unidad IZTAPALAPA de la Universidad Autónoma Metropolitana. los suscritos miembros del Jurado

DR. JOAQUIN PALACIOS ALQUISIRA;

DR. ANGEL MANZUR GUZMAN;

DR. ROBERTO OLAYO GONZALEZ Y

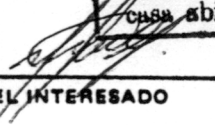
M. EN C. ANGEL ESCOBAR HERNANDEZ

bajo la Presidencia del primero y con el carácter de Secretario el último se reunieron para proceder al examen de grado de:

Maestro en INGENIERIA QUIMICA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Dirección de Sistemas Escolares

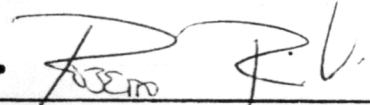


FIRMA DEL INTERESADO

JOSE HECTOR LLAMAS CHAVEZ quien presentó una comunicación de resultados, cuya denominación aparece al margen y de acuerdo con el artículo 40, fracciones I, III y IV del Reglamento de Estudios de Posgrado de esta Universidad, los miembros del Jurado resolvieron:

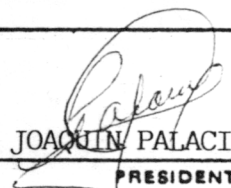
APROBARLO

REVISO

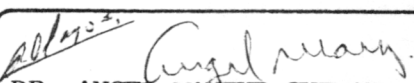


DIRECCION DE SISTEMAS ESCOLARES


Acto continuo, el Presidente del Jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



DR. JOAQUIN PALACIOS A.
PRESIDENTE

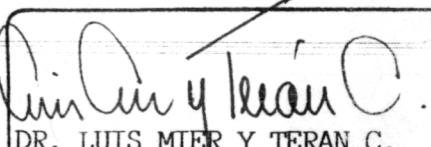


DR. ANGEL MANZUR GUZMAN
DR. ROBERTO OLAYO G.
VOCAL



M. EN C. ANGEL ESCOBAR H.
SECRETARIO

El suscrito Director de División de C.B.I. hace constar que las firmas que anteceden son auténticas y corresponden a los señores Miembros del Jurado cuyos nombres aparecen en esta acta.



DR. LUIS MIER Y TERAN C.
DIRECTOR DE DIVISION