

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA ADICIÓN DE CONCHAS DE MAR CON Y SIN AGENTES DE ACOPLAMIENTO AL PP, PEAD Y A LA MEZCLA PP/PEAD (80/20)

**Presentado a la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Químico.
Por los Brs. Alvaro H. Martínez P.
Maria Andreina Mayz H.**

Caracas, Diciembre 2003.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA ADICIÓN DE CONCHAS DE MAR CON Y SIN AGENTES DE ACOPLAMIENTO AL PP, PEAD Y A LA MEZCLA PP/PEAD (80/20)

**TUTOR ACADÉMICO: Prof. Carmen Albano.
Prof. Jeannette Gonzalez.**

**Presentado a la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Químico.
Por los Brs. Alvaro H. Martinez P.
Maria Andreina Mayz H.**

Caracas, Diciembre 2003.

**Martínez P., Alvaro H.
Mayz H., Maria A.**

ESTUDIO DE LA ADICIÓN DE CONCHAS DE MAR CON Y SIN AGENTES DE ACOPLAMIENTO AL PP, PEAD Y A LA MEZCLA PP/PEAD (80/20)

**Tutor Académico: Prof. Carmen Albano y Prof. Jeannette Gonzalez. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2003,
141.**

Palabras Claves: Conchas de mar (*bivalvos*), Carbonato de Calcio, carga, Polipropileno, Polietileno, Compuestos.

Resumen. En busca de materiales que resulten económicamente factibles y fáciles de procesar, conociendo que existen diversos trabajos e investigaciones en las que se utiliza como carga de rellano el Carbonato de Calcio CaCO_3 , se planteó la posibilidad de utilizar las conchas de mar (*bivalvos*) como relleno, por estar compuestos mayoritariamente por CaCO_3 . Es por ello, que en este trabajo, se estudia la adición de conchas de mar (*bivalvos*) al PP, al PEAD y a la mezcla PP/PEAD (80/20) variando el contenido de carga en cada una de ellas, para posteriormente seleccionar una composición óptima que será tratada con distintos porcentajes de agentes de acoplamiento y un agente compatibilizante para mejorar la dispersión y la afinidad de los componentes.

Las conchas de mar (*bivalvos*) utilizadas en esta investigación provienen de las costas del Estado Miranda, Venezuela y fueron sometidas a una etapa de preparación que se basó en el lavado, la molienda y el tamizado del polvo obtenido que seguidamente sería adicionado a los polímeros. A esta carga, se le realizaron ensayos de caracterización determinando que el contenido de carbonato de calcio en su estructura era aproximadamente de un 80%, y que poseía un tamaño promedio de partículas cercano a $78\mu\text{m}$, después de la etapa de tamizado. La incorporación de la carga a los polímeros se realizó por medio una extrusora de doble tornillo, con condiciones fijas de temperatura y velocidad, haciendo un concentrado de 50 ppc y diluciones posteriores a las proporciones de 10, 20 y 30 ppc. Sin embargo, se comprobó al finalizar la etapa experimental, a partir de un ensayo de calcinación de materia volátil, que las proporciones reales de conchas en cada formulación fueron 7, 14 y 22 ppc, con un error de aproximadamente 30%. El material obtenido producto de la etapa de extrusión, se sometió a diversos ensayos reológicos y térmicos y se moldearon las probetas por inyección para evaluar sus propiedades mecánicas, para definir su comportamiento y seleccionar una proporción óptima, que en base a criterios económicos por no observarse variaciones apreciables en las propiedades físicas y químicas de los compuestos, se selecciono la de 22 ppc. En la segunda etapa, se prepararon compuestos de PP, PEAD y PP/PEAD con esta proporción de carga, la

cual fue tratada previamente con agente de acoplamiento del tipo titanato, Lica 12, (0,3; 0,5; 0,7 y 1% en peso de carga) y con un agente compatibilizante, Polybond, (0,5% en peso de carga). De igual forma que en la primera etapa los compuestos obtenidos fueron sometidos a diversos ensayos para estudiar su comportamiento y las posibles variaciones con estos aditivos.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos térmicos, calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA), se determinó que el contenido de carga produce ligeros incrementos en el grado de cristalinidad para PP y la mezcla PP/PEAD. En los compuestos con PEAD los incrementos fueron significativos, por ser las partículas de carga posiblemente puntos de inicio de cristalización en el compuesto. Mientras que con la incorporación del agente de acoplamiento, se observa una leve influencia del tratamiento de la carga sobre los parámetros térmicos de los compuestos, observándose una disminución de la cristalinidad en las compuestos de PEAD/Conchas; en cambio, para el caso del PP/Polybond, los valores son similares a los obtenidos por las muestras sin tratar. Adicionalmente, se comprobó en base a los resultados de la reacción de descomposición térmica, que las formulaciones con carga sin tratar se ajustaban todas al modelo de Reich-Stivala (R-S), con orden de la reacción de aproximadamente uno y con un aumento en la energía de activación a medida que se incorporaba la carga y los aditivos.

Por su parte, al evaluar las curvas de los ensayos reológicos para todas las formulaciones se determinó que cumplen con la Ley de la Potencia, siguiendo un comportamiento pseudoplástico y que la viscosidad no se ve afectada de manera significativa por la incorporación de la carga, a excepción de las muestras de PEAD/Conchas donde ésta aumenta. En aquellas formulaciones en donde la carga se sometió al tratamiento con la Lica 12 y el Polybond la viscosidad tampoco sufrió alteraciones apreciables. En los parámetros de la Ley de la Potencia y en los valores del índice de flujo (MFI) se pudo corroborar la rigidización que imparte la carga a los compuestos.

Por otro lado, según los ensayos mecánicos, para todos los componentes, se observa un incremento del módulo de Young a medida que se adiciona la carga lo que concuerda con el aumento de la cristalinidad obtenido; sin embargo, el punto de ruptura tiende a disminuir a medida que el contenido de carga (conchas) aumenta, observándose una dispersión en los datos de las formulaciones de PP y PEAD. En el caso de la mezcla, los datos presentan una leve dispersión y un comportamiento sin modificaciones considerables. Para el caso de la deformación a la ruptura, de forma similar a como ocurre con el esfuerzo, a medida que se incrementa el contenido de carga (conchas) en cada formulación, el valor de esta propiedad disminuye, observándose una dispersión considerable para las muestras de PEAD. Esto se debe a que las cargas pueden suprimir la formación de cuellos e iniciar el rompimiento por microgrietas formadas por las débiles interfases entre las partículas de carga y la

matriz polimérica. Por último, la disminución en las propiedades de fluencia de los compuestos muestran la fragilización del material a medida que se adiciona la carga.

De igual forma que en la primera etapa de la parte experimental, los compuestos con el tratamiento de la carga fueron sometidos a los ensayos mecánicos, teniendo una disminución del módulo de Young a medida que el porcentaje de Lica 12 en las muestras incrementaba, haciéndose más evidente para el PEAD, apreciándose el efecto lubricante de este aditivo; teniendo la misma tendencia para el esfuerzo a la ruptura y fluencia. Este comportamiento, en conjunción con el aumento de la deformación a la fluencia, hacen del material más flexible a medida que el porcentaje de aditivo se incrementa. Para las muestras con Polybond, en el caso del PP, se aprecia un incremento del módulo de Young y en el esfuerzo a la ruptura, así como en los parámetros de fluencia, y una disminución de la deformación a la ruptura, evidenciando su efecto compatibilizante obteniéndose un material más rígido.

A todas las muestras se les realizó el ensayo de Impacto, pero debido a la gran dispersión de los resultados obtenidos no se puede apreciar una tendencia definida en ningún caso.

Caracas, 05 de Diciembre de 2003.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Alvaro H. Martínez P y Ma. Andreina Mayz H., titulado:

**“ESTUDIO DE LA ADICIÓN DE CONCHAS DE MAR CON Y SIN
AGENTES DE ACOPLAMIENTO AL PP, PEAD Y A LA MEZCLA PP/PEAD
(80/20)”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. Mirem Ichazo
Jurado

Dr. Arquímedes Karam
Jurado

Prof. Carmen Albano
Tutor Académico

Prof. Jeannette Gonzalez
Tutor Académico

DEDICATORIA

*A Dios por darnos la oportunidad de estudiar en la UCV,
A nuestros padres, por existir..
A nuestras familias por ser un soporte cuando más lo necesitábamos,
A nuestras tutoras..
A todos nuestros amigos...*

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada quisiera agradecer a Dios por permitirme llegar hasta aquí. Gracias a mis padres y a mi hermana, por estar allí apoyándome en cada paso del camino, por ayudarme siempre que necesite su ayuda sin poner ningún pero, por trabajar tanto para brindarme las oportunidades que he tenido y por simplemente ser como son. Gracias a toda mi familia, tanto los que están como los que se fueron, porque siempre los tengo en mi corazón. Gracias a mi novia Jennifer, que aunque no este conmigo en el instante en que escribo estas líneas y que tal vez no las lea pronto, siempre la llevo en mi corazón. Te envío todo mi amor y gratitud. Gracias a Maria Andrina, mi compañera y amiga en esta pequeña aventura (gracias por aguantarme). Gracias a mis tutoras Carmen y Jeannette por confiar en nosotros y ayudarnos a cumplir nuestras metas. Gracias también a Isor, nuestra tercera tutora y amiga; y a Héctor por toda su asesoría. Gracias a toda la gente del Laboratorio E de polímeros de la Universidad Simón Bolívar, a todos los técnicos, profesores y tesistas que de una forma u otra nos ayudaron y nos indicaron el camino. Gracias a la gente del IVIC y del laboratorio de polímeros de la escuela. Gracias a todos mis amigos y compañeros de universidad, a mis viejos amigos del colegio, a mis amigos de los primeros semestres de la carrera, a mis amigos del coro, a mis amigos del departamento de dibujo y a mis amigos de la escuela; que aunque no intervinieron directamente, me ayudaron a mantenerme cuerdo y se aguantaron todas mis quejas. Y por sobre todo gracias a la Universidad Central de Venezuela, no solo por su gente y sus muros, sino también por su alma implícita pero real.

Gracias.

El Trabajo Especial de Grado que viene anexo con estas líneas posee mucho más significado que el contenido de sus páginas. Para mi es mucho más que las pruebas y ensayos realizados y que las conclusiones razonadas. Este trabajo es la materialización de un esfuerzo continuo que comenzó mucho antes de mi ingreso a la UCV. Muchos dicen que el destino es el que uno mismo se forja; para mi, aparte de esto, existen demasiadas y diversas variables en este mundo que influyen en quienes somos. Y estas variables, tal vez siguiendo algo parecido a la teoría del caos, tienden a conseguir una armonía a un grado mucho mayor. Si el llegar a este punto es parte de mi destino, no lo sé; pero es el camino que escogí y que transite. Un camino que no comenzó al yo entrar a esta carrera, y que tampoco termina en este capítulo...

Alvaro H. Martínez

Al mirar atrás, quizás más allá de unos meses y recordar en cuando esta aventura empezó, no solo este trabajo sino mi carrera, es imposible no pensar en las cosas aprendidas y en la cantidad innumerable de veces en las que estuve en el pasillo de la escuela esperando..una nota, el preámbulo de un parcial o simplemente la tertulia con los amigos y profesores en los ratos libres..las muchas ocasiones en las que transite por las aulas de la facultad..mi facultad, en busca de algo más allá que solo conocimientos.

Al ver finalizado este trabajo, también finaliza una etapa inolvidable de mi vida, la que gracias a Dios tuve el placer de disfrutar y compartir con mis padres y mis hermanos, quienes me apoyaron y dieron ánimo en cada tropiezo, alegría o aventura nueva a emprender; en la que nunca faltaron mis amigos: mis amigos “sospechosos” que siempre con una sonrisa me acompañaron y compartieron cada secreto, desilusión o tremadura que el tiempo nos permitía..más de una recuerdan!!

Estando tan cerca de cumplir uno de mis sueños..tengo que agradecer a aquellas personas que me ayudaron a hacerlo posible, a mis tutoras: Carmen y Jeannette, quienes me enseñaron que siempre hay algo más..a nuestra “tercera tutora”, quien además llegó a ser mi amiga, al “magallanero” Fabio, a mi segundo papá Próspero, a Héctor quien me enseñó que a veces guiarse por los instintos te lleva más lejos que pensar...personas que me ayudaron a crecer no solo como profesional sino como persona a través de sus anécdotas y consejos..y que sin ellos, sin su ayuda incondicional no lo hubieramos logrado..por último a mi compañero, Alvaro quien en serio no sabía en que se metía cuando acepto mi propuesta, pero que resultó ser más que un buen compañero..un buen amigo con el que compartí más que la hechura de una tesis..más que unas canciones o un concierto...compartimos un sueño que ambos lograremos cumplir juntos..convertirnos en Ingenieros de la Universidad Central de Venezuela..Ingenieros de esta República...

Andreina...

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los polímeros han venido sustituyendo de forma acelerada a diversos materiales de uso común debido a las propiedades que poseen, su adaptabilidad, flexibilidad y bajo costo en las técnicas de manufactura, compitiendo con metales y vidrios, entre otros; generando a nivel mundial la existencia de una gran variedad de materiales poliméricos, los cuales son empleados en diversas áreas importantes, tales como la medicina, la industria química, automotriz, eléctrica, entre otras; esto ha provocado que tanto el campo de la investigación como el desarrollo de procesos y productos sean sumamente extensos y de gran utilidad.

Sin embargo, los requerimientos para la producción de nuevos polímeros cada vez son más complicados y es por ello que en la industria del plástico ha crecido el interés por estudiar la mezcla y la combinación de un material polimérico en particular con distintos tipos de carga, con la finalidad de disminuir los costos de producción y aumentar el volumen del material, además de aprovechar o mejorar las propiedades existentes en cada uno. Por lo que, una de las metas más importantes en este campo es lograr nuevos materiales, con el objetivo de que posean las mejores propiedades mecánicas, físicas y térmicas, para lo cual se estudian nuevas maneras de combinarlos.

Las poliolefinas, tales como el polipropileno (PP) y el polietileno (PE), han resultado ser los termoplásticos de mayor estudio y desarrollo en el ámbito industrial. No obstante, las propiedades de las mezclas PP/PE muestran un comportamiento complejo que viene dado por la carencia de adhesión entre las fases poliméricas, debido a que ambos componentes son inmiscibles e incompatibles. Por esta razón, el grado de compatibilidad entre los componentes de la mezcla resulta ser un factor determinante en las propiedades finales del sistema.

Por otra parte, la adición de una carga, también puede proporcionar cambios en los polímeros o en mezclas de polímeros. Sin embargo, esto genera un interés en el estudio de la interfase y la mejora de la adhesión entre la carga y la matriz polimérica para lograr un efecto positivo en las propiedades mecánicas del compuesto final. Entre los agentes que pueden variar la adhesión interfacial carga-polímero están los agentes de acoplamiento, cuyo objetivo principal es actuar como puente de unión entre la fase orgánica e inorgánica, para así obtener, en muchas de las propiedades, un producto terminado con características físicas, químicas, térmicas y mecánicas superiores al producto original.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, y la necesidad de encontrar materiales capaces de sustituir a otros ya existentes, que por su alto costo de manufactura y producción, así como de los aditivos adicionales que se deben añadir en la búsqueda de aquellas propiedades que permitan su uso de manera adecuada en el mercado y por el usuario; se plantea la posibilidad de realizar el estudio de la adición de una carga del tipo conchas de mar (*bivalvos*) con y sin

agentes de acoplamiento al PP, PEAD y a la mezcla PP/PEAD (80/20), teniendo en cuenta que la carga a utilizar además de ser un desecho de la industria pesquera es una fuente natural de carbonato de calcio (CaCO_3). Sin embargo, las referencias o antecedentes sobre trabajos anteriores para esta carga en particular son escasas, por lo que considerando las distintas investigaciones y conclusiones en las que los carbonatos han sido implementados como aditivo, se encuentran diversas características en el producto final que hacen pensar en la posibilidad de incursionar en el mercado del reciclaje.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Estudiar el efecto de la adición de una carga del tipo *Conchas de Mar* sobre las propiedades del compuesto polimérico (PP, PEAD, PP/PEAD)-Carga, con y sin agentes de acoplamiento.

Objetivos Específicos

- Determinar la forma óptima de alimentación de la carga a la extrusora, para mejorar la dispersión de la carga en la matriz polimérica.
- Estudiar el efecto de la adición de diferentes porcentajes de carga (tipo conchas de mar) sin tratar a los homopolímeros PP, PEAD y a la mezcla PP/PEAD (80/20), sobre las propiedades: mecánicas (tensiles y de impacto).
- Realizar los estudios térmicos de los compuestos.
- Estudiar la reología y los índices de fluidez a los compuestos.
- Encontrar la mejor composición de carga en las mezclas: PP/Conchas, PEAD/Conchas y PP/PEAD/Conchas.
- Analizar el efecto de la adición de un agente de acoplamiento tipo titanato a la carga, utilizando la composición óptima, sobre las propiedades térmicas y mecánicas de los homopolímeros PP, PEAD y de la mezcla PP/PEAD (80/20).
- Estudiar el efecto de la adición de un agente de acoplamiento tipo titanato a la carga, utilizando la composición óptima, sobre las propiedades reológicas de los homopolímeros PP, PEAD y de la mezcla PP/PEAD (80/20).

INDICE DE CONTENIDO

Contenido	págs.
Introducción	
Objetivos	
➤ Objetivo General	
➤ Objetivos Específicos	
I. MARCO TEÓRICO	
I.1) Polímeros	1
I.2) Polietileno (PE)	1
I.2.1) Polietileno de alta densidad	2
I.3) Polipropileno (PP)	2
I.4) Polimezclas	3
I.5) Moluscos	8
I.5.1) Bivalvos o peliépodos	8
I.6) Cargas	11
I.7) Agentes promotores de la adherencia	14
I.7.1) Agentes de acoplamiento	15
I.7.1.1) Titanatos	16
I.8) Procesamiento de plásticos	17
I.8.1) Extrusión de Mezclas	17
I.8.2) Moldeo por inyección	19
I.8.2.1) El ciclo de moldeo	20
I.9) Caracterización de los polímeros	20
I.9.1) Propiedades Mecánicas	21
I.9.2) Propiedades Térmicas	22
I.9.2.1) Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	22
I.9.2.2) Análisis Termogravimétrico (TGA)	23
I.9.3) Reología	25
I.9.3.1) Reometría	25
I.9.3.2) Índice de Flujo	28
I.9.3.3) Manifestaciones elásticas en polímeros fundidos	29
I.9.3.4) Aplicaciones de las evaluaciones reológicas	29
I.10) Antecedentes de mezclas de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (PEAD)	30
II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	35
II.1) Materiales	35
II.1.1) Polímeros	35
II.1.2) Carga	36
II.1.3) Agente de Acoplamiento	36
II.1.4) Compatibilizante	36
II.2) Equipos	37

Contenido	págs.
II.3) Cronograma de experiencias	37
II.3.1) Tratamiento de la materia prima (conchas de mar)	37
II.3.2) Preparación de los compuestos	38
II.3.3) Preparación de las probetas	40
II.3.4) Caracterización de los compuestos	42
II.4) Preparación de los compuestos con agentes de acoplamiento	42
II.4.1) Tratamiento de la carga	42
II.5) Ensayos Mecánicos	43
II.5.1) Ensayos de Tracción	43
II.5.2) Ensayos de Impacto	45
II.6) Propiedades térmicas	46
II.6.1) DSC	46
II.6.2) Termogravimetría	47
II.7) Propiedades Reológicas	48
II.7.1) Medición del Índice de Fluidez (IF) mediante un Plástometro	48
II.7.2) Reometría Capilar	49
II.8) Calcinación	50
III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
III.1) Estudio del efecto de la proporción de carga (<i>bivalvos</i>) sobre las propiedades del compuesto	53
III.1.1) Propiedades Térmicas	53
III.1.2) Propiedades Reológicas	59
III.1.3) Propiedades Mecánicas	62
III.2) Estudio del efecto del contenido de aditivos sobre las propiedades del compuesto con un contenido de conchas (<i>bivalvos</i>) de 22 ppc	67
III.2.1) Propiedades Térmicas	67
III.2.2) Propiedades Reológicas	71
III.2.3) Propiedades Mecánicas	75
IV. CONCLUSIONES	80
V. RECOMENDACIONES	82
VI. BIBLIOGRAFÍA	83
VII. APENDICES	89
VII.1) Curva de calibración de la tolva	89
VII.2) Propiedades Térmicas	90
VII.3) Propiedades Reológicas	95
VII.4) Propiedades Mecánicas	112
VIII. ANEXOS	
VIII.1) Contribuciones de la carga al producto	
VIII.2) Propiedades Mecánicas	
VIII.3) Resultados de la calcinación de materia volátil	
VIII.4) Especificaciones de los polímeros según el fabricante	

INDICE DE FIGURAS

Contenido	págs.
Figura N°1. Posibles comportamientos de una mezcla polimérica.	5
Figura N°2. Invertebrados Marinos: Moluscos.	8
Figura N°3. Invertebrados Marinos: Moluscos.	8
Figura N°4. Invertebrados Marinos: Bivalvos.	9
Figura N°5. Invertebrados Marinos: Bivalvos.	10
Figura N°6. Bivalvos.	10
Figura N°7. Clasificación de las cargas y/o rellenos.	11
Figura N°8. Características principales de un extrusor de un tornillo sinfin simple	18
Figura N°9. Fundamentos del moldeo por Inyección.	20
Figura N°10. Diagrama de un DSC.	23
Figura N°11. Diagrama de un reómetro capilar.	26
Figura N°12. Coeficiente de corrección de Bagley.	28
Figura N°13. Diagrama general de la extrusora.	39
Figura N°14. Extrusora de doble tornillo co-rotante con seis etapas de calentamiento, marca BERSTOFF/ECS	39
Figura N°15. Diagrama general de la granuladora	40
Figura N°16. Diagrama general de una máquina de moldeo por inyección.	41
Figura N°17-A. Máquina de moldeo por inyección REED PRENTICE, modelo N° 100 TE	41
Figura N°17-B. Detalles del molde.	42
Figura N°18. Diagrama general de una máquina de ensayos universales y el tipo de probetas	43
Figura N°19. Máquina de ensayos universales, marca LLOYD Instruments, modelo EZ-20	44
Figura N°20. Dimensiones de una probeta para los ensayos de tracción.	44
Figura N°21. Geometría de las probetas para los ensayos de impacto.	45
Figura N°22. Máquina de entallado, Testing Machines Inc., modelo TMI 43-15.	45
Figura N°23. Máquina de ensayos de impacto ZWICK D 7900, tipo 5102.	46
Figura N°24. Esquema general de un DSC.	46
Figura N°25. Termograma típico de un DSC.	47
Figura N°26. Diagrama general de un plástometro.	48
Figura N°27. Plástometro marca DAVENPORT modelo 3180.	49
Figura N°28. Reómetro capilar RHEOGRAPH 2000, marca GÖTTFERT.	50
Figura N°29. Distribución del tamaño de partículas (acumulada) de	52

las conchas.

Contenido	págs.
Figura N°30. Curva de calentamiento por DSC para el PP según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	54
Figura N°31. Curva de calentamiento por DSC para el PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	55
Figura N°32. Curva de calentamiento por DSC para la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación	55
Figura N°33. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de PP según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	57
Figura N°34. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación	58
Figura N°35. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación	58
Figura N°36. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PP según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	59
Figura N°37. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	60
Figura N°38. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	60
Figura N°39. Módulo de Young según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada una de las formulaciones.	63
Figura N°40. Esfuerzo a la ruptura según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	65
Figura N°41. Deformación a la ruptura según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	65
Figura N°42. Resistencia al impacto según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	66
Figura N°43. Curva de calentamiento por DSC para el PP según el contenido de aditivo en cada formulación.	67
Figura N°44. Curva de calentamiento por DSC para el PEAD según el contenido de aditivo en cada formulación.	68
Figura N°45. Curva de calentamiento por DSC para la mezcla PP/PEAD según el contenido de aditivo en cada formulación.	68
Figura N°46. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de PEAD según el contenido de aditivo en	70

cada formulación.

Contenido	págs.
Figura N°47. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de PP según el contenido de aditivo en cada formulación.	71
Figura N°48. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de la mezcla PP/PEAD según el contenido de aditivo en cada formulación.	71
Figura N°49. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PP a 22 ppc de carga según el contenido de aditivo en cada formulación.	72
Figura N°50. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PEAD a 22 ppc de carga según el contenido de aditivo en cada formulación.	73
Figura N°51. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para la mezcla PP/PEAD a 22 ppc de carga según el contenido de aditivo en cada formulación.	73
Figura N°52. Módulo de Young según el porcentaje Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (<i>bivalvos</i>) a 22 ppc.	77
Figura N°53. Esfuerzo a la ruptura según el porcentaje Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (<i>bivalvos</i>) a 22 ppc.	78
Figura N°54. Deformación a la ruptura según el porcentaje Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (<i>bivalvos</i>) a 22 ppc.	78
Figura N°55. Curva de calibración de la tolva de alimentación.	89
Figura N°56. Curva de cristalinidad por DSC para el PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	90
Figura N°57. Curva de cristalinidad por DSC para el PP según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	91
Figura N°58. Curva de cristalinidad por DSC para la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	91
Figura N°59. Curva de cristalinidad por DSC para el PEAD según el porcentaje de aditivo en cada formulación.	92
Figura N°60. Curva de cristalinidad por DSC para el PP según el porcentaje de aditivo en cada formulación.	93
Figura N°61. Curva de cristalinidad por DSC para la mezcla PP/PEAD según el porcentaje de aditivo en cada formulación.	93
Figura N°62. Resultado del análisis termogravimétrico de la carga	94

(*bivalvos*).

Contenido	págs.
Figura N°63. Resistencia al impacto según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	114
Figura N°64. Esfuerzo a la fluencia según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	114
Figura N°65. Deformación a la fluencia según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	115
Figura N°66. Resistencia al Impacto según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (<i>bivalvos</i>) a 22 ppc.	115
Figura N°67. Esfuerzo a la fluencia según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (<i>bivalvos</i>) a 22 ppc.	116
Figura N°68. Deformación a la fluencia según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (<i>bivalvos</i>) a 22 ppc.	116
Figura N°69. Contribuciones de la carga al producto.	117
Figura N°70. Curva tensión-deformación.	119

INDICE DE TABLAS

Contenido	págs.
Tabla N°1. Características de los polímeros a utilizar (según el fabricante).	35
Tabla N°2. Descripción y Estructura del agente de acoplamiento.	36
Tabla N°3. Propiedades físicas del Polybond 3150.	36
Tabla N°4. Condiciones de operación de la extrusora para la preparación de la mezclas.	38
Tabla N°5. Condiciones de operación de la máquina de inyección para la preparación de las probetas.	40
Tabla N°6. Condiciones de operación de los ensayos de tracción en las probetas.	44
Tabla N°7. Perfil de temperaturas de operación del reómetro capilar.	50
Tabla N°8. Resultados de la calcinación de las muestras de PP cargadas sin tratar.	53
Tabla N°9. Propiedades térmicas de los compuestos según el contenido de cargas (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	56
Tabla N°10. Orden de reacción y energía de activación según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	57
Tabla N°11. Exponente (n) e Índice de consistencia (k) de la Ley de la Potencia según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	61
Tabla N°12. Índice de fluidez según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) en cada formulación.	62
Tabla N°13. Propiedades térmicas de los compuestos con 22 ppc según el contenido de aditivo en cada formulación.	69
Tabla N°14. . Orden de reacción y energía de activación según el contenido de aditivos en cada formulación.	70
Tabla N°15. Exponente (n) e Índice de consistencia (k) de la Ley de la Potencia según el porcentaje de aditivo en cada formulación.	74
Tabla N°16. Índice de fluidez según el contenido de aditivos en cada formulación.	75
Tabla N°17. Propiedades térmicas de los compuestos según el contenido de carga en cada formulación (J/g muestra).	90
Tabla N°18. Propiedades térmicas de los compuestos con 22 ppc según el porcentaje de aditivo en cada formulación (J/g muestra).	92
Tabla N°19. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para la mezcla PP/PEAD/Conchas.	95
Tabla N°20. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el	98

Contenido	págs.
Tabla N°21. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PEAD/Conchas.	100
Tabla N°22. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PP/PEAD/Conchas/Aditivos.	103
Tabla N°23. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PP/Conchas/Aditivos.	106
Tabla N°24. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PEAD/Conchas/Aditivos.	109
Tabla N°25. Propiedades mecánicas según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) para los compuestos de PP.	112
Tabla N°26. Propiedades mecánicas según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) para los compuestos de PEAD.	112
Tabla N°27. Propiedades mecánicas según el contenido de carga (<i>bivalvos</i>) para los compuestos de PP/PEAD.	112
Tabla N°28. Propiedades mecánicas según el contenido de aditivos para los compuestos de PP.	113
Tabla N°29. Propiedades mecánicas según el contenido de aditivos para los compuestos de PEAD.	113
Tabla N°30. Propiedades mecánicas según el contenido de aditivos para los compuestos de PP/PEAD.	113

I.- MARCO TEÓRICO

I.1.- Polímeros

Los polímeros son materiales de alto peso molecular o macromoléculas naturales o sintéticas, formadas por la unión de moléculas iguales denominadas *monómeros* que tienen grupos funcionales que permiten su combinación bajo condiciones adecuadas. La ordenación de estas moléculas y los diversos tipos de cadenas que pueden ser sintetizadas, además de las formas que puedan adoptar, dan lugar a un surtido grupo de materiales que se caracterizan por un gran conjunto de propiedades, que pueden relacionarse con la naturaleza del monómero, así como con las interacciones intra e intermoleculares existentes en el seno de estas macromoléculas.

La clasificación de los polímeros se puede llevar a cabo a partir de tres aspectos:

1. Por su estructura interna:
 - *Polímero atáctico*: las configuraciones son aleatorias a lo largo de la cadena polimérica.
 - *Polímero isotáctico*: las configuraciones a lo largo de la cadena polimérica, son idénticas.
 - *Polímero sindiotáctico*: las configuraciones son alternadas a lo largo de la cadena macromolecular.
2. Por la vía de síntesis:
 - *Polímeros de condensación*: la unidad química que se repite tiene una fórmula molecular distinta a la de los monómeros de partida, tras la condensación de ciertos grupos (poliamidas, poliésteres, entre otros).
 - *Polímeros de adición*: las unidades estructurales de los polímeros tienen las mismas fórmulas moleculares que sus monómeros de partida pero con una disposición de enlaces distinta (polietileno, polipropileno, entre otros).
3. Por su comportamiento al ser calentados:
 - *Termoplásticos*: tienen la característica de que fluyen y pueden ser moldeados fácilmente a altas temperaturas, retornando a su forma inicial al ser enfriados.
 - *Termoestables*: inicialmente por acción del calor, pueden ser moldeados y fluir en una forma concreta, pero un nuevo calentamiento solo provocaría una degradación de la estructura formada.

I.2.-Polietileno (PE)

Es un polímero producido a partir de la polimerización del monómero de etileno ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Según el proceso de polimerización pueden producirse resinas plásticas con diferentes densidades, como por ejemplo: Polietileno de alta (PEAD) o baja densidad (PEBD), Polietileno lineal de baja densidad (PELBD), entre otros; sabiendo que, una poliolefina es un termoplástico semicristalino que se caracteriza por una buena resistencia química y buen aislamiento eléctrico. La dureza del

polietileno es una consecuencia de su estructura cristalina: cuanto mayor es su estructura cristalina, tanto más duro y rígido es el producto. Se pueden transformar con facilidad por los sistemas convencionales de producción; siendo uno de los grupos de plásticos más utilizados en diferentes aplicaciones, como lo es el de los envases.

Al estar en contacto con la luz y el oxígeno, el polietileno envejece perdiendo propiedades de resistencia y alargamiento, al igual que su solubilidad está condicionada por su alto peso molecular, teniendo suma importancia el grado de ramificación de la cadena al momento de considerar la capacidad de cristalización del sólido.

Dentro de la diversidad de utilidades que posee el polietileno, se pueden mencionar:

- Aislante en cables de alta frecuencia y transmisión de energía (Submarinos).
- Botellas y otros envases, tuberías de agua y películas para envoltorios, entre otros.
- Envases contenedores de ácido fluorhídrico (HF), debido a su inercia química.
- Para empacar productos alimenticios, utilizando un espesor que puede variar entre 0,025 y 0,250 mm.
- Forros para la protección de objetos metálicos, equipos eléctricos, piezas grandes de maquinarias y vehículos; para evitar el deterioro a causa de la humedad.
- Material de empaques en general.

I.2.1.-Polietileno de Alta Densidad

Se produce por el proceso de polimerización a bajas presiones. Según este proceso se fabrica la mayor parte del polietileno. Actualmente se define solamente por su rango de densidad que va desde 0,941g/cm³ hasta 0,965 g/cm³. Es una poliolefina de cadenas lineales; utilizado para fabricar botellas de leche, jugo, agua y productos de limpieza. Las botellas de PEAD no pigmentadas son translúcidas, muy buenas barreras al vapor de agua y duras. Las pigmentadas son de mayor resistencia química que las no pigmentadas, propiedad necesaria para el llevar a cabo el envase de artículos de limpieza, detergentes con un mayor tiempo de vida. Los artículos de PEAD fabricados por inyección son resistentes a quebraduras y deformación y se utilizan, por ejemplo en potes para yogurt.

I.3.-Polipropileno (PP)

Es un termoplástico que se obtiene por polimerización del gas propileno (CH₂=CH₃). Tiene una excelente resistencia química, y es el de más baja densidad (0,9 g/cm³), entre los plásticos utilizados para envases, lo cual favorece un alto rendimiento. Tiene un elevado punto de fusión, lo cual lo hace ideal para contener líquidos y alimentos a alta temperatura. Posee buenas propiedades mecánicas,

térmicas y eléctricas y óptima resistencia química. En los copolímeros con etileno, se mejora esta resistencia química así como la fragilidad a bajas temperaturas. Se puede moldear fácilmente por inyección, soplado, por termoformado en vacío; mientras que por extrusión, se pueden obtener películas, monofilamentos, barras, tubos, planchas, entre otros.

Además, se pueden mencionar entre otras de sus aplicaciones:

- Elaboración de piezas industriales, componentes eléctricos y electrónicos, químicos, cuerpos huecos, tubos, piezas resistentes al agua, artículos para cocina, envases flexibles semirígidos y rígidos, juguetes, industria textil, mobiliario, construcción, cintas para embalaje, entre otros.
- Fabricación de artículos como: maletas, piezas de automóvil, accesorios para aspiradoras, cámaras, proyectores, máquinas de oficina, envases de detergentes, estuches de radio y televisión, algunos juguetes, tacones para zapatos, mangos de utensilios de cocina, piezas de refrigerador y cajas de baterías.
- Manufactura de artículos que requieran esterilización con vapor, como: utensilios de hospitales.
- En el campo de la electrónica, por sus propiedades dieléctricas.
- Para la producción de películas destinadas a los envoltorios, ya que poseen una alta resistencia al desgarramiento y pueden ser selladas con calor.

I.4.-Polimezclas

Cuando están presentes dos o más compuestos en una mezcla, se habla de un material homogéneo: que se caracteriza porque los componentes tienen la habilidad termodinámica de mezclarse a nivel molecular; o heterogéneo: reconocido por la mala distribución de las fases mezcladas, obteniéndose zonas en las que predomina una de ellas; este factor depende de la miscibilidad de los componentes presentes.

Las polimezclas son mezclas homogéneas o heterogéneas de dos o más polímeros químicamente diferentes [Hans G. et al (1997)] y se pueden clasificar en dos grupos:

- Mezclas Químicas: que se unen mediante la acción de enlaces químicos primarios (iónicos o covalentes), formados como consecuencia de una reacción química.
- Mezclas Físicas: son las combinaciones que se adhieren a través de la acción de fuerzas de enlaces secundarios. El grado de interacción de estos sistemas, es uno de los factores de mayor interés, el cual depende fundamentalmente de la fuerza de adhesión entre las fases ya que determina las propiedades finales del sistema, las cuales estarán afectadas por: el tamaño y la distribución de las fases dentro de la mezcla, la composición química, la estructura cristalina, la morfología, el peso molecular y el procesamiento. [Siegmann (1979)].

Las poliolefinas son los principales polímeros termoplásticos, por lo que entre las polimezclas más comunes se encuentran las que están formadas por estas sustancias, sabiendo que, el mezclado físico de los homopolímeros constituye una técnica práctica para modificar las propiedades de los polímeros originales, siendo esta la razón por la cual en los últimos años ha ido creciendo el interés en perfeccionar esta industria del mezclado, ya que ha sido reconocida como uno de los métodos más efectivos para obtener materiales con requerimientos específicos.

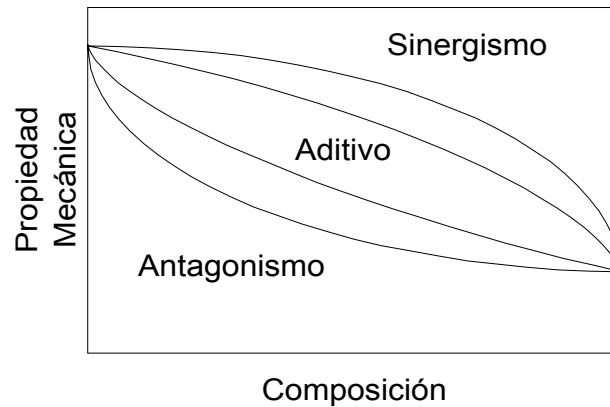
A pesar de que las polimezclas físicas se han desarrollado para mejorar las propiedades de los polímeros puros, esto no siempre se logra debido a que las ventajas que una mezcla de polímeros puede ofrecer deben ser balanceadas con aquellas indeseables, tales como el comportamiento reológico complejo y la dificultad en las técnicas de fabricación, que además producen ciertas reducciones de algunas propiedades físicas y mecánicas del producto final.

Se puede concluir, entonces, que la finalidad primordial que se persigue al mezclar dos polímeros estructuralmente diferentes es, por un lado mejorar algunas de las propiedades: dureza, tenacidad, resistencia, entre otras; deficientes en los polímeros convencionales y por otro lado, disminuir los costos de procesamiento, debido a que con la mezcla de polímeros, se puede obtener un material con un buen rango de propiedades, de una baja relación costo/precio, y además la oportunidad de reciclar el material degradado.

La búsqueda de garantizar la adhesión entre los componentes de la polimezcla, debe basarse en el principio de que los polímeros que forman parte de la mezcla, deben complementarse el uno con el otro, además de tomar en cuenta algunos parámetros, como: la procesabilidad, la resistencia física y térmica, la flexibilidad de los segmentos y el balance en la combinación de propiedades mecánicas; con la finalidad de optimizar el uso de las propiedades de los componentes para dar al producto final, las características deseadas en base a las especificaciones.

Según lo escrito anteriormente, se puede decir de una forma muy general que no es fácil, a simple vista, predecir el posible comportamiento mecánico que pueden presentar dos o más polímeros al ser mezclados, debido a que las diferencias entre sus estructuras ha permitido apreciar que las propiedades mecánicas de las polimezclas muestran un comportamiento característico; que varía entre tres categorías: la aditividad, el sinergismo y el antagonismo; del producto de la mezcla. [Paul et al (1980)].

Figura N°1. Posibles comportamientos de una mezcla polimérica.
[Paul et al (1980)]



Como se muestra en la figura N°1, la aditividad, es la variación lineal de una propiedad con respecto a la composición de la mezcla, en cambio, el sinergismo, se basa fundamentalmente en que la propiedad mecánica considerada presenta un máximo, es decir, para ciertas composiciones la mezcla presenta valores más altos que aquellos que corresponden al de los componentes en estado puro, siendo este comportamiento, el menos frecuente y el más esperado por los investigadores. Mientras que, la tercera posibilidad, el antagonismo, es causada por el fenómeno de la incompatibilidad entre las fases. Este fenómeno ocurre cuando la propiedad considerada no sigue la relación de aditividad, es decir, a ciertas composiciones las características conseguidas para la propiedad son menores que la de los componentes en estado puro. Esta última situación es frecuentemente ocasionada, por el bajo grado de la adhesión interfacial existente entre las moléculas de los diferentes componentes, trayendo como consecuencia defectos y fallas a nivel microscópico, lo que se ha convertido en un obstáculo que ha impedido la utilización de muchas de las polimezclas hasta ahora encontradas.

Actualmente, los investigadores carecen de teorías rigurosas que puedan ser usadas para predecir y/o explicar la compatibilidad o incompatibilidad de las polimezclas constituidas por dos o más polímeros cuyas estructuras moleculares sean conocidas; en donde con frecuencia, tienden a asociar este fenómeno, con la no existencia de una única temperatura de transición vítrea de la mezcla.

Se conoce que la gran mayoría de las polimezclas físicas son inmiscibles, y que lograr la miscibilidad en estas mezclas no es sencillo, ya que la misma depende de varios factores, como: la naturaleza química, la estructura, el peso molecular, la distribución del peso molecular, la temperatura y composición de los polímeros que se desean mezclar; por lo que, obtener mezclas poliméricas que formen una fase miscible ha sido una de las muchas preocupaciones de los científicos, ya que no siempre se pueden generar sistemas miscibles porque al existir dos o más componentes en una polimezcla, se pueden presentar, en general, tres posibilidades en cuanto a la continuidad de las mismas, es decir, ambas fases pueden ser continuas,

discontinuas o puede darse el caso de que, una sea continua mientras que la otra discontinua. [Jasso y Laguna (1994)].

Teóricamente, la miscibilidad y/o la compatibilidad entre los componentes que forman parte de una mezcla miscible, se puede propiciar a través de distintas maneras que abarcan desde la introducción de interacciones específicas no enlazantes, polímeros reactivos, hasta la incorporación de copolímeros en bloque, al azar o de injerto en la cadena polimérica. De los métodos previamente mencionados, el más utilizado en la industria del plástico es el de la adición de los copolímeros que tienen la habilidad de interactuar fuertemente con los componentes originales de la mezcla para mejorar considerablemente la adhesión entre las fases poliméricas, ya que cada monómero o segmento del copolímero es capaz de adherirse mejor a cada uno de los polímeros que componen la mezcla. Este tipo de mezcla es llamada *compatible*, y se caracteriza por la presencia de una fase finamente dispersa, buena adhesión y resistencia, además de proporcionar las propiedades mecánicas y físicas deseadas.

Dentro de las mezclas de polímeros, existen dos tipos que representan las más usadas: las miscibles e inmiscibles [O. Olabisi (1982) y Utraki (1989)]. Las mezclas miscibles involucran la solubilidad termodinámica y están caracterizadas, particularmente, por la presencia de una fase y una única temperatura de transición vítrea; además sus propiedades, frecuentemente, pueden ser predichas a partir del promedio de la composición en peso de las propiedades de los componentes individuales. En el caso de las mezclas inmiscibles, éstas forman fases separadas exhibiendo las temperaturas de transición vítrea y/o temperatura de fusión de cada componente de la mezcla]; mientras que todas sus propiedades, dependen de las propiedades individuales de cada componente que la conforman, pero también de manera significativa, de la morfología y de las propiedades interfaciales entre las fases de la mezcla.

Para lograr la miscibilidad en una mezcla polimérica, se debe asegurar un valor negativo de la energía libre de mezclado, la cual es igual al calor de mezclado exotérmico debido a que las contribuciones entrópicas son despreciables, que puede generarse por la introducción de interacciones específicas entre los componentes de la mezcla, teniendo un rango potencial que va desde los fuertes enlaces covalentes o iónicos hasta las interacciones débiles no enlazantes, tales como: puentes de hidrógeno, ión-dipolo, dipolo-dipolo y las interacciones dador-aceptor.

Entre las técnicas desarrolladas para mejorar la inmiscibilidad de las mezclas, se encuentra la *compatibilización*.

Haciendo una clasificación dentro de los agentes compatibilizantes, se pueden mencionar:

- *Adición de copolímeros en bloque o de injerto*: la mayoría de los agentes compatibilizantes usados son los copolímeros en los cuales cada monómero diferente o segmento se adhiere mejor a uno u otro componente de la mezcla.

El efecto de un copolímero en la morfología de las polimezclas, la adhesión interfacial entre las fases y las propiedades de la mezcla, dependen de parámetros como lo son el tipo y el peso molecular de los segmentos del copolímero, composiciones de la mezcla, condiciones de mezclado, entre otros. Las diferentes aplicaciones de los copolímeros los clasifican de acuerdo a una estructura al azar, en bloque o copolímero de injerto.

Los copolímeros en bloque o de injerto adecuados, pueden ser utilizados como agentes compatibilizantes efectivos en mezclas poliméricas; queriendo decir con adecuado, a aquel que contenga un segmento miscible con uno de los componentes de la mezcla y otro segmento miscible con el otro componente.

La estructura de los copolímeros de injerto, en comparación con la de los copolímeros en bloque, es generalmente más compleja, ya que la columna polimérica puede ser enlazada en mayor número que en una ramificación injertada y la naturaleza de la producción de tales copolímeros es tal que podrían ocurrir entrecruzamientos de cadenas.

En general, los copolímeros en bloque o de injerto tienen efectos similares como lo son el acumularse en la interfase y el estabilizar las dispersiones de un homopolímero en otro.

- *Aplicación de interacciones específicas no enlazantes:* comúnmente, estas interacciones específicas son débiles, y se requiere de grandes concentraciones; es decir, que la adición de un polímero capaz de realizar estas interacciones específicas, no puede ser en pequeñas cantidades en las mezclas inmiscibles para lograr la compatibilización; en cambio, la adición de grandes cantidades podría cambiar las propiedades de los constituyentes en la fase deseada y/o podría no ser económico.
- *Compatibilización Reactiva:* el mezclado de mezclas inmiscibles de polímeros, ofrece atractivas oportunidades para desarrollar nuevos materiales, con combinaciones muy útiles de sus propiedades, debido a que las mezclas simples, frecuentemente poseen unas deficientes propiedades mecánicas y una morfología inestable. La compatibilización de tales mezclas, se lleva a cabo mediante la introducción de copolímeros en bloque o de injerto, que actúen como compatibilizantes en mezclas de polímeros que puedan ser formados “*in situ*” por medio de enlaces covalentes o iónicos durante el mezclado en fundido de polímeros adecuadamente funcionalizados [Xantos (1991), Gaylord (1989), Xantos (1988) y Smith et al (1987)]. En este tipo de compatibilización reactiva, una fase contiene grupos reactivos inherentes en el polímero, los cuales pueden ser incorporados en la segunda etapa agregándole un polímero funcionalizado miscible en éste; mientras la otra no; teniendo en cuenta que en algunos casos, ambas fases pueden ser funcionalizadas. Los copolímeros compatibilizantes formados “*in situ*”, son localizados preferentemente en la interfase, donde son más necesarios, reduciendo el tamaño de la fase dispersa y mejorando la adhesión interfacial entre las fases de la mezcla y las propiedades físicas de la mezcla.

I.5.-Moluscos

Aparecieron en la Tierra hace más de 500 millones de años, y con más de 65.000 especies vivientes y unos 35.000 fósiles, los moluscos son el grupo más numeroso de animales después de los insectos. Figuran entre los invertebrados más importantes e incluyen formas tan conocidas como las almejas, ostras, calamares, pulpos y caracoles (Figuras N°2 y 3). Habitan en todos los mares del mundo; desde las rocas y arenas litorales hasta las mayores profundidades oceánicas. También se encuentran en aguas dulces, de ríos y lagos.

Su tamaño oscila entre unos pocos milímetros y más de 18 metros de longitud en los calamares gigantes. Comprenden tres grupos principales:

- Los gasterópodos o caracoles.
- Los bivalvos, como los mejillones y chipichipis.
- Los cefalópodos o pulpos y calamares.

Figura N°2. Invertebrados Marinos: Moluscos.

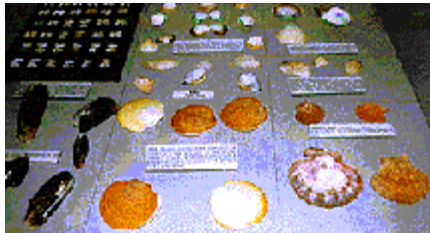


Figura N°3. Invertebrados Marinos: Moluscos.



I.5.1.-Los Bivalvos o pelecípodos

Con unas 20.000 especies distribuidas en 75 familias, este grupo se caracteriza por tener dos valvas o tapas, que se cierran por la contracción de un poderoso

músculo, unidas entre sí por una especie de bisagra (la charnela) con dientes interconectados.

Los bivalvos representan la clase de moluscos de mayor importancia como alimento humano. Entre los más importantes de Venezuela se encuentran: los mejillones, las ostras de mangle u ostiones, el chipichipi, el guacuco, la pata de cabra o pepitona, la vieira y la tripa perla.

La variedad de sus estructuras y formas (Figuras N°4 y 5) permiten su adaptación a hábitats muy distintos y así algunos viven enterrados en el sustrato arenoso o fangoso, el cual pueden excavar con increíble rapidez, como el chipichipi (*Donax rpp*), el guacuco (*Tivella mactroides*) (Figura N°6) o el “pollo” (*Trachicardium isocardia*). Otros, viven adheridos a sustratos duros como rocas, corales, pedazos de madera, conchas, entre otras, fijándose a los mismos mediante filamentos dispuestos como un árbol diminuto con el tronco muy corto, unido a la concha del molusco y las ramas (filamentos) pegados al sustrato. Esta estructura, recibe en conjunto el nombre de “viso”. De este tipo son el mejillón (*Perna perna*), la pata de cabra (*Arca zebra*) también conocida comercialmente como pepitona y la ostra perla (*Pinctada imbricata*). Otras especies se adhieren al sustrato por cementación, de modo que una de las valvas queda pegada en su totalidad al sustrato como la ostra de mangle (*Crasostrea rizophorae*). Por último, otros bivalvos son perforadores como los conocidos con el nombre de “bromas” que perforan raíces de mangle, maderas flotantes y que constituyen una peligrosa plaga para los pilotes de los muelles y otras estructuras de madera.

Figura N°4. Invertebrados Marinos: Bivalvos.

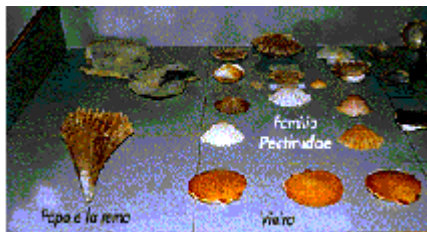


Figura N°5. Invertebrados Marinos: Bivalvos.

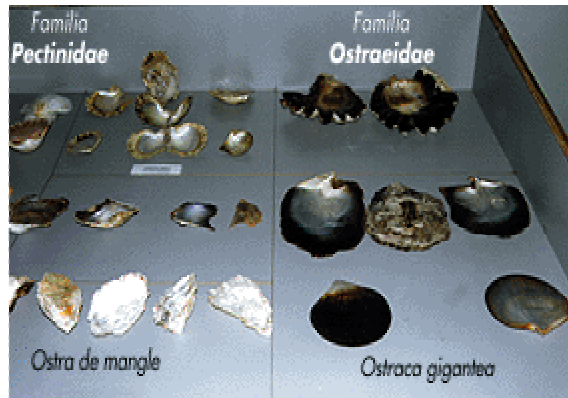


Figura N°6. Bivalvos.



Las conchas de mar, que protegen el cuerpo de los moluscos, están formadas en su mayor parte por carbonato de calcio. Son cargas del tipo natural, y muy abundantes en la naturaleza, que se pueden reciclar y aprovechar para mejorar algunas propiedades del polímero al cual se le van a agregar. Evaluando el contenido de carbonato de calcio en las conchas de mar (*bivalvos*) de las costas del Estado Miranda-Venezuela, según un análisis de difracción de Rayos X, se comprobó que se encontraba cercano al 80%, siendo en su mayor parte calcita, de su estructura química; por lo que teniendo en cuenta los trabajos anteriores en mezclas de poliolefinas con cargas del tipo inorgánicas, específicamente con carbonato de calcio, se presenta como una opción factible económicamente por ser un material de desecho, pero además rentable para la industria del plástico ya que este tipo de relleno muestra modificaciones importantes y relevantes en las propiedades mecánicas de los compuestos.

El carbonato de calcio, cuenta como un 65% del consumo total de cargas en plásticos con un consumo anual alrededor de mundo de unos 6 millones de toneladas. Es utilizado en múltiples aplicaciones, sin embargo el de menor calidad es

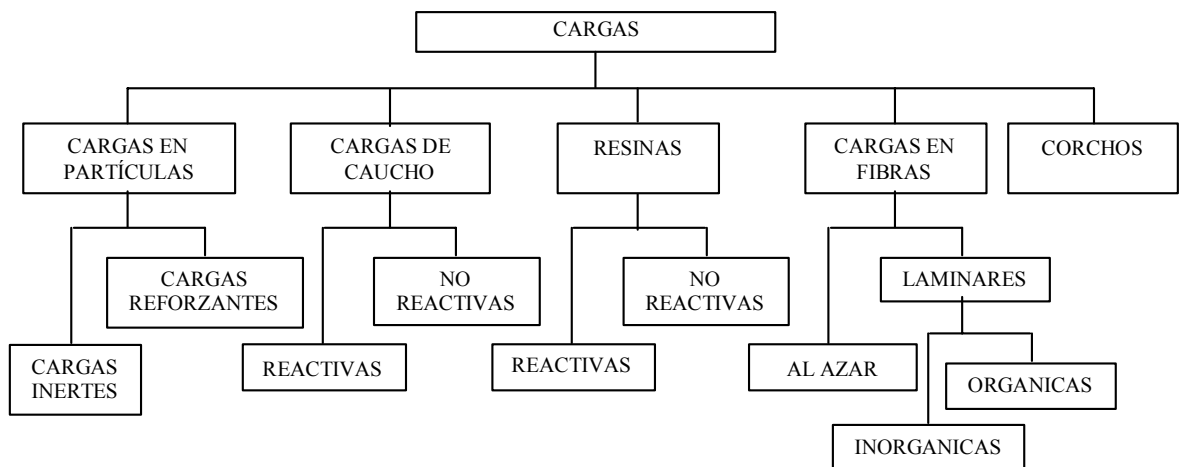
implementado para la disminución de costos, mientras que el de mayor calidad (granos más finos) para mejorar las propiedades tanto en el procesamiento como en el compuesto final. [Pritchard (1998)]

I.6.-Cargas

Son aditivos en forma sólida que difieren con la matriz polimérica tanto en composición, como en estructura. Estos agentes pueden ser clasificados según su origen (mineral, sintético, orgánico o inorgánico), su forma física (esferas, escamas, fibras, filamentos o irregulares), y su función (reforzantes o inertes). El término *reforzante*, viene asociado con aquellos materiales resistentes que debido a sus propiedades y a su fuerte interacción con el polímero, aparte de aumentar la masa polimérica, también incrementan en forma considerable las propiedades mecánicas del compuesto. Entre los principales agentes reforzantes se encuentran: el negro de humo, la fibra de vidrio, el grafito, entre otros.

La denominación de *carga*, es usualmente utilizada para aquellos aditivos que se incorporan al polímero para modificar sus propiedades físicas (por lo general las mecánicas) además de acrecentar el volumen y disminuir los costos de producción; sin embargo en algunas ocasiones éstas disminuyen debido a la existencia de una débil interacción entre la superficie de la carga y el polímero. A este grupo pertenecen las cargas minerales inertes, tales como: carbonato de calcio, caolín, talco, mica, harina de madera, hidróxido de aluminio y el vidrio molido. El aire y otros gases los cuales podrían ser considerados como cargas en polímeros celulares, se manejan como una clasificación diferente. [Brydson, 1999]. Las cargas o rellenos, podrían clasificarse según el diagrama que se muestra a continuación (Figura N°7).

Figura N°7. Clasificación de las cargas y/o rellenos. [Brydson (1999)]



Cada tipo de carga en particular, dispone de un gran número de grados de calidad, que a su vez dependen de factores, tales como la proporción, el tamaño

promedio de partícula, la distribución, la forma y la porosidad de las partículas, así como también de la naturaleza química de la superficie y del contenido de impurezas. Cada uno de estos aspectos, inciden en la efectividad de la carga, para incrementar o disminuir las propiedades mecánicas. El módulo elástico y la resistencia de los materiales macromoleculares son las principales propiedades afectadas, ya que el módulo depende primordialmente de la proporción de la carga, mientras que la resistencia está influenciada por la distribución del tamaño de las partículas en la matriz polimérica. (ver anexo N°1).

En el transcurso de los últimos años, el uso de las resinas termoplásticas ingenieriles junto con un aditivo tipo partícula o reforzante, es aceptado y bien visto en la industria del plástico cuya meta principal es la de optimizar la producción de artículos manufacturados con buenas propiedades mecánicas y físicas. En el uso de cargas de relleno y/o reforzantes, los factores técnicos que deben ser considerados, son:

- El comportamiento reológico del polímero cargado, de lo cual dependerá su procesabilidad; y,
- Las características de adhesión o interacciones interfaciales entre las partículas agregadas y la matriz polimérica, lo cual determinará las propiedades mecánicas finales y la durabilidad del material compuesto.

Entre los factores que afectan las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y físicas de un material polimérico compuesto, se incluyen la estructura de la matriz, el peso molecular, los aditivos plásticos y los agentes reforzantes, así como las condiciones experimentales (las modificaciones en la matriz polimérica, tratamientos con agentes de acoplamiento, y la adición de endurecedores). En cambio, en la búsqueda de una mejor interfase, las características morfológicas del material compuesto, se ven afectadas por el contenido de carga, el tratamiento superficial y la adhesión entre la carga y la matriz polimérica.

Aunque en la actualidad no se han desarrollado con exhaustividad teorías útiles que expliquen el verdadero comportamiento de los polímeros cargados, normalmente se supone que las propiedades mecánicas, térmicas y morfológicas de estos materiales están relacionadas directamente con la concentración y con la relación longitud/ancho de la carga. [Seymour et al (1987)]. Es por ello que las cargas, al ser incorporadas dentro del material polimérico en particular, tienden a comportarse como componentes que:

- Transfieren el esfuerzo mecánico desde la interfase carga-polímero a la carga.
- Mejoran las condiciones de procesabilidad de los polímeros fundidos, debido a que reducen el hinchamiento de los filamentos poliméricos que salen por la boquilla de la extrusora.
- Incrementan la viscosidad de los polímeros fundidos, por el aumento de la concentración en la carga.
- Aumentan ligeramente la rigidez, la temperatura de deformación por calor y la densidad de los polímeros fundidos.

- Disminuyen la resistencia al impacto de las piezas moldeadas, aunque esta variable se puede esperar que mejore bajo las siguientes consideraciones:
 - Haciendo que la dispersión de las partículas de carga en la matriz sea homogénea de forma que disminuyen el número de puntos de concentración de esfuerzos en la interfase carga-matriz.
 - Dispersión de los esfuerzos de impacto o extensión de la distribución de los sitios de concentración de esfuerzos.
 - Prevención en el desarrollo de microgrietas (iniciación de la ruptura).
 - Incremento de la habilidad de microdeformación plástica en la matriz. Lo anterior se puede lograr si la carga finamente dividida es dispersada homogéneamente en el polímero, para lo cual, y siempre que la carga sea inorgánica, una gran cantidad de energía será requerida en la formación de microgrietas. Si el compuesto logra satisfacer esta morfología, su resistencia al impacto puede ser mayor que la del polímero no cargado. [Nakagana et al (1985)].
- Pueden actuar como agentes nucleantes para el polímero, lo cual depende del tipo y concentración de carga utilizada.

La gran ventaja que ofrece el producir materiales termoplásticos combinados con cualquier tipo de carga, radica en la posibilidad de combinar la tenacidad de los termoplásticos con la rigidez de las cargas, obteniéndose así compuestos con alto módulo, gran estabilidad dimensional, mejor resistencia al impacto y mejores características de amortiguamiento que en el caso de los no cargados, además de poseer una gran facilidad para su transformación mediante los procedimientos convencionales: de inyección, extrusión y compresión. Por esta razón, es que en estos últimos años, debido al incremento que ha experimentado el consumo del plástico en el país, y a la necesidad urgente de crear formulaciones con buenas propiedades a un bajo costo, se ha hecho necesario que la elección de una carga en particular, se haga en base a criterios económicos.

Las cargas minerales comúnmente utilizadas en la industria del plástico para disminuir los costos de producción son: el talco, la mica y el carbonato de calcio.

El talco es un silicato magnésico hidratado, con una estructura tipo laminilla que permite mayor rigidez, resistencia a la tracción y a la fluencia que cualquier otra carga en particular. Los compuestos de PP cargados con talco, son muy solicitados debido a que originan un material fácilmente procesable, con una baja concentración en el moldeo y un buen aspecto superficial de las piezas acabadas para su uso en el sector automovilístico, electrodoméstico y en el área de instrumentación.

La mica, a base de moscovita, es una carga laminar resistente a la corrosión que permite una elevada rigidez, gran estabilidad dimensional y buenas propiedades eléctricas a los compuestos. La mica, incorporada en las poliolefinas, ofrece varias ventajas las cuales influyen en el reforzamiento planar de las piezas, además, el

empleo de la misma genera menos desgaste del equipo de transformación, en comparación con una carga más dura, tal como la fibra de vidrio.

El carbonato de calcio (CaCO_3), es una carga mineral que se encuentra presente en la naturaleza como rocas sedimentarias de origen marino en sus tres formas: calcita, caliza y mármol; su tamaño de partícula varía de acuerdo al grado: medio, fino, ultra-fino y precipitado. Sus aplicaciones son numerosas en resinas fenólicas y en compuestos de PVC, tales como: organosoles y plastisoles. Además, el CaCO_3 presenta una serie de ventajas para ser utilizado como carga para plásticos, entre ellas se tienen: su bajo costo, su color blanco lo hace fácilmente coloreable, no es tóxico ni irritante, es estable a altas temperaturas (generalmente, hasta los 800°C) y además, posee un tamaño de partícula con un alto rango de utilidad.

Frecuentemente, al añadirle una carga a la matriz polimérica, se puede apreciar en general cierta dificultad en el procesamiento con el subsiguiente deterioro de las propiedades mecánicas finales de los compuestos. En este sentido, se han sugerido tres métodos que pueden ser utilizados: el primero de ellos, consiste en reducir el tamaño de las partículas de la carga para así aumentar el área superficial por peso (cantidad de carga); el segundo, requiere la introducción de agentes humectantes tales como estearato de zinc, el cual tiende a facilitar la dispersión de la carga en la matriz polimérica; y el tercer y último método, consiste en la incorporación de ciertos agentes activos hidrofóbicos que tengan la facultad de desplazar el aire y la humedad de la superficie de la carga, para que de esta manera puedan actuar mejorando la dispersión de partículas de carga en la matriz así como también, promuevan la adhesión entre las fases existentes en el sistema.

I.7.-Agentes promotores de la adherencia

La incorporación de aditivos promotores de la adherencia a los compuestos poliméricos cargados tiene como función principal, reducir la tensión interfacial entre el polímero y el sustrato, para así aumentar las fuerzas interfaciales entre ambos componentes de forma que se disminuyan las diferencias de polaridad entre la carga y la matriz; con esto se logra aumentar la adherencia, la dispersión y las propiedades del producto final. Estos aditivos están constituidos principalmente por compuestos que contienen fósforo, ácidos, aminos y los agentes de acoplamiento.

Es importante recordar que los enlaces existentes entre la cadena polimérica y la carga son los que determinan las propiedades de resistencia del material acabado. Si no existen enlaces (químicos y físicos) o fuerzas de valencia secundarias entre ambas fases, la respuesta mecánica del material sería similar a la de una matriz en la que existieran huecos de forma idéntica a la que ocupa la carga. Esta respuesta mecánica sería tanto mayor cuanto menor sean los esfuerzos mecánicos solicitantes, ya que para altos esfuerzos, la matriz deformada podría aferrarse a la carga (de mayor rigidez) generando una fricción mecánica del material. Por el contrario, si hay adherencia entre la matriz y la carga, las posibles deformaciones en el material se

transferirían a través de la interfase (carga-matriz) y, aún a pequeños esfuerzos, el sustrato tomaría parte en la distribución del esfuerzo, lo que contribuiría a mejorar las propiedades del producto final, haciendo que el mismo actúe como un agente reforzante y/o carga. [Laguna et al (1987)].

Por lo tanto, para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales poliméricos cargados, las teorías existentes sobre el uso de cargas y/o refuerzos en estos materiales, tienen en cuenta un factor clave que tiene que ver directamente con el aditivo que se adicione en la superficie de la carga, el cual debe ser capaz de promover la verdadera formación de puentes de hidrógeno o fuerzas de Van der Waals, o bien sea a través de uniones covalentes, de manera que fortalezcan la unión interfacial entre la carga y la matriz polimérica; en este sentido, surgen los agentes de acoplamiento, los cuales tienden a formar verdaderos puentes químicos entre las partículas cargadas y la matriz del polímero.

I.7.1.-Agentes de acoplamiento [Ken-React (1995)]

Los *agentes de acoplamiento* (AA) consisten básicamente en compuestos organometálicos reactivos por un lado con la carga y por el otro, con el polímero. Además, suelen incorporarse en los compuestos cargados bien sea como agentes modificadores de superficie o también se pueden introducir como componentes separados de la formulación (mezclas), es decir, estos últimos sólo para ser agregados durante el procesamiento de los polímeros.

La unión de materiales poliméricos con cargas del tipo inorgánicas, es una práctica de gran importancia tecnológica que depende principalmente de los enlaces químicos presentes en la interfase matriz-carga. Para mejorar el enlace de los materiales poliméricos cargados, los agentes de acoplamiento incorporados en la superficie de la carga frecuentemente suelen actuar como componentes que:

1. Disminuyen la viscosidad del fundido, lo cual conduce a mejorar las condiciones de procesamiento de los polímeros cargados, con el consiguiente ahorro energético que esto significa, dependiendo del sistema carga-polímero empleado.
2. Facilitan la dispersión de la fase inorgánica (carga) en la fase orgánica (matriz del polímero), ya que reducen la aglomeración de las partículas inorgánicas en la matriz polimérica.
3. Promueven la adhesión entre las fases existentes ya que crean puentes moleculares afines, tanto al polímero como al sustrato.
4. Reducen la tensión superficial entre el polímero y la carga, debido al incremento de las fuerzas interfaciales entre ambos.
5. Disminuyen la absorción del agua, por lo que se genera una disminución en las reacciones de degradación de los componentes de la mezcla.
6. Disminuyen la capacidad de ignición y la velocidad de combustión de los polímeros.

Los agentes de acoplamiento han sido diseñados para cumplir ciertas funciones específicas en cada uno de los sistemas polímero-carga, a los cuales van a ser añadidos, ya que el objetivo principal se encamina en maximizar la interacción entre las fases existentes en el material. Por lo tanto, para lograr una mayor adaptación y efectividad en los compuestos en particular, los proveedores de agentes de acoplamiento comercializan formulaciones cada vez más versátiles, que en la actualidad están dirigidas no sólo a mejorar el comportamiento de los compuestos en aplicaciones con carga tradicionales, sino también, a ampliar el uso de los plásticos en otros campos. Entre los principales agentes de acoplamiento, se encuentran: titanatos, silanos, zirconatos, aluminatos y los hidrocarburos aromáticos clorados.

I.7.1.1.-Titanatos

Los agentes de acoplamiento tipo titanato, son básicamente compuestos tetrafuncionales derivados del Titanio (Ti), únicos en reaccionar con los protones libres de la interfase inorgánica, lo cual resulta en la formación de capas monomoleculares orgánicas sobre la superficie del sustrato. La ausencia de estas capas en la interfase polímero-carga junto con la estructura química de estos agentes, crea nuevas modificaciones energéticas en la superficie de la carga, conduciendo a que las interacciones químicas entre el polímero y la carga, resulten en una reducción de la viscosidad en las mezclas no cargadas, así como también en el polímero cargado.

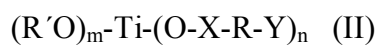
Típicamente suelen ser: hidrofóbicos, organofílicos y organofuncionales. Los efectos que generan en los sistemas de polímeros al ser añadidos, son los siguientes:

1. Mejoran la dispersión y las propiedades reológicas.
2. Aumentan la energía de impacto y disminuyen la fragilidad del material.
3. Optimizan, en general, las propiedades mecánicas.
4. Permiten la separación de fase e inhiben la corrosión.
5. Son reactivos junto a diversos sustratos como: CaCO_3 , sulfato de bario (BaSO_4), negro de humo, nitratos, óxidos, entre otros.

A los titanatos orgánicos se les puede atribuir el siguiente comportamiento químico: promotores de adhesión, antioxidantes, agentes antiespumantes, aceleradores, catalizadores, emulsificantes, retardadores de flama, colectores de radicales libres, modificadores de impacto, retardadores, entre otros.

La reactividad de estos agentes es posible en sustratos como: CaCO_3 , BaSO_4 , negro de humo, azodicarboamidas, nitratos, hidratos, celulósicos y pigmentos de lacas y pinturas, peróxidos orgánicos y polímeros, así como minerales clásicos y derivados inorgánicos como óxidos metálicos.

La estructura química de los titanatos se puede representar de la forma siguiente:



donde:

$(R'O)_m$: es el grupo monohidrolizable que reacciona con la carga, siendo este grupo el que ataca la porción hidrolizable de la superficie inorgánica. Su función es promover la adhesión de las fases.

Ti(O-): es el encargado de promover las reacciones de transesterificación y transalquilación catalítica, incrementando la eficiencia espumante de la azodicarbonamida.

X: grupo funcional aglomerante (cohesivo) que puede ser un fosfato, carboxil, sulfonil, entre otros; el cual actúa como antioxidante, anticorrosivo y retardador de la llama.

R: grupo funcional termoplástico que puede ser alifático o aromático, el cual se enlaza al polímero por la acción de las fuerzas de Van der Waals, mejora el procesamiento, tiene efecto plastificante, y es el compatible con el polímero.

Y: grupo funcional que actúa de enlace con el polímero, puede ser un grupo amino, acrílico, mercapto, hidroxilo o un hidrógeno terminal.

m: factor que proporciona uno, dos o tres grupos orgánicos colgantes, los cuales pueden ser controlados funcionalmente desde un primer a un tercer grado.

La estructura molecular de estos agentes presentan dos factores de los cuales dependen los diferentes tipos de titanatos, estos son:

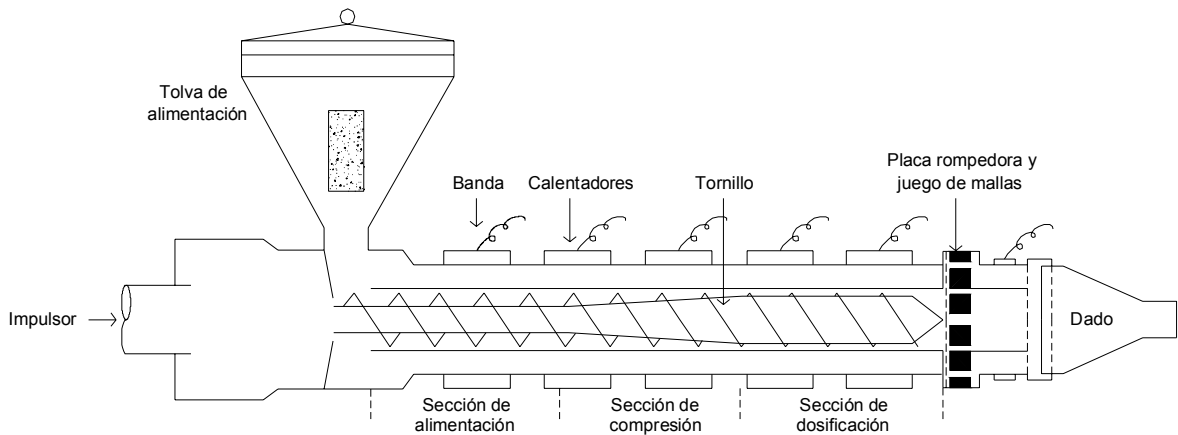
- La cantidad de grupos hidrolizables (m).
- La organofuncionalidad de la cadena del titanato, la cual viene representada por n.

I.8.-Procesamiento de los plásticos

I.8.1.-Extrusión de Mezclas [Morton-Jones (1994)]

Una de las formas de obtener una mezcla de polímeros, es mediante el proceso de extrusión, en el que el polímero es impulsado de modo continuo por medio de la acción rotativa de uno o dos tornillos que permiten el paso del material por zonas de presión y temperaturas elevadas en las que se funde y compacta. El equipo está constituido principalmente por un tornillo de Arquímedes que se ajusta con precisión dentro del cilindro con el espacio suficiente para rotar. El polímero sólido se alimenta en un extremo, a través de la tolva, y en el otro sale el material sometido a extrusión, con un perfil definido por el cabezal. Dentro de la máquina el polímero se funde y homogeniza.

Figura N°8. Características principales de un extrusor de tornillo sinfín simple.



El equipo de extrusión (Figura N°8) está compuesto por varias secciones, cada una con un propósito diferente:

- *Zona de alimentación:* en la primera parte, se precalienta y transporta el polímero a las partes siguientes. La profundidad del tornillo es constante y la longitud de esta zona es tal que hay una alimentación correcta hacia delante, ni deficiente ni excesiva. Esta alimentación varía un poco para obtener una eficiencia óptima con los diferentes polímeros.
- *Zona de compresión:* la segunda zona tiene una profundidad de canal decreciente: primeramente, se expulsa el aire atrapado entre los gránulos originales; en segundo lugar, se mejora la transferencia de calor desde las paredes del barril calentado conforme el material se vuelve menos espeso, y en tercer lugar, se da el cambio de densidad que ocurre durante la fusión.
- *Zona de dosificación:* su función es la de homogenizar el material fundido y con ello suministrar a la región del cabezal, un material de calidad homogénea a temperatura y presión constante.
- *Zona del cabezal:* esta consta, por lo común, de una placa de acero perforada conocida como la *placa rompedora* y un juego de mallas de dos o tres capas de gasa de alambre situadas en el lado del tornillo.

El ensamble placa rompedora-juego de mallas, tiene tres funciones:

1. Evitar el paso de material extraño, por ejemplo, polímero no fundido, polvos, cuerpos extraños.
2. Crear un frente de presión cuando se opone una resistencia al bombeo de la zona anterior.
3. Eliminar la “*memoria de giro*” del material fundido.

I.8.2.- Moldeo por Inyección [Morton-Jones (1994)]

El fundamento del moldeo por inyección es inyectar un polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde solidifica para dar el producto moldeado que se extrae al abrir la compuerta donde se ubica el molde.

Una máquina de moldeo por inyección (Figura N°9) tiene dos secciones principales:

- La unidad de inyección.
- La unidad de cierre, o prensa, que aloja el molde.

La unidad de inyección

El procedimiento es virtualmente el mismo que el procedimiento de extrusión: el comportamiento del polímero es el mismo; los diseños de los tornillos, el calentamiento de la camisa o barril, son muy parecidos. La única diferencia importante es que el tornillo tiene un movimiento de vaivén, como si fuera un pistón, dentro del barril, durante la parte de inyección del ciclo de producción.

Durante la fase de plastificación, el extremo de salida está sellado por un válvula, y el tornillo acumula una reserva, o “*carga*” de material fundido frente a él, al moverse hacia atrás en contra del frente de presión. Cuando se completa esta etapa, se abre la válvula de sellado, el tornillo detiene su giro y se le aplica presión que lo convierte en un empujador mecánico o pistón que impulsa el material fundido acumulado, a través de la boquilla conectora hacia el molde, que se encuentra en la unidad de cierre.

La unidad de cierre

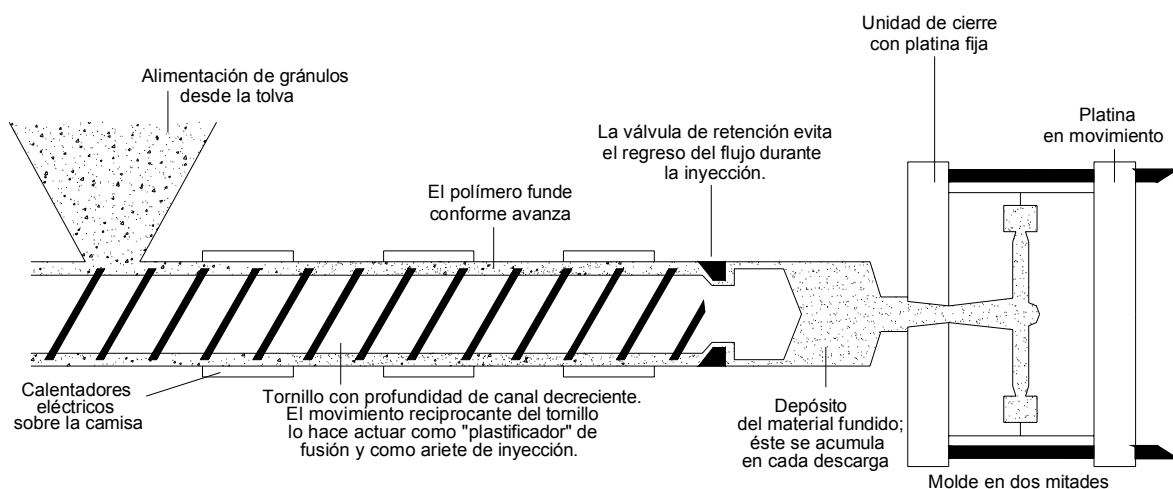
Es básicamente una prensa que se cierra con un sistema de presión hidráulico o mecánico. La fuerza de cierre disponible debe ser lo suficientemente grande para contrarrestar la resistencia que genera el material fundido cuando se inyecta. La presión que se aplica a este material fundido puede ser alrededor de 145 MPa. Para las piezas moldeadas que tienen una gran área se usan máquinas más grandes, que tienen fuerza de varios miles de toneladas.

El moldeo

El molde se sujeta mecánicamente (por ejemplo, con tornillos) en la unidad de cierre, pero es intercambiable para permitir el moldeo de diferentes productos. Las características fundamentales de un molde son:

1. *La cavidad o impresión*, en la cual se moldea el producto. Un molde puede contener una o varias cavidades simples.
2. *Los canales*, a lo largo de los cuales fluye el material fundido al inyectarse. Estos son el *canal de alimentación*, que es el conducto que sale de la boquilla, y las *entradas*, que van del canal de alimentación a las cavidades individuales.

Figura N°9. Fundamentos del moldeo por inyección.



I.8.2.1.-El ciclo de moldeo

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

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

I.9.-Caracterización de los polímeros

Existen diversos tipos de técnicas que permiten llevar a cabo la caracterización de una mezcla de polímeros, con la finalidad de poder conocer las capacidades y propiedades del producto así como las posibles utilidades del mismo. Entre ellas, se pueden mencionar: análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría diferencial de barrido (DSC), ensayos tensiles, índice de fluidez y reometría capilar, todas ellas necesarias para llevar a cabo la caracterización de la mezcla.

I.9.1.-Propiedades Mecánicas

Los compuestos poliméricos se usan ampliamente como materiales ligeros en aplicaciones estructurales debido a su alta relación resistencia/peso; es por ello, que el caracterizar el comportamiento mecánico, por medio de diversas técnicas adecuadas y precisas, es de suma importancia al realizar cualquier innovación o mejora en alguno de estos compuestos.

Mediante el estudio de las propiedades mecánicas, tales como: la resistencia, la rigidez, la elasticidad, la plasticidad y la capacidad energética; se puede observar y examinar como responden los materiales frente a las distintas fuerzas aplicables. (ver anexo N°2).

Las propiedades mecánicas son dependientes del peso molecular y del grado de ramificación del polímero; aunque también obedecen a variaciones en la velocidad a la que se lleva a cabo la prueba, la temperatura de ensayo, el método de preparación de las probetas, el tamaño y forma de dichas probetas y de las condiciones de las muestras antes de los ensayos. [Brydson, 1999].

El método estándar para medir el módulo y el esfuerzo a la fluencia para los polímeros es un ensayo tensil, en el que la probeta es sujeta por ambos extremos a dos tenazas que se separan a una velocidad constante. Este tipo de ensayo se conoce con el nombre de ensayo de tracción. En este tipo de prueba, algo de no linealidad es de esperarse en la curva esfuerzo-deformación, aún dentro de la región de comportamiento viscoelástico lineal. Además, a medida que la deformación incrementa, la viscoelasticidad no lineal se hace más pronunciada, hasta que eventualmente la probeta alcanza un aciaga máxima. La mayoría de los polímeros dúctiles muestran una caíd de la carga inmediatamente después de alcanzar la carga máxima, debido a una combinación entre el ablandamiento de la probeta y la aparición de un cuello, a causa de que la disipación de la energía mecánica como calor puede aumentar la temperatura en el cuello, provocando un ablandamiento significativo.[Mc. Crum, 1997].

Existen mezclas donde los componentes poliméricos se separan en dos fases debido a su inmiscibilidad, tal como es el caso de la mezcla del Polipropileno y Polietileno, usada comercialmente debido a su alta resistencia al impacto y dureza a bajas temperaturas [Rosen (1967), Flory et al (1968), Manson et al (1976), Paul et al (1978), Weming (1978)].

Algunas de las propiedades más importantes de los polímeros y sus mezclas, son: la resistencia a la tracción, la elongación a la ruptura, el módulo elástico y la resistencia al impacto; y según *Nakagawa (1985)*, el objetivo principal en el desarrollo de termoplásticos modificados, tales como las mezclas de las poliolefinas

es lograr siempre materiales procesables más rígidos combinado con una resistencia al impacto adecuada.

I.9.2.-Propiedades Térmicas

El análisis del comportamiento térmico al momento de realizar el estudio de mezclas de polímeros con carga tratada, representa uno de los fragmentos esenciales, debido a que se debe conocer el efecto que causa el tratamiento de la carga sobre la temperatura de fusión, la temperatura de cristalización, la cristalización del producto final y el efecto de la carga sin tratar; ya que estas propiedades son afectadas de manera apreciable durante la mezcla y el procesamiento de los polímeros. Además, es fundamental el conocer estas propiedades si se quiere minimizar la existencia de focos de tensiones internas en las piezas debido a diferencias sustanciales de respuesta térmica entre la carga y el entorno de la matriz que la envuelve. [Marco y Collar (1998)].

Los procesos de transformación de los plásticos están influenciados por la velocidad de cristalización de los polímeros semicristalinos y la nucleación, de la que se sabe depende la cristalización de la muestra ensayada. La cristalización, desde el punto de vista práctico, es más fácil de controlar con la incorporación de aditivos, como los agentes nucleantes, a través de tratamientos térmicos o cambios en el régimen de fabricación, temperatura y patrones de flujo de los polímeros.

La determinación de las propiedades térmicas de un material se efectúa mediante técnicas de análisis térmico, tales como las que se mencionan a continuación.

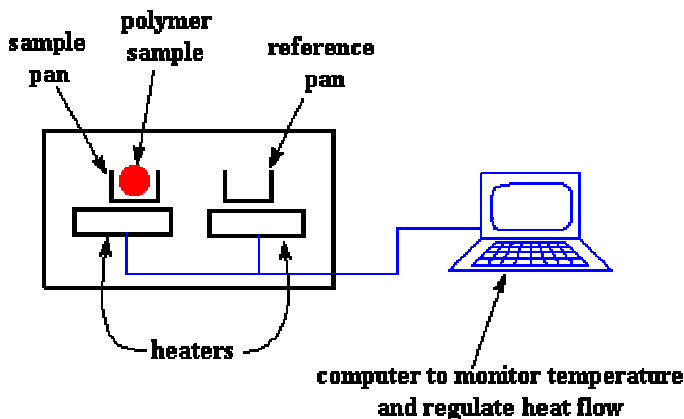
I.9.2.1.-Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica que se emplea para estudiar qué ocurre cuando un polímero es calentado. Se utiliza para analizar lo que se conoce con el nombre de *transiciones térmicas* de un polímero, que son los cambios que tienen lugar en un polímero cuando se calienta. La fusión de un polímero cristalino es un ejemplo.

Por medio de este análisis, se cuantifica la diferencia de energía requerida para mantener la muestra polimérica y la de referencia (cápsula vacía), a la misma temperatura, cuando ambas están sometidas a un programa de temperatura controlada; sabiendo que el ensayo consiste en el calentamiento o enfriamiento del material a una velocidad y a una atmósfera controlada, monitoreando continuamente con un dispositivo las diferencias de calor, debido a los cambios de energía interna que sufre el material ensayado. Las transiciones son marcadas por absorción o liberación, resultando en un pico endotérmico o exotérmico, o también en cambios en la capacidad calorífica del material, según sea el caso.

El ensayo se lleva a cabo en un sistema como el que se muestra (Figura N°10), a continuación:

Figura N°10. Diagrama de un DSC.



El nomenclatura de DSC, se aplica a dos técnicas diferentes de análisis, de las que una de ellas está íntimamente relacionada con la calorimetría tradicional: en donde el equipo consta de un circuito de temperaturas medias que mide y controla las temperaturas de los recipientes de la muestra y de referencia, para ajustarse a un programa determinado de tiempo-temperatura, representándose posteriormente sobre uno de los ejes de un registrador *x-y*; además, de un circuito de diferencias de temperaturas que realiza una comparación entre las temperaturas de los recipientes de la muestra y de la referencia, suministrando energía para calentar la resistencia situada en cada recipiente hasta que las temperaturas permanezcan iguales. Al momento en el que la muestra experimente la transición térmica, la potencia de las dos resistencias se ajusta para mantener las temperaturas, registrándose una señal proporcional a la diferencia de potencia, en el segundo eje del registrador. El área situada bajo la curva resultante, es un medida directa del calor de transición.

En general, el termograma que se obtiene a través del ensayo térmico DSC es el reflejo de la historia térmica de la muestra.

I.9.2.2.-Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis térmico diferencial y otros métodos termoanalíticos, permiten no solo estudiar la cinética de una reacción química, sino también determinar los parámetros cinéticos involucrados, tales como el orden de la reacción, la energía de activación y el factor de frecuencia. Además, miden constantemente los cambios de alguna de las propiedades físicas del material.

La termogravimetría es un proceso de descomposición de una sustancia en presencia de calor, provocando el rompimiento de los enlaces en las moléculas

presentes. En un análisis termogravimétrico, la fracción en peso de las moléculas es registrada en función de la temperatura o el tiempo, a una velocidad de calentamiento, generalmente controlada. [Carroll y Manche (1972), Encyclopedia of Polymer Science and Technology (1971)].

El estudio de la termodegradación de un material es importante, ya que al obtener los datos de los parámetros cinéticos de las curvas termogravimétricas, se puede determinar la estabilidad térmica del mismo; por ejemplo: un compuesto que posee un alto valor de energía de activación, necesitará de mayor cantidad de energía para que se de inicio a la reacción, lo que implica una mayor estabilidad térmica.

Existen tres tipos de estudios termogravimétricos:

1. *Isotérmica o estática*: es aún uno de los métodos más utilizados. Su funcionamiento, se basa en que la masa de la muestra es medida como función del tiempo o de la temperatura.
2. *Cuasiestática*: la muestra es calculada a masa constante, para cada serie de incremento.
3. *No isotérmica o dinámica*: el uso de este método se ha incrementado en los últimos años. Involucra la medida de transformación del peso de la muestra como una función del tiempo o de la temperatura, o incluso ambas, durante el incremento lineal de la temperatura. Además, requiere una menor cantidad de experiencias para el estudio de la cinética de la reacción.

El TGA isotérmico es utilizado debido a su gran simplicidad experimental; sin embargo, cuando se estudia la degradación de materiales complejos, se aprecian reacciones intermedias independientes, las cuales restringen el uso este método, debido a que no es posible controlar las reacciones iniciadas antes de que se alcance la temperatura deseada en cada experiencia.

Las ventajas de determinar los parámetros cinéticos mediante el uso del TGA dinámico, son las siguientes: [Carrasco F (1993), Encyclopedia of Polymer Science and Technology (1971)]:

- La cinética puede ser establecida sobre un amplio rango de temperatura de manera continua.
- Generalmente, se puede decir que, el método estático es el más adecuado o favorable para obtener información sobre procesos lentos, además del orden y mecanismo de la reacción, mientras que el método no isotérmico es el apropiado para cuando se requiere información acerca de los parámetros cinéticos.
- Los experimentos a realizar utilizando el método dinámico son menos, con respecto a aquellos que se deben hacer mediante el uso de TGA isotérmico.
- Es posible obtener suficiente información de la cinética de la reacción con tan solo una muestra. Además, se eliminan los errores de determinación de parámetros cinéticos y térmicos que surgen por el uso de diferentes muestras.

- Cuando existe más de una reacción en paralelo, ésta resulta de difícil observación si se emplea el procedimiento a temperatura constante.

Se debe tomar en cuenta que en un análisis dinámico, se recomienda utilizar velocidades de calentamiento bajas con la finalidad de obtener resultados más precisos y exactos, además de evitar los gradientes de temperatura dentro del sólido y/o las fases. [Romero S. García (1988)].

I.9.3.-Reología

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales al ser sometidos a la acción de una fuerza o un sistema de fuerzas. En muchos casos, su análisis involucra la medida de la viscosidad en los fluidos, la cual depende principalmente de la temperatura y la presión hidrostática. Sin embargo, en el caso de los polímeros, es más compleja debido a que no presentan un comportamiento ideal, ya que por tener un comportamiento de viscosidad en corte poseen propiedades elásticas, fenómenos de esfuerzos normales y viscosidades elongacionales.

La reología permite, en el caso de los polímeros, observar las propiedades elásticas, tensiles y viscosas del fluido; y mediante estas propiedades, hacer una clasificación del material en newtoniano, pseudoplástico o dilatante [Darby (1981)]. Sin embargo, todas estas propiedades van a depender de la velocidad de deformación, el peso molecular y la estructura del material, de la concentración de los distintos aditivos y de la temperatura. [Nielsen (1974)].

La reología es importante para los polímeros ya que el flujo de éstos (en estado fundido) forma parte del procesamiento y fabricación de tales materiales para hacer objetos útiles, conociendo que influye en el comportamiento mecánico del producto terminado. Se utiliza en casos como el cálculo de los requerimientos energéticos de un proceso de transporte, control de algún proceso, control de calidad, desarrollo de nuevos productos e investigaciones científicas.

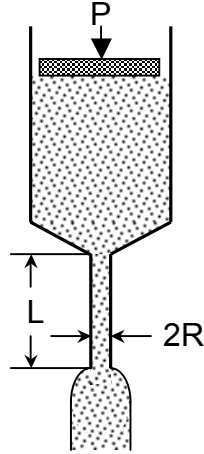
El estudio de la reología de polimezclas es importante debido a que permite estudiar el mecanismo en el cual la adición de un polímero a otro puede influenciar sobre el polímero original y para determinar aquellas combinaciones en las cuales tal efecto ocurre.

I.9.3.1.-Reometría

La reometría es una técnica utilizada para determinar la viscosidad del polímero fundido a altas velocidades de deformación y para ello se utiliza un equipo llamado reómetro. Este equipo puede medir el esfuerzo que desarrolla un material sometido a una deformación controlada, o en cambio, puede medir la historia de deformación cuando se aplica un esfuerzo conocido. Existen varios tipos y

configuraciones de reómetros; pero uno de los más utilizados es el reómetro capilar, cuya representación esquemática se presenta en la Figura N°11.

Figura N°11. Diagrama del Reómetro Capilar.



El reómetro capilar consiste en un pistón, el cual impulsa el polímero fundido a cierta velocidad desde un reservorio cilíndrico, a través de un capilar intercambiable de sección circular, radio (R) y longitud (L) ubicado en el fondo del reservorio. En este equipo se mide la caída de presión (ΔP) generada a diferentes velocidades del pistón (V_p), el cual tiene un área fija (A_p). A partir de los datos proporcionados se obtienen parámetros como la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), viscosidad aparente (η) y el esfuerzo de corte del material (τ_w). Estos parámetros se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot V_p \cdot A_p}{\pi \cdot R^3} \quad (\text{III})$$

$$\tau_w = \frac{R \cdot \Delta P}{2 \cdot L} \quad (\text{IV})$$

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}} \quad (\text{V})$$

El comportamiento reológico de las mezclas puede ser evaluado a partir de la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida por dicha fuerza, esta relación define lo que se llama la curva reológica del material. Esta curva es única del material y se puede expresar en términos empíricos o en una ecuación reológica. La representación de dicha curva se hace al graficar en forma logarítmica el esfuerzo de corte con relación a la velocidad de deformación; si dicha curva es una línea recta, se

comprueba que el material sigue la llamada Ley de la Potencia y se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\tau_w = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{VI})$$

donde el coeficiente (K) se conoce como constante de proporcionalidad o índice de consistencia y el término (n) es el índice de fluidez o exponente de la Ley de la Potencia. Este índice de fluidez permite clasificar el polímero fundido en diferentes tipos:

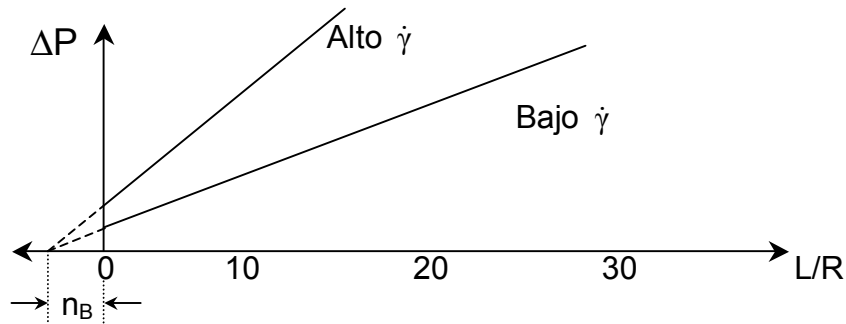
- ✓ Si $n=1$: el fluido es Newtoniano (sigue un comportamiento ideal).
- ✓ Si $n<1$: el fluido es pseudoplástico (la viscosidad es inversamente proporcional a la velocidad de deformación).
- ✓ Si $n>1$: el fluido es dilatante (la viscosidad es directamente proporcional a la velocidad de deformación).

Sin embargo, el reómetro capilar proporciona cierto error al cálculo de las propiedades antes descritas. Estas discrepancias se deben a las imperfecciones en el equipo, como por ejemplo el hecho de que a lo largo del capilar la velocidad de deformación no es constante, además de que el esfuerzo de corte es afectado por el cambio de área del reservorio al capilar lo cual produce que el largo efectivo del capilar sea diferente al largo real. Para sobrellevar estos errores, se emplean dos correcciones al modelo de las propiedades. Estas correcciones son las de Bagley y la de Rabinowitsch. La corrección de Bagley viene dada por la siguiente ecuación:

$$\tau_{w\text{-corregido}} = \frac{R \cdot \Delta P}{2 \cdot (L + n_B \cdot R)} \quad (\text{VII})$$

donde (n_B) es un factor de corrección, el cual se determina tomando mediciones de ΔP a un valor de $\dot{\gamma}$ constante para diferentes valores de L/R (relación largo/radio del capilar) de distintos capilares. La curva obtenida se aproxima a una recta y se extrapola al valor de $\Delta P=0$. n_B es el valor del punto de intersección de la recta obtenida con el eje de las abscisas (Figura N° 12).

Figura N°12. Coeficiente de corrección de Bagley.



La corrección de Rabinowitsch corrige la variación de la velocidad de deformación en la pared del capilar y viene dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma}_w = \dot{\gamma} \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right) \quad (\text{VIII})$$

donde (n) es el índice de fluidez, si el fluido cumple con la Ley de la Potencia.

I.9.3.2.-Índice de Flujo [Rosales (1994)]

El índice de flujo, IF, también es un indicativo del peso molecular (siempre que no haya variación en la distribución de éste), y por consiguiente, una medida de la viscosidad del material (el peso molecular promedio y el IF son inversamente proporcionales) y del comportamiento del mismo en estado fundido. El IF da una idea aproximada de las características de flujo del material para ciertas condiciones de procesos, por lo que es la técnica más usada en la industria debido a su simplicidad y bajo costo.

Para la determinación del índice de flujo se utiliza un capilar de longitud 8 mm y diámetro 2,096 mm; según la Norma ASTM D 1238 y para un determinado peso y temperatura, se calcula la cantidad de material que pasa a través del capilar en 10 minutos.

Las principales objeciones que se tiene sobre este ensayo, son:

1. Las velocidades de deformación obtenidas son más bajas que las encontradas en los procesos de extrusión e inyección.
2. Los efectos de presión de entrada y salida son altos por la pequeña longitud del capilar.

En el caso de que no se disponen de varios capilares y a efectos de comparación de lotes de material; con este equipo se puede obtener una curva de fluidez aparente. Para ello, se deben utilizar diferentes pesos y para cada peso obtener el caudal de material que pasa a través del capilar.

El esfuerzo de corte en dinas/cm², vendrá dado por la expresión:

$$\tau_w = \frac{9,81 \times 10^5 R_c P}{2\pi R^2 p L} \quad (\text{IX})$$

donde:

Rc: es el radio del capilar [cm.]

Rp: es el radio del pistón [cm.]

L: es la longitud del capilar [cm.]

P: es el peso [Kg.]

La velocidad de deformación aparente es:

$$\Gamma = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (\text{X})$$

donde:

R: es el radio del capilar [cm.]

Q: es el caudal, que viene expresado por:

$$Q = \frac{m}{\rho} \quad (\text{XI})$$

donde:

m: es la cantidad de material que pasa a través del capilar [g/seg.]

ρ : es la densidad del material a temperatura de ensayo [g/cm³.]

I.9.3.3.-Manifestaciones elásticas en polímeros fundidos

La elasticidad de un polímero fundido se debe a la orientación de los segmentos de moléculas en las cadenas poliméricas. Las manifestaciones elásticas en un polímero fundido; tales como hinchamientos en la boquilla, piel de tiburón y fractura en el fundido; se observan a medida que el extrudado sale del capilar. Estas manifestaciones aparecen en el orden expuesto a medida que aumenta la velocidad de deformación. [Rosales (1994)]

I.9.3.4.-Aplicaciones de las evaluaciones reológicas

En todo proceso siempre se requerirá conocer la resistencia del fluido en las condiciones de manejo, para lo cual es necesario medir su viscosidad (si es newtoniano) o determinar los parámetros del modelo reológico que mejor se ajuste al comportamiento de flujo (con frecuencia es suficiente con el modelo de Ley de Potencia o con el modelo de Bingham para describir el comportamiento en una

tubería). Para ello, es necesario realizar una caracterización reológica previa empleando una geometría en el sistema de medición parecida al sistema de manejo real. Por ejemplo, si se quiere evaluar el mezclado y extrusión de sólidos o masa de sólidos húmedos, es conveniente utilizar un reómetro de presión. [Ramos (2001)]

I.10.-Antecedentes de mezclas de Polipropileno (PP) y Polietileno de alta densidad (PEAD)

Existe una gran cantidad de estudios realizados en el campo de los polímeros que han sido orientados hacia el desarrollo de nuevos productos a partir de mezclas físicas de polímeros estructuralmente diferentes, basados principalmente en el análisis del comportamiento mecánico de estas polimezclas; que servirá de soporte técnico, no sólo en la determinación de sus posibles aplicaciones, sino también en la ampliación de los estudios de la morfología resultante a partir de estas propiedades.

Muchas razones explican el uso de mezclas poliméricas como lo son el incremento de la dureza, la resistencia, la tenacidad y la resistencia al impacto [Manson et al (1976), Paul et al (1978), Xanthos (1988), entre otros].

En la búsqueda de trabajos o investigaciones en el área de las mezclas de polímeros, específicamente de PP y PEAD, con una carga del tipo conchas de mar sabiendo que éstas poseen un alto contenido de CaCO_3 , las referencias sólo se enfocaban a estudios anteriores con CaCO_3 puro o sintético; por lo que las referencias y antecedentes que se muestran a continuación presentan las interrogantes y las conclusiones que, al igual que en esta investigación, se plantean al realizar la mezcla de dos polímeros de alto interés industrial cargada con algún tipo de materia orgánica, inorgánica o sintética, con la finalidad de encontrar un material que con características específicas cumpla con los requerimientos del mercado.

Las mezclas de poliolefinas han resultado ser útiles y beneficiosas, además de ser uno de los focos de estudio en los últimos años de muchos investigadores de la materia. Entre los trabajos en esta área, se tienen los realizados por *Slonimskii et al (1964)*, *Noel y Carley (1975)*, *Lovinger et al (1980)*, entre otros; cuyos resultados han logrado el desarrollo de materiales poliméricos que presentan mejores características mecánicas que los homopolímeros base. Entre las principales características que se puede esperar que mejoren al realizar el mezclado físico de los polímeros, se pueden mencionar: la susceptibilidad del PEAD a la fisuración por tensiones en medios activos, la baja tenacidad del PP y la rigidez y la resistencia del PEAD; por ejemplo.

Se conoce que ambos polímeros, PP y PEAD, son semicristalinos y, por separado, tienen muchas similitudes en sus propiedades, aunque la mezcla binaria de los dos frecuentemente exhibe diferencias en los parámetros de solubilidad, polaridad y en la forma cristalina, lo cual previene el mezclado homogéneo de sus fases. Estas diferencias son las que *Deanin y Sansone (1978)* atribuyeron como las principales causas que generan el fenómeno de la incompatibilidad en la mezcla resultante de

este par de polímeros, siendo las propiedades mecánicas como la elongación a la ruptura y la resistencia al impacto, claramente las que soportan estas opiniones. Es por ello, que la mezcla de estos dos polímeros ha sido considerada como un sistema incompatible tanto en el estado fundido como en el sólido, ya que durante su proceso de solidificación han aparecido segregaciones de sus fases [Paul y Newman (1978) y Utraki et al (1989)]. Este comportamiento entre los dos polímeros ha sido establecido y estudiado por técnicas como la calorimetría diferencial de barrido, la difracción de rayos X a pequeño ángulo, la microscopía óptica, la reometría capilar y las mediciones de dilatación térmica [Teh y Rudin (1994)].

Debido a la inmiscibilidad e incompatibilidad que puede observarse al mezclar estos dos polímeros, ellos exhiben mezclas binarias verdaderamente complejas donde un máximo de cuatro fases separadas pueden coexistir: las fases cristalinas y amorfas del PP y las fases cristalina y amorfa del PEAD; aunque la situación se hace más compleja debido al polimorfismo asociado al PP donde cuatro diferentes estructuras cristalinas pueden formarse. También, el tamaño esferulítico, el espesor lamelar, la perfección de los cristales, la zona interlamelar amorfa y la posibilidad de cristalización epitaxial entre otros son factores adicionales que deben ser considerados por tener la capacidad de afectar la morfología y las propiedades finales de la mezcla resultante. [Teh y Rudin (1994)].

A pesar de que la polimezcla formada por los polímeros, PP y PE, muestra un comportamiento incompatible en algunas propiedades, se ha convertido en una de las preferidas por los investigadores por encima de aquellas mezclas miscibles, sabiendo que las que son inmiscibles pueden compatibilizarse por la adición de copolímeros en bloque o aditivos reactivos que lleven a la formación “*in situ*” de la interfaz de las especies activas [Tabtiang y Venables (2002)]; por lo que considerando que es usada comercialmente por su alta resistencia al impacto y dureza a las bajas temperaturas [Flory et al (1968), Manson et al (1976), Paul et al (1978)], es, además, una excelente alternativa y un buen balance de propiedades para mezclas con material reciclado [Albano (1994) y Nava (1997)]. Entre las investigaciones más resaltantes, se pueden mencionar aquellas realizadas por *Slonimsii et al (1964)*, quienes encontraron un incremento monótono en la resistencia máxima a la tracción con el contenido de PP en la polimezcla PP/PEAD; resultados que también fueron apreciados por *Robertson et al (1973)*.

Noel y Carley (1975), manteniendo la misma línea, en sus estudios con esta polimezcla encontraron que se producía un efecto de sinergia en dos de las más importantes propiedades mecánicas: el módulo y en la resistencia tensil, particularmente en el sistema donde el contenido de PEAD se encuentra entre 20 y 25%, respectivamente. Además, obtuvieron un máximo en el módulo de elasticidad y en la resistencia a la ruptura a una composición de 90% de PP, mientras que, en el caso de *Deanin y Sansone (1978)*, los resultados fueron similares a la composición de 75% de PP.

Lovinger et al (1980), también en una experiencia similar con la polimezcla PP/PEAD, notaron que la mezcla se rompía a bajos porcentajes de elongación, provocado por la presencia de dos fases. A través de los análisis morfológicos por microscopía electrónica de barrido y de transmisión, apreciaron dominios esféricos de PE en la matriz del PP, por lo que concluyeron, al finalizar, que el tamaño de las esferulitas del PP disminuía de forma significativa con la incorporación de un 10% o más de PE, que junto con las interacciones producidas por los enlaces intercrystalinos entre las moléculas de PP y PEAD, resultaron en una maximización del módulo en las mezclas con un 80% de PP.

Este comportamiento también se ha podido apreciar con otras propiedades como por ejemplo, la resistencia al impacto en la mezcla PP/PEAD a la proporción (80/20), a pesar de que con esta mezcla se ha demostrado una disminución en la propiedad de elongación. [Díaz (1999)].

Al procesar una mezcla polimérica con carga se obtiene un producto final con propiedades específicas que dependen fuertemente de la morfología y la distribución química de ambas fases [Kovacevic (1996)], además de la estructura cristalina y el grado de dispersión de la carga con la matriz polimérica, entre otras, aunque se cree que las uniones de los segmentos de polímeros a las superficies de las cargas son físicas y químicas en naturaleza y esencialmente permanentes, sin importar el tipo de interacciones polímero-carga [Haidar et al (2001)]. Así como también, la presencia de partículas dispersas de carga en la matriz puede inducir cambios en el valor del módulo, en las temperaturas de fusión y de cristalización, en la degradación y en el porcentaje de cristalinidad del material acabado; como es el caso del CaCO_3 , que utilizado como carga, reduce la elongación a la ruptura y aumenta la viscosidad de fusión de la mezcla [Rodríguez et al (1997)].

Haciendo referencia a la carga: *Mitsuishi (1985)* y *Vollenberg (1990)*, entre otros, han orientado sus estudios en la búsqueda de determinar el efecto que causa la distribución del tamaño de partícula sobre las propiedades mecánicas de los compuestos de PP cargados con CaCO_3 . Sus resultados mostraron que con el menor tamaño de partícula analizado, el módulo elástico incrementaba pero la resistencia al impacto disminuía al aumentar el contenido de carga al polímero, hecho que atribuyeron a la aglomeración y/o a la mala distribución de las partículas de CaCO_3 en la matriz de PP. Por lo que concluyeron, que al aumentar el contenido de carga en la matriz de este polímero se puede fabricar un material muy rígido pero poco tenaz, ya que la adición de carga no produce mejoras de la resistencia al impacto de este compuesto. Resultados similares se obtuvieron al tratar el polietileno de alta densidad con CaCO_3 , en donde a valores menores de tamaño de partícula y a distribuciones de tamaño mayores, se reforzaba la dureza del compuesto final [Liu et al (2002)]. De manera similar, *Taylor (1994)* al estudiar el efecto del tamaño de partícula y el tratamiento de la superficie en el endurecimiento del PP con CaCO_3 , concluyeron que el tratamiento de la superficie de las cargas de carbonato influía en el endurecimiento de los compuestos finales, así como el tratamiento de la superficie

afectaba de manera directa las propiedades de impacto por la modificación de la interfase polímero-carga.

De igual forma, *Kovacevic (1996)* al estudiar las propiedades tensiles del polivinil acetato reforzado con CaCO_3 , determinó que las interacciones dependen de la morfología y de la estructura química de la carga, y de la matriz polimérica, además de observar un incremento en las propiedades tensiles (resistencia a la ruptura) del compuesto formado por polivinil acetato/ CaCO_3 a medida que aumentaba la concentración de la carga. Años después, *Premphet (2001)*, comprobó, al intentar mejorar el comportamiento del polipropileno mediante la adición combinada de CaCO_3 y Metaloceno, que la concentración de carbonato de calcio en el compuesto y el módulo de Young eran directamente proporcionales, en contraposición a lo que se observó al evaluar el contenido de carga con la elongación a la ruptura y a la fluencia. *Thio (2002)*, al estudiar el endurecimiento del i-PP con partículas de CaCO_3 , comprobó que, bajo un lento esfuerzo de tensión, el módulo tensil se incrementaba y el esfuerzo a la fluencia disminuía a medida que se incorporaba la carga al compuesto, independientemente del tamaño de partícula de la carga; observando que el esfuerzo a la ruptura inicialmente aumentaba con la adición de la carga, pero a grandes cantidades se generaba el efecto contrario; mientras que *Chan et al (2002)*, concluyeron en su experimentación con los nanocompuestos de PP/ CaCO_3 mediante las pruebas tensiles, que el módulo de los compuestos se incrementaba aproximadamente en un 85%, contrario a las demás propiedades que no mostraban modificaciones aparentes.

Es por ello que investigadores tales como: *Han (1978)*, *Maiti (1991)*, entre otros; han orientado e intensificado sus estudios hacia la búsqueda de métodos o aditivos que de una u otra forma, fortalezcan el contacto íntimo entre la carga mineral y la matriz del polímero, además de mejorar la dispersión; como es el caso de la acción de los agentes de acoplamiento tipo silanos sobre la superficie de la fibra lo que ha hecho que la carga sea más compatible con resinas del tipo poliéster, ya que *Pheddermann et al (1982)* en sus experiencias con estas cargas reportaron mejoras en el comportamiento mecánico de este compuesto. Este mismo efecto lo observaron con cargas minerales, tales como el trihidrato de alumina (ATH), pero en el caso específico del CaCO_3 , la aplicación de estos agentes de acoplamiento no fue eficaz debido a que existe cierta incompatibilidad de los mismos con la carga. Según esto, se puede decir que la aplicación y efectividad de un determinado agente de acoplamiento para mejorar las propiedades de un sistema polimérico en particular es muy compleja, ya que éste depende de factores como el tipo de carga y/o resina, de la estructura química del agente de acoplamiento, así como también, de las condiciones de procesamiento, entre otras. Mientras que, *Wang (2003)* al realizar un estudio comparativo de las interacciones interfaciales en los compuestos de PP con carbonato de calcio, en base a la caracterización de la superficie y el tratamiento de la carga, encontró que a menor cantidad de agentes de acoplamiento, la energía superficial sufría un descenso drástico, el cual variaba en función del tipo de agentes de acoplamiento.

Sin embargo, existen otros aditivos importantes al momento de mezclar poliolefinas, como son los agentes compatibilizantes que reducen la tensión interfacial y la coalescencia [Sundararaj y Macosko, (1999)].

Kasuta et al (1985) estudiaron el efecto de la velocidad de deformación, el contenido de la carga y el tamaño de partículas de cargas sobre el módulo, la resistencia y la deformación de las mezclas de PP cargado con CaCO_3 . Sus resultados, muestran que el módulo elástico y la resistencia a la fluencia aumentan con el incremento en la velocidad de deformación y el contenido de carga, al igual que con menores tamaños de partícula de carga. Mientras que la elongación a la fluencia, disminuía con el incremento en el contenido de la carga y con menores tamaños de partículas, pero esta propiedad no dependía de la velocidad de deformación.

Por otra parte, *Han et al (1974)* en sus investigaciones, analizaron el efecto de la concentración de carga sobre las propiedades reológicas del PP cargado con CaCO_3 . Sus resultados concluyeron que al PP que se le adicionaban altas concentraciones de CaCO_3 , era un material menos elástico que aquel al que se le incorporaban bajas concentraciones de CaCO_3 , lo cual incrementaba la viscosidad del sistema y por tanto, la rigidez del material, debido a una menor movilidad de las cadenas macromoleculares, ante el sometimiento del material a un determinado esfuerzo. De forma similar, *Upadhyay (2001)*, al estudiar las propiedades reológicas y ópticas del PP cargado con silicatos sintéticos y carbonato de calcio variando la viscosidad para todas las composiciones de carga, determinó que cuando el porcentaje de carga era menor al 20%, la viscosidad cortante a bajas velocidades de deformación, era también inferior para el PP virgen. Sin embargo, *Kim (2002)*, al evaluar los efectos del ácido esteárico y la forma de la partícula en las propiedades reológicas de los compuestos de PP cargados con talco, CaCO_3 y talco/ CaCO_3 , comprobó que la viscosidad del PP cargado con talco era mayor que la del PP cargado con carbonato a menores esfuerzos, pero mucho menor a niveles mayores. Esto era atribuido a la forma de la partícula. La presencia de un valor de fluencia fue atribuido a las interacciones entre las mismas.

II.-METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la obtención de un material polimérico con excelentes especificaciones, se requiere conocer las propiedades más relevantes del material entre las que se encuentran las mecánicas, las térmicas y las reológicas, así como su morfología.

El estudio de las propiedades mecánicas del material acabado ofrece información suficiente acerca del comportamiento que tendrá el material ante un determinado esfuerzo y/o tensión, lo que permitirá en un futuro lograr la sustitución o reutilización de un material por otro en escala industrial, con la finalidad de disminuir los costos de producción y la ampliación del campo de aplicaciones de los polímeros convencionales.

Con respecto a las propiedades térmicas del material acabado, se puede decir que son indispensables, ya que a través de ellas se establece el efecto de la carga y el tratamiento superficial de la misma sobre los parámetros térmicos (temperatura de fusión, temperatura de cristalización y la cristalinidad) de la polimezcla en estudio.

La caracterización reológica permite conocer el efecto de la temperatura y la presión ejercida sobre el polímero fundido al hacerlo pasar por el interior de un capilar, obteniendo así el índice de fluidez y el tipo de flujo. Estas características de flujo del material fundido son importantes ya que intervienen en las etapas de procesamiento de los plásticos en general.

II.1.-Materiales

Entre los materiales que se utilizaron durante el desarrollo de esta investigación, se encuentran:

II.1.1.-Polímeros

- a. Polipropileno 11H01A Propilco.
- b. Polietileno 2908.

Las principales características de los polímeros utilizados se presentan en la Tabla N°1.

Tabla N°1. Características de los polímeros a utilizar (según el fabricante).

Características	PP	PEAD
Distribuido por	Propilco.	Resilin.
Índice de Fluidez (2,16 kg))	17 g/10min (230°C)	7,3 g/ 10min (190°C)

Las demás especificaciones, según el fabricante, se encuentran en el Anexo N°4.

II.1.2.-Carga

Conchas de mar, de las costas de Barlovento, Estado Miranda, Venezuela.

Estas conchas, según sus características, son un bivalvo que se conoce comúnmente como “guacuco”; es heterodonto, es decir, tiene dos tipos de dientes en la bisagra (cardinales y laterales poco desarrollados) y pertenece a la Familia Tellinidae (es una Tellina sp). [consulta al Prof. Victor Padrón, Escuela de Geología y Minas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela].

II.1.3.-Agentes de Acoplamiento

El agente de acoplamiento que se utilizó para llevar a cabo esta investigación, es del tipo neoalcoxi titanato, conocido con el nombre comercial LICA 12. La descripción y estructura química de este compuesto, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N°2. Descripción y Estructura del Agente de Acoplamiento.
[Ken-React (1995)]

Agente de Acoplamiento	Descripción Química	Estructura Química
LICA 12	Titanato Neopentil (Dialquil)oxi-tri(dioctil) fosfato	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2\text{O}-\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{Ti}(\text{O}-\text{P}(\text{OC}_8\text{H}_{17})_2)_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2\text{O}-\text{CH}_2 \end{array}$

II.1.4.-Compatibilizante

El compatibilizante que se empleó es Polipropileno funcionalizado con anhídrido maleico (Polybond 3150) recomendado para acoplar distintos tipos de relleno con el polipropileno; suministrado por la empresa UNIROYAL CHEMICAL COMPANY, Inc.

Tabla N°3. Propiedades físicas del Polybond 3150. [Uniroyal Chemical Inc.]

Propiedad	Valores típicos	Método
Forma física	Gránulos	
MFI (230°C; 2,16 Kg)	50 g/10 min	ASTM D1238
Densidad (23°C)	0,91 g/cm ³	ASTM D 792
Contenido de Anhídrido maleico	0,5 % en peso	
Punto de fusión	160-170°C	DSC

II.2.-Equipos

A continuación, se muestra la lista de los principales equipos que se utilizaron durante la elaboración de esta investigación. Entre ellos se encuentran:

- Molino de martillo, marca GLEN CRESTON modelo SK1.
- Estufa HERAEUS modelo 01 5050E, rango 0-300°C.
- Extrusora de doble tornillo co-rotante con 6 etapas de calentamiento, marca BERSTORFF/ECS.
- Dosificador volumétrico N°1 con tornillo y sistema de vibración, marca PIOVAN modelo MDT-COLOR, rango 0-99 rpm.
- Dosificador volumétrico N°2 con tornillo y sistema de vibración, marca PIOVAN modelo MDT-COLOR, rango 0-100 rpm.
- Granuladora marca BERLÍN, modelo HV-1, pell 4.
- Máquina de moldeo por inyección REED PRENTICE, modelo N°100 TE.
- Máquina de ensayos universales, marca LLOYD Instruments, modelo EZ-20.
- Máquina de entallado, Testing Machines Inc., modelo TMI 43-15.
- Máquina de ensayos de impacto, ZWICK D7900, tipo 5102.
- Calorímetro Diferencial de Barrido, marca METTLER TOLEDO, modelo DSC821.
- Microscopio electrónico de barrido.
- Plastómetro, marca DAVENPORT, modelo 3/80.
- Reómetro capilar RHEOGRAPH 2000, marca GÖTTFERT, y capilar de relación L/D 30/1.
- Equipo de Granulometría.
- Analizador termogravimétrico, marca METTLER TOLEDO, modelo TGA/SDTA851.
- Mezclador Sigma marca Werner & Pfleiderer tipo WK2,5K2TV.
- Horno HERAEUS Electronic, tipo MR170ES, 0-1000°C.
- Desecador Simple de Metal sin dispositivo de vacío.
- Crisoles de Cuarzo para materia volátil.

II.3.-Cronograma de experiencias

Para cumplir con los objetivos planteados al inicio de este trabajo, el plan de experiencias se llevó a cabo en cinco etapas, las cuales fueron:

II.3.1.-Tratamiento de la materia prima (conchas de mar)

Las conchas de mar que se utilizaron eran provenientes de las costas del Estado Miranda (Barlovento). Debido al contenido de arena y desperdicios adicionales que poseían, se les realizó un lavado con agua, para seguidamente llevar a cabo el descarte de aquellas muestras que no fueran aptas, para ser llevadas, posteriormente, al molino y obtener un tamaño de partícula específico, mediante la técnica de tamizado estableciendo un tamaño de partícula menor a 500 µm.

Seguidamente el polvo obtenido de la molienda fue colocado en la estufa a una temperatura de 90°C por un período de 2 horas para eliminar la mayor cantidad de agua posible.

II.3.2.-Preparación de los compuestos

Para la obtención de las mezclas de PP, PEAD y la mezcla de PP/PEAD a la composición fija (80/20) con carga (conchas de mar) se utilizó una extrusora bajo las condiciones expuestas en la Tabla N°4.

Tabla N°4. Condiciones de operación de la extrusora para la preparación de las mezclas.

Velocidad de los tornillos (rpm)	Perfil de Temperatura en cada zona de calentamiento (°C)						
110	ZONAS						
	1	2	3	4	5	6	7
	180	190	190	200	200	200	210

El procedimiento mediante el cual la carga fue incorporada a la matriz polimérica consistió en el mezclado en fundido. Para ello, se adaptaron dos dosificadores volumétricos a la extrusora BERSTORFF/ECS (Figura N°13): el N°1, ubicado en la primera zona del equipo, para llevar a cabo la alimentación del polímero o de la mezcla polimérica; y el N°2, previamente calibrada (ver Apéndice N°1), instalado en la tercera zona de la extrusora, para incorporar la carga a la matriz polimérica, considerando que sería dosificada a una velocidad que dependería de la proporción de la carga (conchas de mar) en la mezcla y de las características de la mezcla.

En primer lugar se preparó un concentrado de la carga (50 ppc), para lo cual se colocó el polímero correspondiente en la tolva de alimentación de la extrusora y en un puerto donde se garantizaba que el polímero se encontraba fundido. En una segunda fase, se procedió a diluir el concentrado de la carga para así obtener los porcentajes de carga requeridos en cada compuesto, es decir, a través de la tolva se incorporó el concentrado mas la cantidad de polímero necesaria para obtener compuestos a las proporciones: 10, 20 y 30 ppc.

El material polimérico, al igual que el concentrado de carga, serían impulsados por los dos tornillos co-rotantes a una velocidad de 110 rpm, hacia las zonas de mayor presión y temperatura en las que se funde y compacta el material polimérico y la carga generando una corriente continua de plástico fundido que finalmente pasaría a través de la boquilla que posee 2 orificios (Figura N°14). El diagrama general del equipo se muestra en la Figura N°13.

Figura N°13. Diagrama general de la Extrusora.

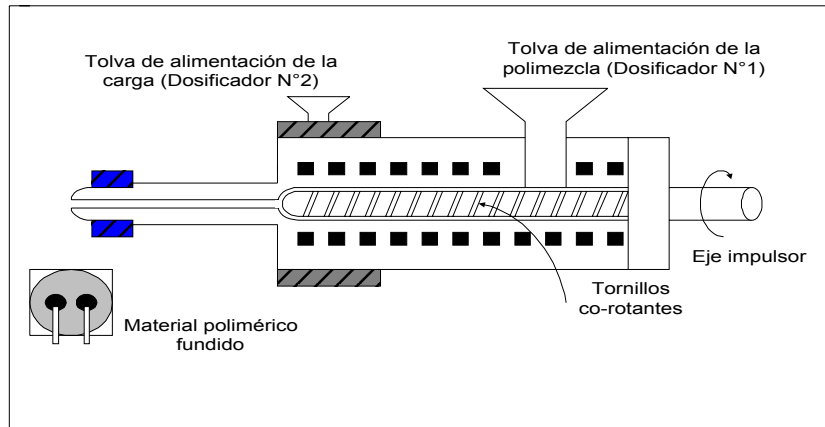
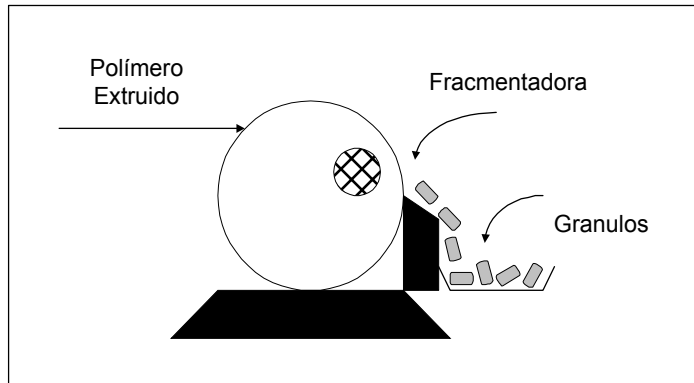


Figura N°14. Extrusora de doble tornillo co-rotante con 6 etapas de calentamiento, marca BERSTORFF/ECS.



A la salida de la extrusora, se encontraba un baño térmico en el que los polímeros fundidos fueron enfriados a temperatura ambiente, para luego ser introducidos en la granuladora, permitiendo fragmentar el material polimérico obtenido en pequeños “*gránulos*”, los que posteriormente serían utilizados en la fabricación de las probetas de ensayo por la técnica de moldeo por inyección y en los demás ensayos.

Figura N°15. Diagrama general de la granuladora.



II.3.3.-Preparación de las probetas

El moldeo por inyección fue la técnica implementada para la obtención de las probetas que posteriormente serían utilizadas para llevar a cabo los ensayos de tracción e impacto, siguiendo los parámetros de operación que se muestran en la Tabla N°5.

Tabla N°5. Condiciones de operación de la máquina de inyección para la preparación de las probetas.

Presión Inyección (psig)	900
Perfil de Temperatura (°C)	
Zona delantera	155
Zona central	175
Zona trasera	190
Velocidad del tornillo (rpm)	100
Tiempo de inyección (s)	1,5
Tiempo del pistón en posición adelantada (s)	6
Tiempo de molde abierto (s)	1
Tiempo de molde cerrado (s)	10

El material polimérico fue cargado por la tolva de la máquina de moldeo por inyección, en donde se calentó y, en estado fundido, fue empujado a alta presión por el pistón o tornillo sin fin, hasta el molde cerrado que se llena por completo, para luego ser enfriado hasta lograr la solidificación del material (Figura N°17-A). Seguidamente, se abrió el molde y se extrajeron las probetas moldeadas (Figura N°17-B). Esta operación se llevó a cabo de manera continua y automática. El diagrama general de la máquina de moldeo por inyección se muestra en la Figura N°16.

Figura N°16. Diagrama General de una Máquina de moldeo por Inyección.

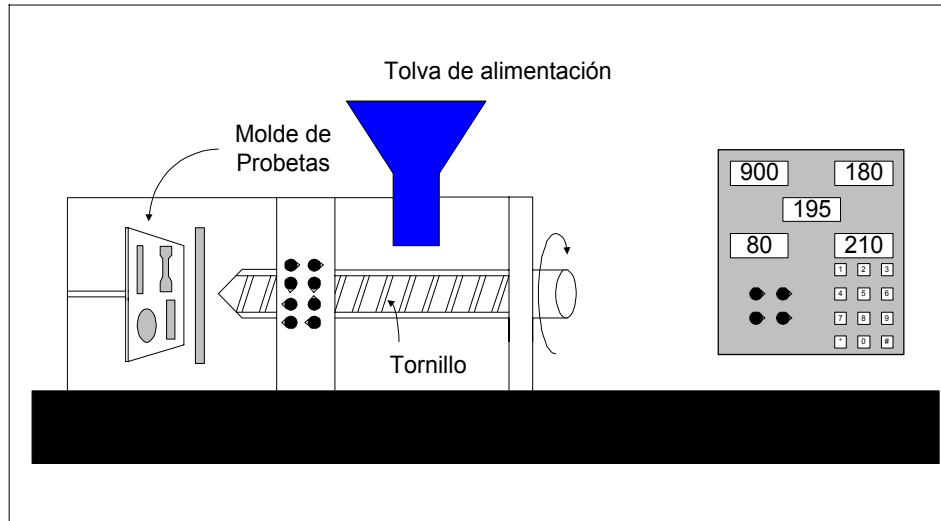


Figura N°17-A. Máquina de moldeo por inyección REED PRENTICE, modelo N°100 TE.



Figura N°17-B. Detalles del Molde.



Los moldes de las probetas para los ensayos de tracción e impacto en esta máquina cumplen con lo especificado en las normas ASTM D638 año 2002 y D256 año 2000, respectivamente.

II.3.4.-Caracterización de los compuestos

Las probetas que se obtuvieron en la etapa anterior, se sometieron a ensayos mecánicos de tracción e impacto según las normas ASTM D638 año 2002 y D256 año 2000, respectivamente, mientras que los gránulos de los compuestos elaborados fueron sometidos a ensayos térmicos (DSC y TGA) y reológicos (MFI según la norma ASTM D1238 año 2001 y reometría capilar según la norma ASTM D3835 año 1996).

II.4.-Preparación de los compuestos con Agentes de Acoplamiento

II.4.1.-Tratamiento de la carga

La superficie de la carga (conchas de mar) fue tratada con el agente de acoplamiento (AA) a las composiciones de 0,3; 0,5; 0,7 y 1% en peso total de la carga a tratar. Para ello, se diluyó el volumen requerido de agente de acoplamiento con igual cantidad de tolueno formando una solución 1:1, para facilitar la incorporación del AA a la carga, debido a que éstos son muy viscosos y se dificulta la dispersión y la homogenización del mismo sobre la superficie de la carga. La solución, una vez diluida, se colocó en un recipiente provisto de un atomizador, para posteriormente rociar lentamente la carga contenida en el mezclador sigma, por 15 minutos, cambiando la dirección de giro de los rotores para asegurar la distribución uniforme del AA en la carga.

Seguidamente, después de adicionar por completo el AA a la carga, la mezcla fue colocada en la estufa a una temperatura de 80°C por un período de al menos 2 horas, con el fin de eliminar por completo el solvente incorporado con el AA, así como la humedad que pudiese estar presente en la carga de forma de mejorar la fluidez de la misma para su posterior dosificación. Al finalizar la etapa de secado, la carga fue incorporada a los polímeros para luego llevar a cabo el mezclado en fundido en la extrusora, con el polímero y la mezcla PP/PEAD, para luego obtener las probetas de los compuestos con carga tratada, tal como se explicó en las secciones II.3.2 y II.3.3, respectivamente.

II.5.-Ensayos Mecánicos

Después de obtener las probetas, es necesario esperar un período de tiempo aproximado de 48 horas para posteriormente, medir en cada una de ellas, en tres puntos, el ancho y el espesor utilizando un vernier, antes de realizar los ensayos mecánicos.

II.5.1.-Ensayos de Tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina de ensayos universales, que consta básicamente de dos mordazas en donde se sujeta la probeta que se desea someter a ensayo, un sistema que aplica la fuerza necesaria a las probetas, diferentes controles de velocidad y un registrador que reporta el gráfico esfuerzo-deformación (Figura N°19), a partir del cual se calcularon las siguientes propiedades mecánicas: resistencia a la fluencia y a la ruptura, elongación a la fluencia y a la ruptura, y el módulo de Young. El diagrama general del equipo de ensayos universales y el tipo de probetas que se utilizaron para llevar a cabo este ensayo, se muestran en las Figuras N°18, 19 y 20.

Figura N°18. Diagrama general de una Máquina de Ensayos Universales y el tipo de probetas.

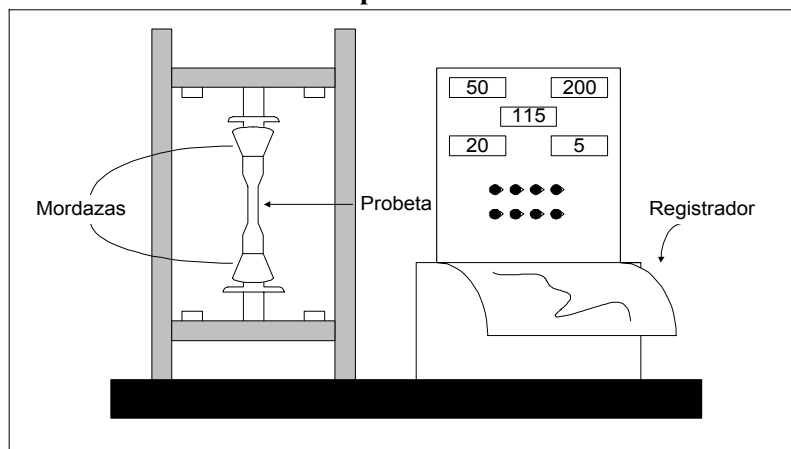
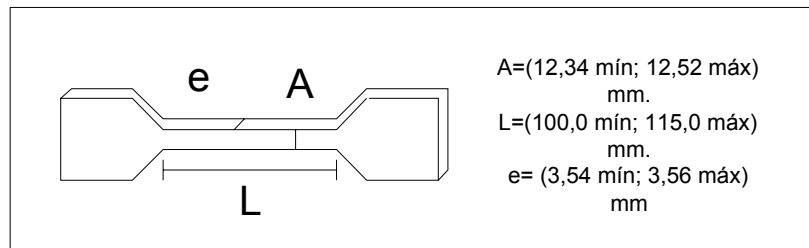


Figura N°19. Máquina de ensayos universales, marca LLOYD Instruments, modelo EZ-20.



Figura N°20. Dimensiones de una probeta para los ensayos de tracción.



Las condiciones de operación bajo las cuales se llevaron a cabo los ensayos se muestran en la Tabla N°6, considerando que el número de probetas que se ensayaron fueron 7 como mínimo para cada mezcla, dependiendo de la dispersión de los resultados.

Tabla N°6. Condiciones de operación de los ensayos de tracción a las probetas.

Velocidad de las mordazas (mm/min)	50
Longitud inicial de la probeta (mm)	115
Temperatura (°C)	Ambiente
Rango de fuerza de la celda (K)	0-2500

II.5.2.-Ensayos de Impacto

Los valores de la resistencia al impacto fueron obtenidos a través de los ensayos de impacto tipo Izod, los cuales se realizaron sobre las probetas de sección rectangular con una entalladura en forma de V (Figura N°21), hecha por la máquina de entalla (Figura N°22). La probeta una vez entallada, fue empotrada al impactómetro (Figura N°23) hasta el límite de la entalla en una posición fija, para luego someterla a un golpe de alta velocidad el cual es proporcionado por un mazo y/o péndulo de 1 Joules, que provocó la fractura de la probeta en las inmediaciones de la entalladura. El número de probetas que se ensayaron fue de cinco como mínimo para cada mezcla.

Figura N°21. Geometría de las probetas para los ensayos de impacto.

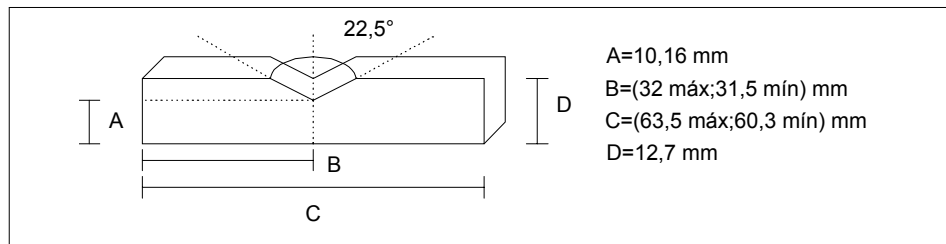


Figura N°22. Máquina de entallado, Testing Machines Inc., modelo TMI 43-15.



Figura N°23. Máquina de ensayos de impacto, ZWICK D7900, tipo 5102.

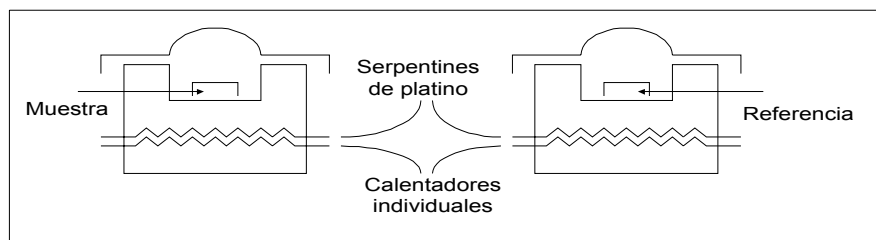


II.6.-Propiedades Térmicas

II.6.1.-DSC

Para determinar los parámetros térmicos de las mezclas, se utilizó como equipo el calorímetro diferencial de barrido (DSC), el cual se basa en la medición de la diferencia de energía requerida para mantener la muestra que se desea y una de referencia a temperaturas idénticas. Este equipo consta de dos secciones, una en donde se coloca la muestra a ensayar dentro de una cápsula, mientras que la otra sección se deja vacía para que sirva de referencia. Cada cápsula es colocada en el microhorno en donde ocurren los cambios de temperatura y las variaciones de flujo de calor que sufren las mezclas, siendo registradas con gran precisión por el equipo. Un esquema simplificado del equipo se muestra en la Figura N°24.

Figura N°24. Esquema General de un DSC.

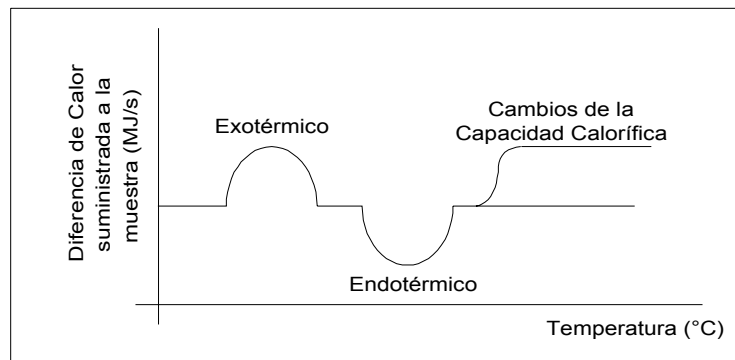


La forma en que fueron realizados estos ensayos, consistió en colocar aproximadamente de 8 a 10 mg. de la muestra extruida dentro de una cápsula especial (crisol) debidamente cerrada con la ayuda de un troquel, para luego ser, junto con la de referencia, colocadas dentro del equipo mostrado anteriormente, con la finalidad de crearle una nueva historia térmica a la muestra. Para ello se calientan rápidamente desde la temperatura ambiente, a una velocidad de calentamiento constante

(20°C/min), hasta 200°C (por encima de la temperatura de fusión, según la matriz polimérica utilizada) durante 10 minutos, manteniéndose constante en esa temperatura por un período de 10 minutos y seguidamente, se enfría hasta una temperatura de 25°C a una velocidad de 10°C/min. De este barrido de temperaturas, se obtiene un primer termograma típico (que es para borrar la historia térmica del material) y obtener el punto de cristalización y un segundo termograma, donde se reportan directamente la temperatura y el calor de fusión de la muestra que se ensaya.

La curva que reportan estos termogramas representa la diferencia de calor en función de la temperatura de la muestra, además, se pueden apreciar los procesos exotérmicos, endotérmicos y cambios en la capacidad calorífica; producidos en la muestra.

Figura N°25. Termograma típico en un DSC.



El proceso exotérmico en las curvas se caracteriza por la aparición de un máximo o pico hacia arriba, mientras que el proceso endotérmico el pico se presenta hacia abajo; en cambio, para poder apreciar las alteraciones en la capacidad calorífica de la muestra, se observa en el termograma el desplazamiento de la línea base de una posición casi horizontal a otra tal como se observa en la Figura N°25.

II.6.2.-Termogravimetría

El analizador termogravimétrico mide continuamente la velocidad de cambio de peso de una muestra en función del incremento lineal de la temperatura a partir de una temperatura pre-seleccionada por el operador. La atmósfera, un aspecto importante para el desarrollo de la curva, es fácilmente variada y controlada.

La muestra es colocada dentro del horno, cuya temperatura es regulada por el usuario. El horno, es un módulo conector que emplea una resistencia, la cual permite que el elemento pueda ser calentado hasta una temperatura máxima de 550°C (según sea el material). Los cambios que ocurren en la muestra son detectados por el transductor apropiado, el cual genera una señal, frecuentemente un voltaje, que es proporcional al cambio. Este voltaje es amplificado y graficado en un registrador

mediante el uso de dos trazadores: uno para registrar la señal de cambio de peso contra temperatura y el otro, corresponde a su derivada. El operador debe variar la temperatura como función conocida del tiempo, mientras, que la velocidad de calentamiento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) puede ser seleccionada. Este tipo de analizador termogravimétrico es el aparato más comúnmente utilizado para realizar estos análisis, debido a la facilidad para interpretar y almacenar datos en el registrador x-y.

Para la obtención de los resultados del TGA, se utiliza el software TGAalyzed, que reporta además de la ecuación o modelo que mejor se ajusta, el valor del orden de la reacción y la energía de activación.

II.7.-Propiedades Reológicas

II.7.1.-Medición del índice de fluidez (IF) mediante un plastómetro.

El IF es la medida de flujo volumétrico de la mezcla fundida a través de un capilar con una longitud y diámetro específicos, y representa la masa en gramos de un material que fluye en un período de 10 minutos a ciertas condiciones de temperatura y presión.

En la determinación se usa un plastómetro (Figuras N°26 y 27), el cual consta de un reservorio, un capilar al fondo del mismo, un pistón (para impulsar el material a través del capilar) y diferentes cargas o pesos (para impulsar el pistón).

Las condiciones de ensayo utilizadas fueron una temperatura de 200°C y un peso de 2,16 Kg; siguiendo el procedimiento descrito por la norma ASTM D1238 año 2001.

Figura N°26. Diagrama general de un Plastómetro.

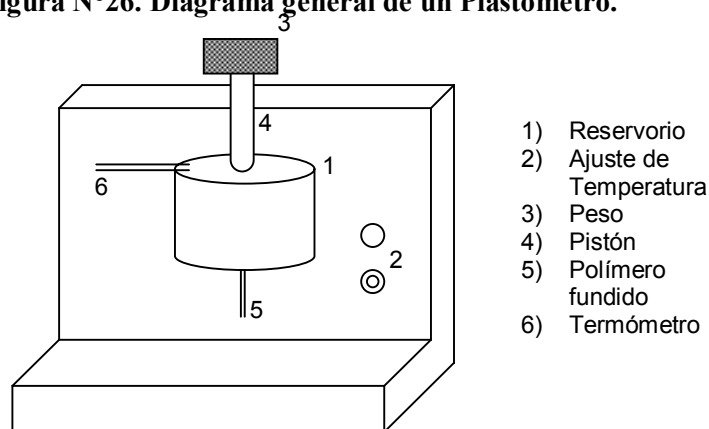


Figura N°27. Plastómetro, marca DAVENPORT, modelo 3/80.



II.7.2.-Reometría capilar.

La caracterización reológica del polímero, la cual incluye la curva de fluidez, el hinchamiento en la boquilla, el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de fundido y sus manifestaciones elásticas, se realizó en un reómetro capilar.

Este equipo consiste de un reservorio, un pistón para impulsar el fundido, un capilar intercambiable e instrumentos para medir y regular la temperatura y la presión ejercida. El rango de velocidades del pistón está entre 0,001 y 40 mm/s, el ángulo de entrada es de 180° y los capilares intercambiables tienen relaciones L/D de 30:1, 20:1, 10:1, 5:1.

La geometría capilar se realizó siguiendo la norma ASTM D3835 año 1996 (Apéndice N°3). Las velocidades del pistón a utilizar dependerán del comportamiento observado de cada mezcla a estudiar; la velocidad mínima depende de las características viscosas del material y la velocidad máxima será donde se aprecie fractura del fundido a la salida del capilar.

Antes de realizar la prueba, el material debe ser compactado y fundido, sin llegar a degradarse por exceso de temperatura, en el reservorio del equipo. Se empleó un solo capilar de relación L/D 30:1 (Figura N°28). El ensayo se realizó bajo un perfil de temperatura constante, como se observa en la Tabla N°7.

Tabla N°7. Perfil de Temperatura de operación del Reómetro Capilar.

Perfil de Temperatura (°C)			
ZONAS			
1	2	3	4
190	195	200	200

Figura N°28. Reómetro capilar RHEOGRAPH 2000, marca GÖTTFERT, y capilar de relación L/D 30/1.



II.8.-Calcinación

Para concluir con la etapa experimental de esta investigación, se realizó la calcinación de las muestras extruidas con carga (*bivalvos*) sin tratar, para comprobar su contenido real en cada una de las formulaciones realizadas, debido a que durante la etapa de preparación de las muestras (extrusión) las condiciones de su alimentación fueron inestables a causa de factores tales como la humedad que absorbe la misma del ambiente, así como también la formación de aglomerados en el dosificador que la alimentaba al equipo de extrusión, lo que hace impreciso asegurar que la cantidad de conchas (*bivalvos*) alimentadas a cada una de las mezclas realizadas corresponda al valor teórico deseado.

El ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Carbón y Residuales de Petróleo de la Universidad Simón Bolívar, siguiendo los patrones de un ensayo de materia volátil. Las muestras utilizadas para determinar el contenido de la carga (*bivalvos*) fueron las de PP de 10, 20 y 30 ppc; teniendo en cuenta que el método de preparación para todas las formulaciones siguió un mismo patrón, los resultados se extrapolaron a todas las demás formulaciones.

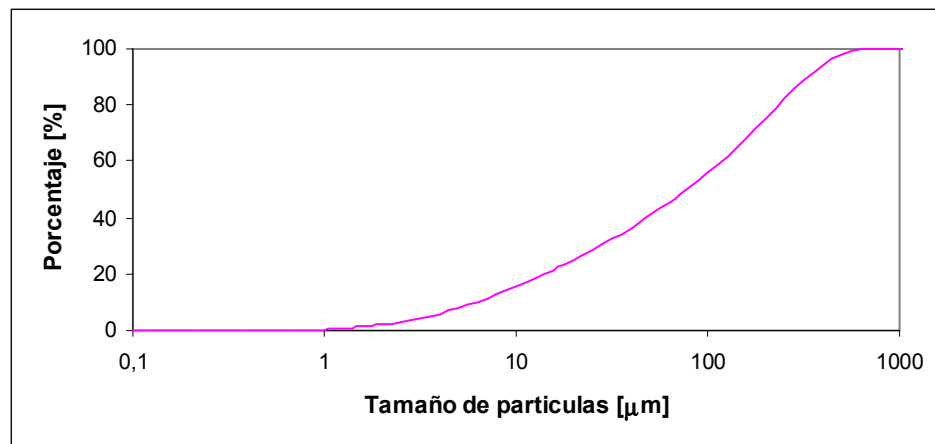
El procedimiento consistió en colocar 3 gr. de muestra en crisoles de cuarzo de materia volátil a 500°C, temperatura en la que se asegura, según los datos reportados por TGA la descomposición del polímero presente, por una hora después de llevarlos a peso constante antes y después de la experiencia. Los restos después de la calcinación eran cenizas grises.

III.-DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Después de realizados los ensayos mecánicos, térmicos y reológicos a las distintas formulaciones que se obtuvieron siguiendo el procedimiento mencionado en la metodología experimental, se presentan a continuación los resultados que permitieron, no solo realizar la escogencia de la composición adecuada de carga (conchas *bivalvos*), sino también analizar la influencia de un agente de acoplamiento del tipo Lica 12 y de un agente compatibilizante (Polybond) en los distintos compuestos.

Para poder utilizar como carga las conchas (*bivalvos*) provenientes de las costas del Estado Miranda, éstas se sometieron a la etapa de preparación descrita en el capítulo anterior para así obtener un fino polvo cuya distribución de tamaño de partícula se muestra en la Figura N°29, donde se puede apreciar que la mayor parte posee un tamaño promedio de aproximadamente 78 μm .

Figura N°29. Distribución del tamaño de partículas (acumulada) de las conchas (*bivalvos*).



Adicionalmente, se le realizó un estudio de Difracción de Rayos X para determinar los componentes que la conforman, obteniéndose que en un 80% era CaCO_3 por lo que en esta discusión los antecedentes que se presentaran hacen referencia a trabajos realizados con Carbonato de Calcio comercial.

Al realizar el análisis de las propiedades físicas de un material polimérico cargado, es importante considerar las condiciones bajo las cuales fue adicionada la carga a la polimezcla, ya que este aspecto representa un factor clave en las características del material acabado.

Para optimizar la alimentación de la carga al polímero, se prepararon concentrados de carga (50 ppc) para luego realizar diluciones que permitieran obtener

las proporciones deseadas en los compuestos, es decir, 10,20 y 30 ppc de carga. Sin embargo, al llevar a cabo la alimentación del polvo de las conchas (*bivalvos*) a la extrusora, se observó la formación de aglomerados en el tornillo dosificador de la tolva debido a la absorción de humedad proveniente del ambiente; así como posibles alteraciones en variables del equipo como flujo de entrada del polímero, presión y temperatura de extrusión, que trajeron como consecuencia que la cantidad de carga no fue la preestablecida y este error se trasladó hacia las diluciones (10, 20 y 30 ppc). Es por ello, que finalizada la etapa experimental se realizó la calcinación de tres de las muestras sin tratar de PP/Conchas, considerando la temperatura de degradación de la carga según los resultados de TGA (Apéndice N°2), para determinar la proporción real de la carga y estimar así el error para las demás formulaciones considerando que el método de preparación fue el mismo, además de asegurar que las propiedades mecánicas que se obtuvieron para cada uno de estos compuestos no obedecen a cambios en el contenido de carga. En la Tabla N°8 se reportan los resultados de la calcinación. (ver también Anexo N°3)

Tabla N°8. Resultados de la calcinación de las muestras de PP cargadas sin tratar.

Contenido de carga teórico [ppc]	Contenido de carga real [ppc]	Error [%]
10	7	32
20	14	32
30	22	28

Al contabilizar la masa de las muestras en los crisoles antes y después del proceso de calcinación, se determinó el contenido de carga real en éstas (Tabla N°8); obteniéndose un error cercano al 30% en todas las formulaciones. Por lo que el contenido de conchas (*bivalvos*) real en cada uno de los compuestos, es menor al esperado.

III.1.- Estudio del efecto de la proporción de carga (*bivalvos*) sobre las propiedades del compuesto

III.1.1.-Propiedades Térmicas

Según la literatura, *Young (1994)*, se sabe que muchas cadenas poliméricas poseen la habilidad para cristalizar, y esto varía de acuerdo al tipo de polímero y a su microestructura molecular. La principal característica de los polímeros cristalinos que los distingue de otros materiales cristalinos, es que ellos son semicristalinos. Esto se evidencia del hecho de que normalmente la densidad de un polímero semicristalino se sitúa entre los valores de densidad que se esperarían para un polímero altamente cristalino y el polímero del mismo tipo pero amorfo.

En las Figuras N°30, 31 y 32, se presentan los termogramas obtenidos para los compuestos PP/Conchas, PEAD/Conchas y PP/PEAD/Conchas, respectivamente. En ellos se aprecian ligeros cambios en las curvas del polímero puro (blanco), el cual fue pasado por la extrusora dos veces a las mismas condiciones, con respecto a las de los compuestos.

Para el PP, según lo que se muestra en la Figura N°30, se observa una alteración en la curva de fusión de los compuestos con carga, siendo más marcada en la formulación de 7 ppc, que podría ser indicio de una recristalización de las estructuras α del PP. Este comportamiento también se aprecia en la mezcla (Figura N°32) en la zona intermedia entre los picos de fusión de ambos componentes y para los compuestos tratados con el agente de acoplamiento tipo Lica 12 y el agente compatibilizante, Polybond, (Figuras N°43 y 45). Este efecto podría comprobarse realizando un estudio morfológico de estas formulaciones.

Figura N°30. Curva de calentamiento por DSC para el PP según el contenido de carga (bivalvos) en cada formulación.

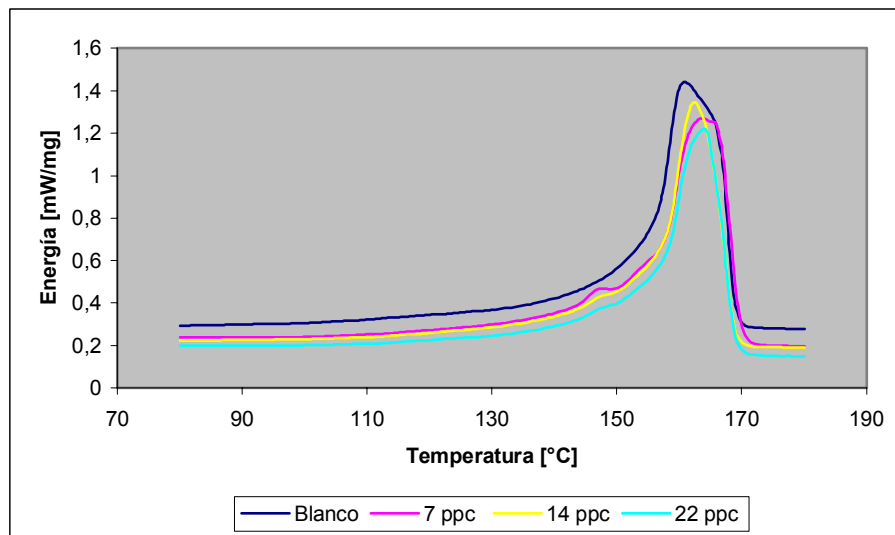


Figura N°31. Curva de calentamiento por DSC para el PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

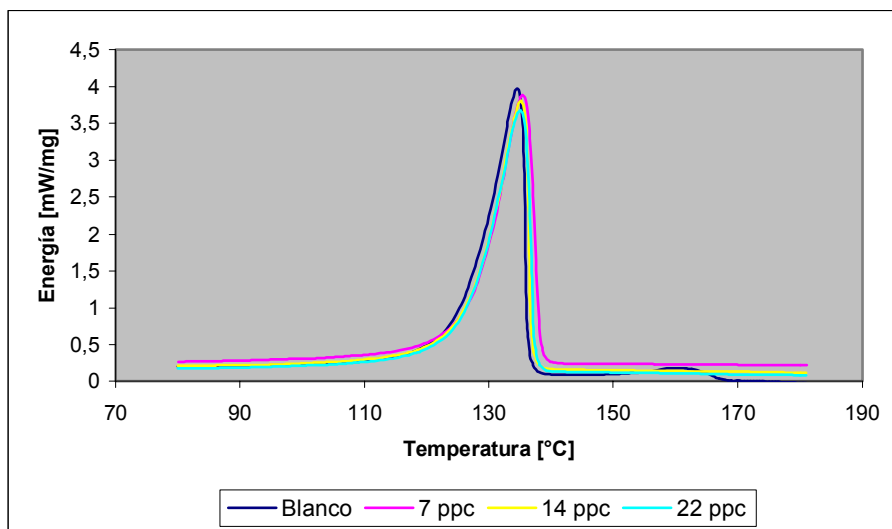
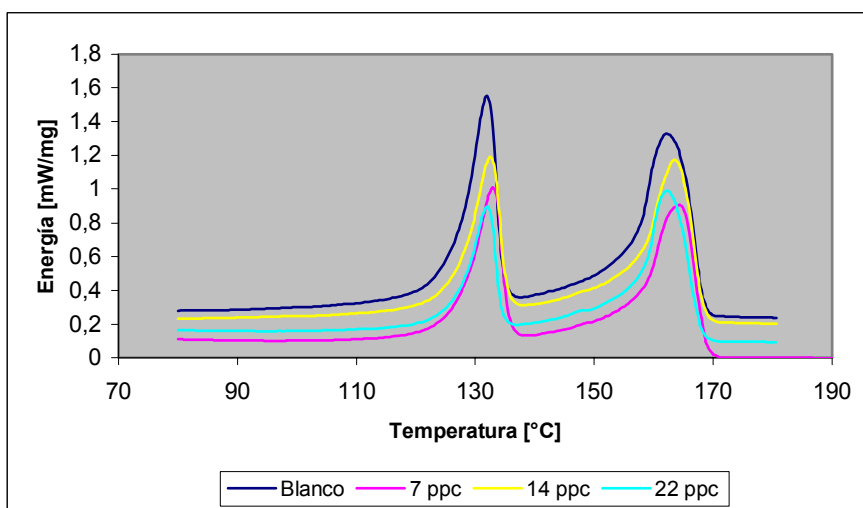


Figura N°32. Curva de calentamiento por DSC para la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.



En la Tabla N°9, se resumen los parámetros característicos que se extraen de los termogramas, es decir, las temperaturas de fusión y de cristalización, las entalpías de fusión y de cristalización y el porcentaje de cristalinidad. En primer lugar, se aprecia la relación proporcional entre la entalpía de fusión y el grado de cristalinidad el cual se incrementa al aumentar el contenido de carga (*bivalvos*), para los compuestos PP/Conchas y PEAD/Conchas, siendo más evidente en estos últimos. Esto se debe a que las partículas individuales de carga se pueden comportar como puntos de inicio de cristalización, promoviendo la formación de zonas cristalinas en

la estructura polimérica. También se observa que los valores de cristalinidad de los compuestos PP/PEAD/Conchas se encuentran en un nivel intermedio entre los del PP y PEAD, esto se debe a la incompatibilidad de ambos polímeros. Además, se puede decir que el incremento de la carga (*bivalvos*) no afecta de manera significativa la cristalinidad, pero sí la temperatura de cristalización particularmente para el PP y la mezcla PP/PEAD, haciéndolas superiores a la reportadas por el blanco pero similares entre sí. En cambio, para los compuestos de PEAD cargados, las temperaturas de cristalización son cercanas entre sí y similares al blanco.

Tabla N°9. Propiedades térmicas de los compuestos según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

Formulación		Tf PP [°C ± 1]	Tf PEAD [°C ± 1]	ΔHf [J/g ± 1]	Tc [°C ± 1]	ΔHc [J/g ± 1]	X [%]
PP	Blanco	161	-	105	111	-102	51
	7 ppc	164	-	108	114	-111	52
	14 ppc	162	-	109	115	-103	53
	22 ppc	164	-	108	115	-102	52
PEAD	Blanco	-	135	194	115	-204	66
	7 ppc	-	135	204	115	-197	70
	14 ppc	-	135	213	116	-208	73
	22 ppc	-	135	227	116	-226	77
PP/PEAD	Blanco	163	132	142	113	-137	64
	7 ppc	165	133	113	115	-149	50
	14 ppc	164	133	125	115	-126	56
	22 ppc	162	132	109	116	-111	49

NOTA: los datos de entalpía de fusión y cristalización están en función de los gramos de polímero.

Al evaluar la cinética de una reacción química se consideran parámetros como la energía de activación y el orden de la reacción, que permiten establecer como se lleva a cabo la misma. En el análisis de los termogramas obtenidos para las muestras (Figuras N°33, 34 y 35), en donde se estudia la descomposición térmica de sus componentes utilizando el TGAAnalyzer, se obtiene además del modelo matemático que mejor se ajusta al proceso termodegradativo, los valores del orden de la reacción y la energía de activación. Para los compuestos analizados en este trabajo, el modelo que mejor se ajusto fue el de Reich-Stivala (R-S), que como se observa en la Tabla N°10, el orden de la reacción en todas las formulaciones, por aproximación, es de uno y la energía de activación, así como las temperaturas de inicio, aumentan a medida que el contenido de carga en cada muestra se incrementa mostrando una mayor estabilidad térmica. Sin embargo, como la ecuación de la velocidad de reacción, cumple con la ecuación de Arrhenius, al ser la energía de activación parte del argumento de la función exponencial, su incremento con el contenido de carga, no representa variaciones significativas, debido a que su valor se encuentra en la zona de comportamiento asintótico.

Tabla N°10. Orden de reacción y Energía de activación según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

Formulación	Orden de la reacción [adim]	Ea [kJ/mol]	Ajuste	T inicio [°C ± 1]
PP	Blanco	1	0,9844	366
	7 ppc	1	0,9860	367
	14 ppc	1	0,9881	379
	22 ppc	1,1	0,9910	385
PEAD	Blanco	0,7	0,9820	371
	7 ppc	0,8	0,9810	336
	14 ppc	0,7	0,9911	392
	22 ppc	1,1	0,9928	421
PP/PEAD	Blanco	1	0,9851	376
	7 ppc	1,1	0,9848	369
	14 ppc	1,2	0,9913	386
	22 ppc	1,1	0,9864	384

Figura N°33. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

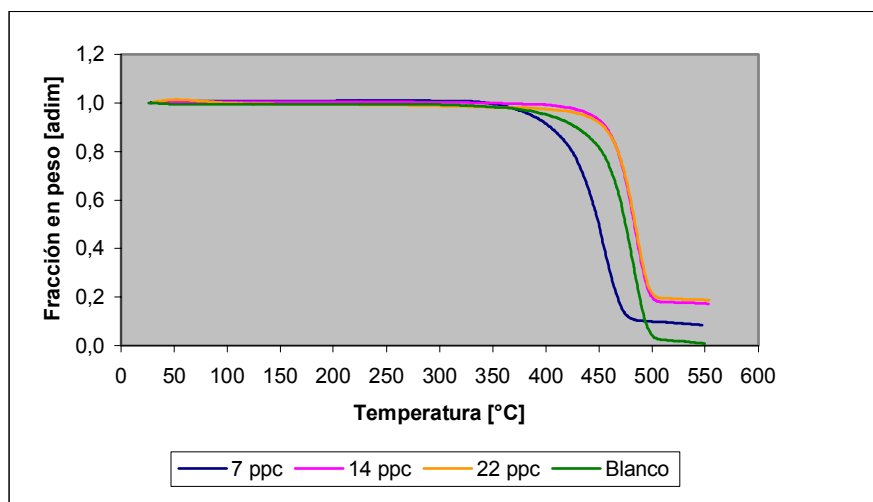


Figura N°34. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de PP según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

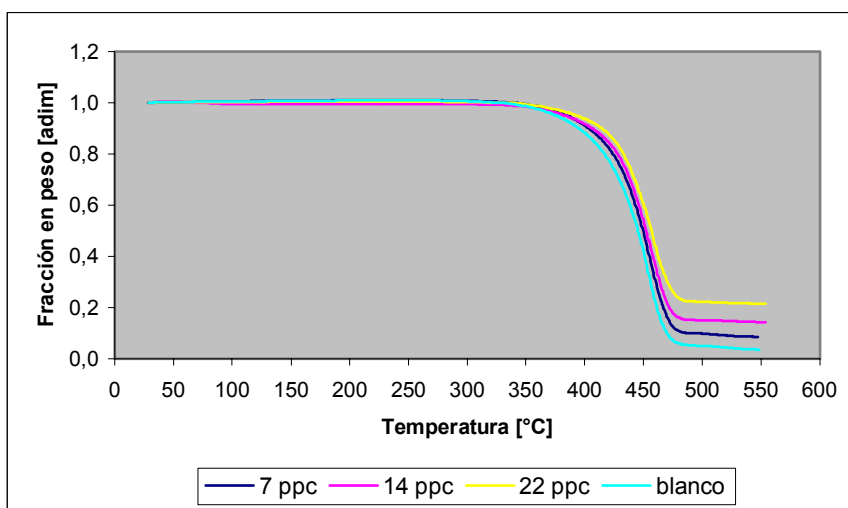
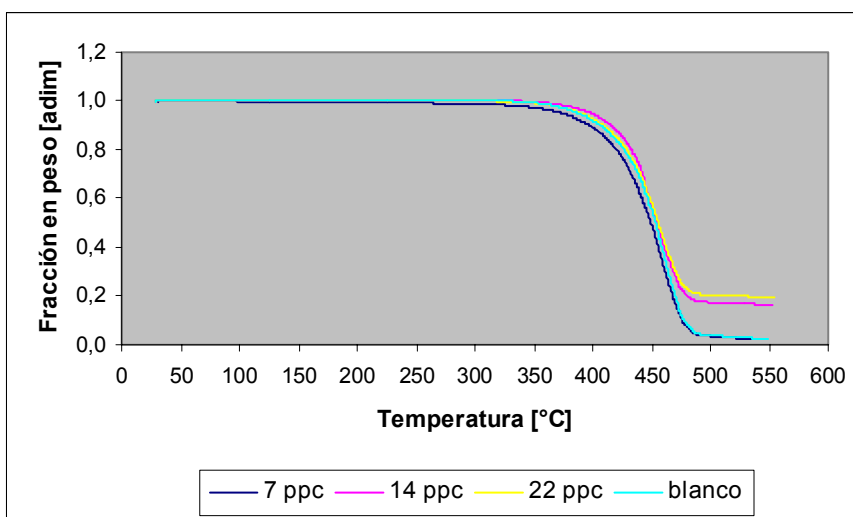


Figura N°35. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.



Al realizar los análisis de calorimetría y termogravimetría, se pueden apreciar valores aislados que no siguen el comportamiento general establecido por las demás muestras, hecho que podría atribuirse a errores en la etapa de obtención de los compuestos. Por esta misma razón, para determinar el contenido real de carga (*bivalvos*) en las mezclas realizadas se implementó la técnica de la calcinación en lugar de los TGA y se recomienda repetir aquellas muestras en donde los resultados no concuerden con la tendencia esperada.

III.1.2.-Propiedades Reológicas

Al analizar las curvas de viscosidad en función de la velocidad de deformación obtenidas a partir de los ensayos de reometría capilar para el PP, PEAD y la mezcla PP/PEAD, como se observa en las Figuras N°36, 37 y 38, respectivamente, se puede apreciar que todas las formulaciones cumplen con la linealidad de la Ley de la Potencia en el rango de velocidades estudiadas. Esto se comprobó al hacer las regresiones lineales del comportamiento del esfuerzo vs. la velocidad de deformación en cada una de las formulaciones obteniéndose correlaciones cercanas a 1. Adicionalmente, se aprecia que para la viscosidad no existe mayor influencia con el incremento del contenido de carga en el rango de velocidades de deformación estudiadas, haciendo que todas las curvas se solapen y sigan el mismo comportamiento. Sin embargo, se observa un ligero incremento en los niveles de viscosidad para los compuestos siendo más marcado para los de PEAD; esto se debe a que la presencia de las partículas sólidas de la carga constituyen un impedimento al libre flujo de las cadenas de la matriz polimérica, incrementando así su viscosidad.

Figura N°36. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PP según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

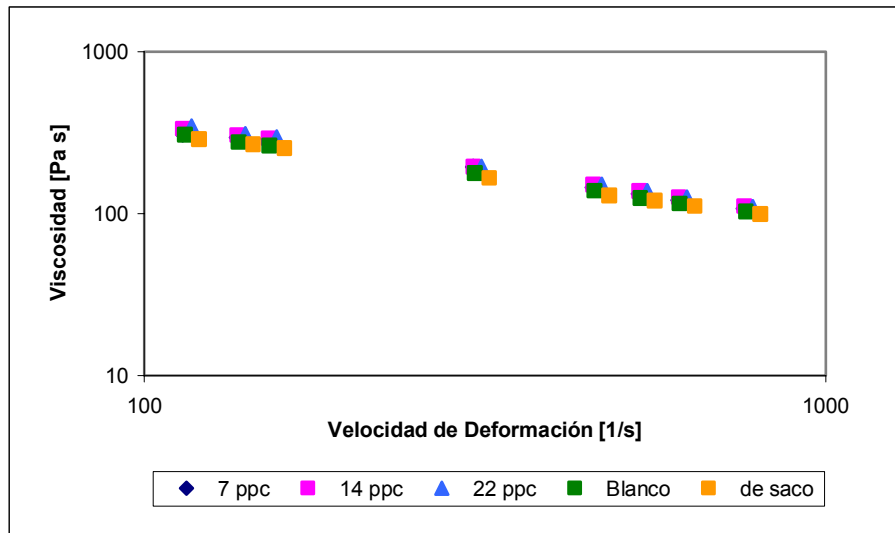


Figura N°37. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

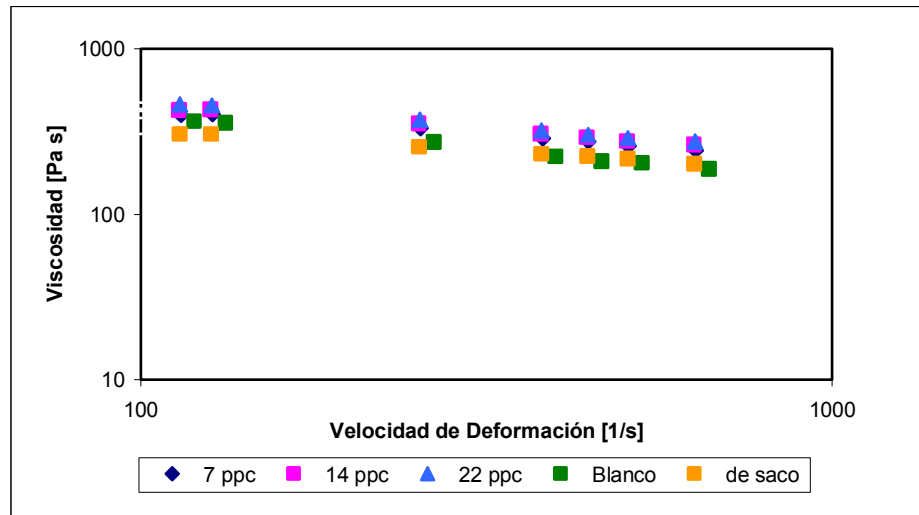
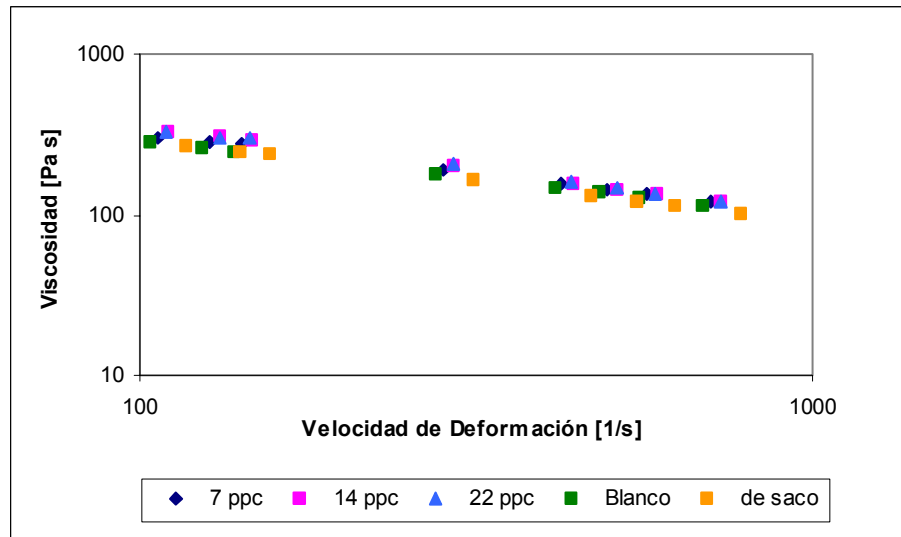


Figura N°38. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.



En la Tabla N°11, se muestran los valores de n y K obtenidos a partir de la ecuación de Ley de la Potencia. Al analizar los resultados, se puede concluir que los compuestos siguen un comportamiento pseudoplástico ($n < 1$) además de encontrarse en la zona de termoplásticos ($0,3 < n < 0,7$), tendencia esperada al trabajar con el PP y PEAD. Para los compuestos de PP y la mezcla PP/PEAD, se observa una disminución del exponente n , debido, posiblemente, a la formación de aglomerados de las partículas de carga (*bivalvos*), y un incremento en el índice de consistencia (K), evidenciando la rigidización del material, a medida que se incrementa el contenido de

carga (*bivalvos*) en cada una de las formulaciones con lo cual se obtiene un comportamiento más pseudoplástico. En el caso del PP, la disminución del n no fue significativa, por lo que se puede decir que el comportamiento reológico no se ve afectado de forma apreciable por la adición de carga (*bivalvos*). Para el PEAD, la rigidización por efecto de la carga también se aprecia en los valores de n. Sin embargo, los valores de n incrementan al incorporar la carga por una posible mejora en la distribución de la misma en este polímero.

Se realizó el ensayo de MFI para todas las formulaciones para tener una idea del comportamiento de los compuestos a más bajas velocidades de deformación. En la Tabla N°12, se muestran los resultados de MFI para todas las formulaciones.

Tabla N°11. Exponente (n) e Índice de consistencia (k) de la Ley de la Potencia según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

Formulación		n [adim]	K [Pa s ⁿ]
PP	De saco	0,4193	4735
	Blanco	0,4184	4849
	7 ppc	0,4194	5096
	14 ppc	0,4116	5505
	22 ppc	0,3967	6146
PEAD	De saco	0,7688	910
	Blanco	0,6071	2382
	7 ppc	0,7039	1664
	14 ppc	0,7148	1659
	22 ppc	0,6944	1968
PP/PEAD	De saco	0,4849	3141
	Blanco	0,5161	2703
	7 ppc	0,5035	3147
	14 ppc	0,4540	4392
	22 ppc	0,4613	4230

Al pasar los polímeros por la extrusora (blanco), ocurre una degradación en las cadenas que produce incrementos en los valores de los MFI con respecto a los valores correspondientes a los polímeros analizados tal como vienen del fabricante (saco) (Tabla N°12). En cambio, al agregar la carga (*bivalvos*) ocurre una disminución de los MFI producto de la rigidización de las cadenas; sin embargo, para los diferentes proporciones de conchas los valores se mantienen aproximadamente constantes. Las ligeras discrepancias en algunos de los resultados pueden ser producto de variaciones en el contenido de carga en las muestras analizadas.

Tabla N°12. Índice de Fluidez según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

Formulación		MFI [g/10min]
PP	De saco	8,67 ± 0,44
	Blanco	10,07 ± 0,44
	7 ppc	6,73 ± 0,26
	14 ppc	7,34 ± 0,47
	22 ppc	7,57 ± 0,72
PEAD	De saco	7,55 ± 0,41
	Blanco	12,65 ± 0,47
	7 ppc	10,45 ± 0,41
	14 ppc	10,31 ± 0,32
	22 ppc	10,23 ± 0,84
PP/PEAD	Blanco	8,16 ± 0,27
	7 ppc	8,11 ± 0,32
	14 ppc	7,66 ± 0,40
	22 ppc	8,13 ± 0,28

III.1.3.-Propiedades Mecánicas

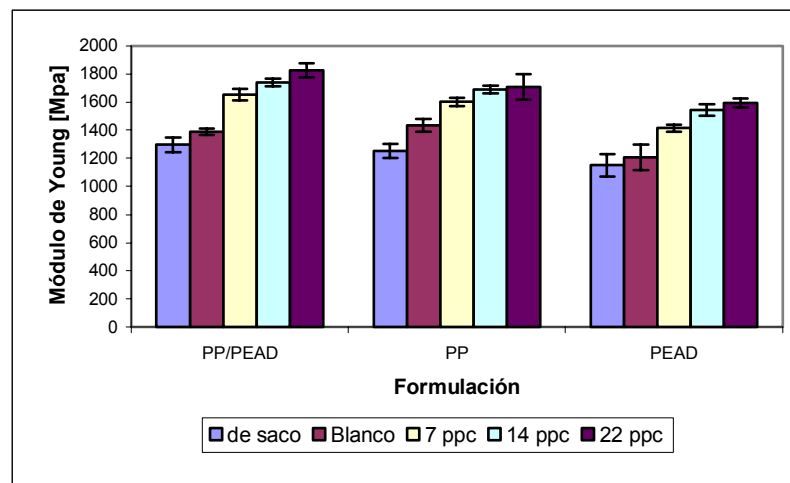
Las propiedades mecánicas de los materiales son de gran importancia en las aplicaciones ingenieriles. Cuando una fuerza mecánica es aplicada a una muestra, su deformación se describe en términos de un comportamiento de esfuerzo-deformación, que cuantifica el esfuerzo requerido para alcanzar una cierta cantidad de desplazamiento [Arends (1996)]. Además, el grado de cristalinidad, el tamaño y arreglo de los cristales en un polímero semicristalino tienen un gran efecto sobre las propiedades mecánicas y físicas del mismo [Young (1994)], por lo que al analizar los resultados de los ensayos mecánicos, se deben considerar los resultados obtenidos en los ensayos térmicos.

El módulo cuantifica la resistencia de un espécimen a la deformación mecánica, en el límite de una deformación infinitesimal, es decir, es la cantidad de energía necesaria para que se inicie la deformación. El módulo de Young en particular se refiere a la resistencia a una tensión uniaxial, lo que equivale al estiramiento en una sola dirección de la probeta.

La variación del módulo de Young en función al contenido de carga para cada una de las formulaciones se muestra en la Figura N°39, en donde se aprecia un incremento de esta propiedad mecánica a medida que la concentración de carga (*bivalvos*) en el compuesto aumenta; lo que ratifica los resultados obtenidos por distintas investigaciones, tales como las realizadas por *Premphet y Horanont (2001)*. Este comportamiento se atribuye a la rigidización de las cadenas poliméricas por la adición de la carga (*bivalvos*), por lo que se necesita un mayor esfuerzo para lograr

una mínima deformación en la probeta; tendencia que se verifica al estudiar la cristalinidad de las muestras (Tabla N°9) en donde a medida que se incrementa el contenido de carga, disminuye la existencia de zonas amorfas. Evaluando el comportamiento entre las muestras de saco y el blanco (el polímero sometido a extrusión dos veces), para el PEAD y la mezcla PP/PEAD, se observa que no hay variaciones significativas; sin embargo, para el PP se aprecia un comportamiento inusual (Eblanco>Esaco), probablemente, a causa de cambios en las condiciones de obtención del polímero por parte del distribuidor. Adicionalmente, para todas las formulaciones de 22 ppc, se obtienen valores de desviación altos en comparación con las demás; característica atribuible a la formación de aglomerados de carga (*bivalvos*).

Figura N°39. Módulo de Young según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada una de las formulaciones.



El comportamiento de los polímeros termoplásticos cargados con cargas inorgánicas de partículas rígidas muestran mayores valores del Módulo de Young, mejor estabilidad térmica y menor desgaste bajo fricción que los polímeros sin tratar. Sin embargo, bajo tensión, la adición de cargas disminuye el esfuerzo a la fluencia independientemente del tipo de relleno; en cambio el esfuerzo a la ruptura aumenta al incorporar la carga y a medida que se incrementa el porcentaje, éste disminuye [Thio et al (2002)]. *Premphet y Horanont (2001)*, encontraron al realizar sus estudios, que a medida que la concentración de carbonato de calcio aumenta, el módulo del compuesto lo hace de manera proporcional, mientras que la elongación a la fluencia y a la ruptura, al igual que el esfuerzo a la fluencia del compuesto, disminuyen con el incremento de la concentración de la carga. Desafortunadamente, las cargas también llevan a reducciones dramáticas en las fracturas del polímero bajo cargas tensiles. Adicionalmente las cargas pueden suprimir la formación de cuellos e iniciar el rompimiento por microgrietas. [Pritchard (1998)]. Esta tendencia que ha sido observada en compuestos de PP cargados y en mezclas de poliolefinas, se atribuye a

la pobre dispersión y adhesión de la carga a la matriz polimérica, como se muestra en los trabajos de *Arroyo R. et al (1991)*, quienes examinaron las propiedades mecánicas de los compuestos de PP/PEBD cargados con talco y *Nava R. (1997)* quien estudio el comportamiento mecánico de los compuestos de PP/PEAD cargado con CaCO_3 .

Cuando se emplea carbonato de calcio, como carga, según *Thio et al (2002)*, las partículas de éste juegan un doble papel en la temprana deformación de las mezclas a bajos esfuerzos: aumentando el módulo y disminuyendo el esfuerzo a la fluencia. El incremento del módulo en la región elástica anterior a la separación de las partículas muestra que existió alguna adhesión entre las partículas y la matriz a bajos esfuerzos. Sin embargo, el descenso constante del esfuerzo a la fluencia muestra que la adhesión es relativamente débil permitiendo la desunión anterior al desarrollo de la deformación plástica.

Los resultados que se obtuvieron para el esfuerzo y la deformación a la ruptura se muestran en las Figuras N°40 y 41, respectivamente, observándose una dispersión considerable en los compuestos de PP/Conchas y PEAD/Conchas. En el caso del PP la marcada diferencia entre los valores correspondientes al de saco y el blanco se puede atribuir a variaciones en las condiciones de procesamiento del material por parte del proveedor. Sin embargo, al evaluar los resultados para la mezcla PP/PEAD/Conchas se aprecia una leve disminución pero sin cambios significativos.

Estudiando el comportamiento en cada una de las formulaciones para el esfuerzo a la ruptura, éste sigue la tendencia observada en investigaciones anteriores, en donde a medida que el contenido de carga se incrementa, la carga máxima que puede soportar la probeta justo antes de la ruptura disminuye, debido a que las cargas pueden suprimir la formación de cuellos e iniciar el rompimiento por microgrietas [Pritchard (1998)]. De igual forma ocurre con la deformación a la ruptura, donde los valores disminuyen al incrementar la proporción de carga en el compuesto.

Al incorporar cargas a las distintas matrices poliméricas, se busca la disminución de los costos de producción con el subsiguiente cambio en las propiedades tensiles y de impacto. Trabajos como los realizados por *Han C.D. et al (1978,1981)*, *Maiti S.N. et al (1991)* y *Vollenberg P.H.TH. et al (1990)*, concluyen que la adición de cargas inorgánicas a sistemas poliméricos producen un deterioro en la resistencia tensil del material, debido a la pobre transferencia del esfuerzo aplicado a través de la interfase polímero-carga, generando la formación de microgrietas por la separación de la interfase al someterla a un estiramiento. Esta condición es frecuentemente originada por la falta de afinidad y las diferencias de polaridad entre la carga y el polímero, dando lugar a la formación de aglomerados de carga en la matriz polimérica creando discontinuidad en la estructura e influyendo de forma acentuada en la respuesta mecánica del compuesto, evitando que el esfuerzo se propague y se acumule alrededor de las partículas de carga.

A partir de los resultados obtenidos para la fluencia (ver Apéndice N°4), se aprecia que a medida que se incrementa el contenido de carga en las formulaciones, los valores de esfuerzo y deformación disminuyen, lo que evidencia la fragilización de los materiales.

Figura N°40. Esfuerzo a la Ruptura según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

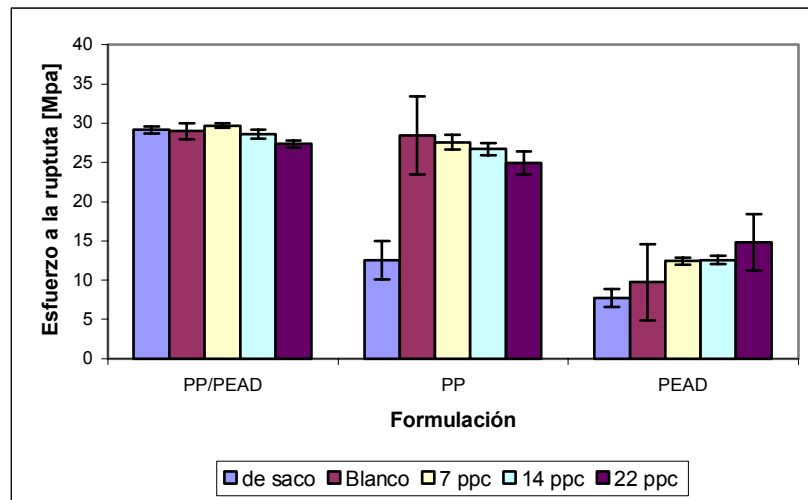
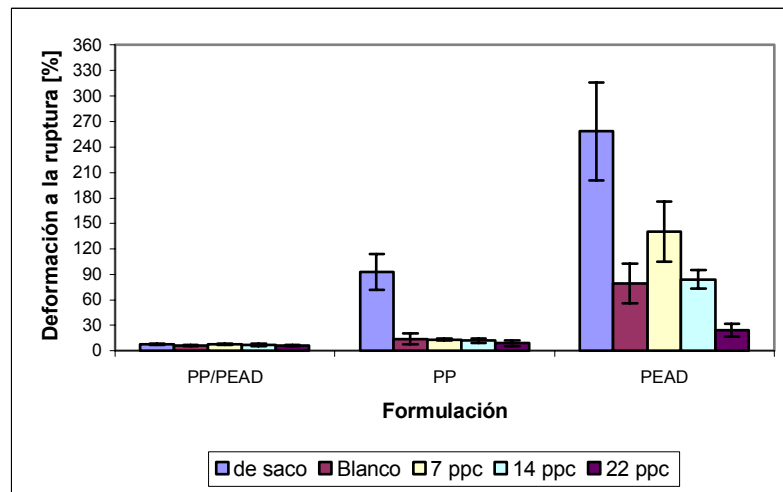


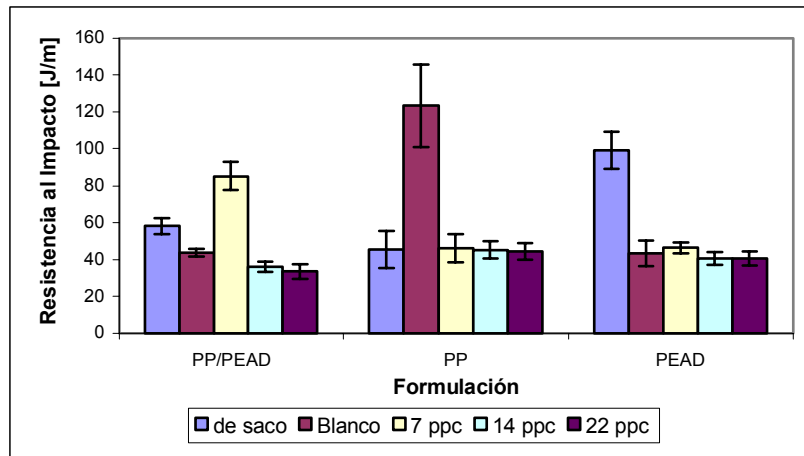
Figura N°41. Deformación a la Ruptura según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.



Las condiciones de inyección bajo las cuales se obtuvieron las piezas, provocaron la formación de “rechupe” en las probetas de impacto, debido a insuficiente tiempo de enfriamiento, haciendo que el área transversal de éstas fuese desigual y menor a la del molde original. Según los resultados de cristalinidad, al ser

el material más cristalino existe una mayor posibilidad de formación de “rechupe”. La posible mala distribución de la carga en la probeta produce zonas más rígidas que otras, al igual que la formación de huecos en su estructura interna, lo cual conlleva a valores desiguales al realizar el ensayo de impacto por lo que las desviaciones son apreciables. Además la existencia de las interfases carga-polímero, como se explicó anteriormente, son zonas sensibles a la ruptura por lo que a medida que sea mayor el contenido de carga la resistencia al impacto disminuye (Figura N°42).

Figura N°42. Resistencia al Impacto según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.



III.2.- Estudio del efecto del contenido de aditivos sobre las propiedades del compuesto con un contenido de conchas (*bivalvos*) de 22 ppc.

Después de realizar los ensayos térmicos, reológicos y mecánicos a todas las formulaciones en las que se variaba la proporción de carga para el PP, PEAD y la mezcla PP/PEAD; se observó que aunque existían variaciones en las propiedades de los compuestos, éstas no eran significativas por lo que al hacer la selección de la proporción a utilizar para ser sometida a tratamiento con un agente de acoplamiento tipo Lica 12 y un agente compatibilizante como el Polybond, se realizó en base a criterios económicos, es por ello que la proporción de conchas que se implementa en esta etapa experimental es la de 22 ppc.

III.2.1.-Propiedades Térmicas.

En las Figuras N°43, 44, 45, se muestran los termogramas de calentamiento obtenidos para los diferentes compuestos con variación en el contenido de agente de acoplamiento, tipo Lica 12 y agente compatibilizante, Polybond, en donde se aprecia la influencia de ambos aditivos sobre las propiedades térmicas de los compuestos en comparación con aquellos sin tratar.

Figura N°43. Curva de calentamiento por DSC para el PP según el contenido de aditivo en cada formulación.

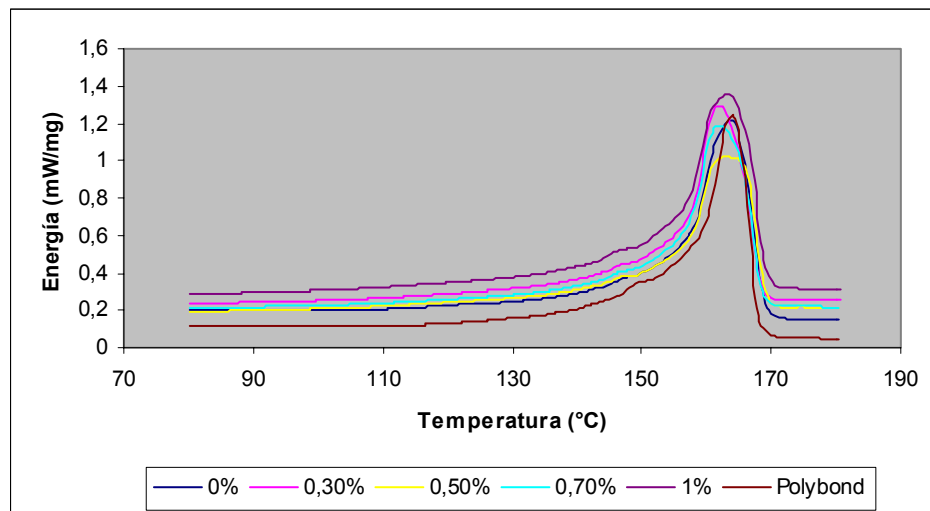


Figura N°44. Curva de calentamiento por DSC para el PEAD según el contenido de aditivo en cada formulación.

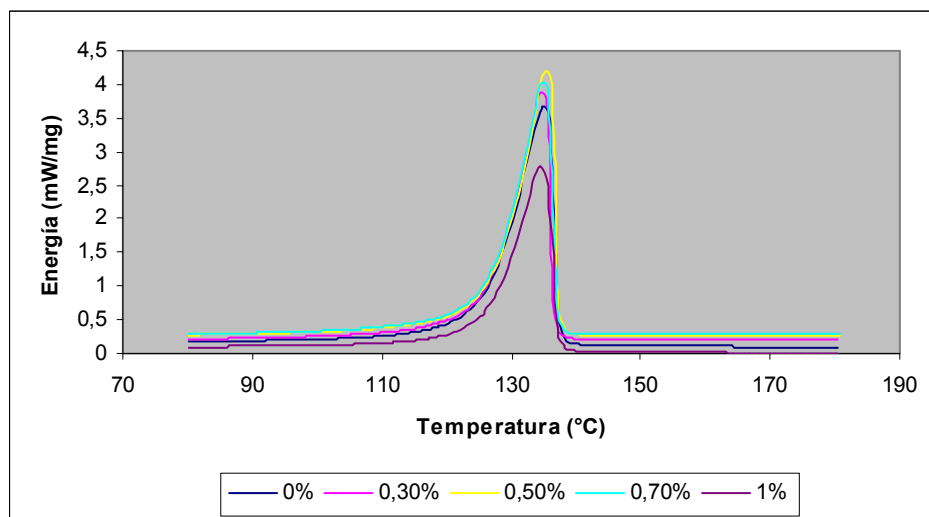
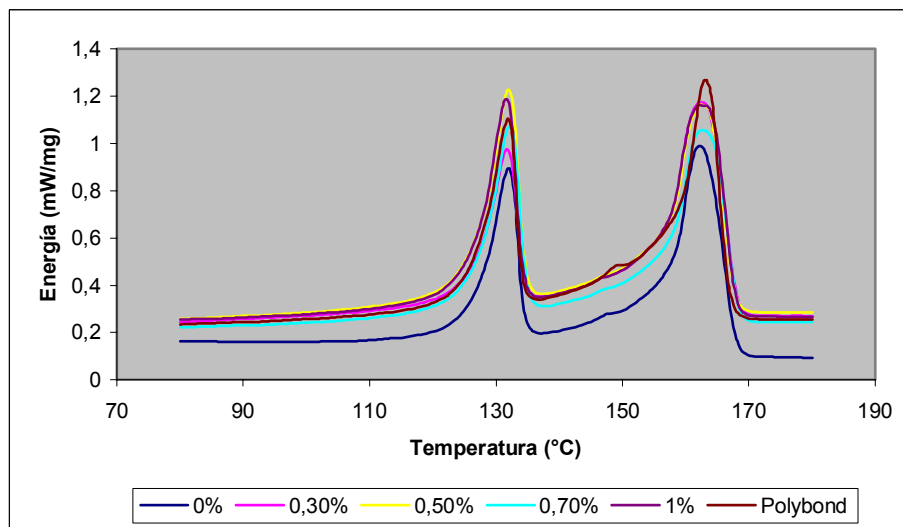


Figura N°45. Curva de calentamiento por DSC para la mezcla PP/PEAD según el contenido de aditivo en cada formulación.



Como se menciono anteriormente, existe una relación entre la cristalinidad y la entalpía de fusión que como se observa en la Tabla N°13 para el caso del PEAD/Conchas, tiene una tendencia a disminuir a medida que el contenido de Lica 12 aumenta, teniendo para la muestra de 0,3% una disminución apreciable; mientras que para el compuesto PP/Polybond el valor es similar al obtenido para la muestra sin tratar. En el caso de las formulaciones de la mezcla no se puede distinguir un comportamiento definido a causa de la incompatibilidad de los polímeros que la conforman. Según estos resultados, se observa una leve influencia del tratamiento de

la carga sobre los parámetros térmicos de los compuestos a diferencia de lo que observo *Díaz (1999)*. Al evaluar las temperaturas de fusión, se aprecia que éstas no varían con la adición de los aditivos, a excepción de los compuestos de PP, donde en las proporciones de 0,3% a 0,7% de Lica 12 ésta disminuyó; mientras que para las temperaturas de cristalización se observa un incremento significativo para los compuestos con Polybond a la vez que no se aprecian cambios en el resto.

Tabla N°13. Propiedades térmicas de los compuestos con 22 ppc carga según el contenido de aditivo en cada formulación.

Formulación	Tf PP [°C ± 1]	Tf PEAD [°C ± 1]	ΔHf [J/g ± 1]	Tc [°C ± 1]	ΔHc [J/g ± 1]	X [%]	
PP	0%	164	-	108	115	-102	52
	0,3%	162	-	102	115	-98	49
	0,5%	163	-	89	114	-88	43
	0,7%	162	-	101	114	-97	49
	1%	162	-	112	114	-106	54
	Polybond	164	-	106	120	-105	51
PEAD	0%	-	135	227	116	-226	77
	0,3%	-	135	214	116	-212	73
	0,5%	-	135	233	116	-228	79
	0,7%	-	135	230	115	-225	78
	1%	-	135	222	115	-214	76
PP/PEAD	0%	163	132	109	116	-111	49
	0,3%	163	132	127	115	-118	57
	0,5%	163	132	135	114	-125	60
	0,7%	163	132	119	115	-114	53
	1%	163	132	130	114	-129	58
	Polybond	163	132	129	120	-122	57

NOTA: los datos de entalpía de fusión y cristalización están en función de los gramos de polímero.

En la Tabla N°14, se presentan los resultados analizados con el software TGAalyzed a partir de los datos obtenidos en los ensayos termodegradativos de las muestras tratadas con el agente de acoplamiento (Lica 12) y el agente compatibilizante (Polybond) (Figura N°47, 48 y 49). Los datos reportados en la Tabla, siguen el modelo de Reich-Stivala (R-S), observándose que para todas las formulaciones con excepción de las muestras de PEAD 0,3% y PP/PEAD 0,5%, el orden de la reacción por aproximación es de uno; mientras que al estudiar los valores reportados para las energías de activación, se tiene, en el caso de los compuestos de PP y PEAD, una disminución a medida que el contenido de aditivo se incrementa comportamiento que no puede observarse claramente en la mezcla.

Tabla N°14. Orden de reacción y Energía de activación según el contenido de aditivo en cada formulación.

Formulación	Orden de la reacción [adim]	Ea [kJ/mol]	Ajuste	T inicio [°C ± 1]	
PP	0%	1,1	254,28	0,9910	385
	0,3%	0,9	218,29	0,9874	402
	0,5%	0,9	230,32	0,9871	405
	0,7%	1,0	171,69	0,9969	377
	1%	0,7	145,81	0,9940	376
	Polybond	0,4	138,7	0,9944	367
PEAD	0%	1,1	373,83	0,9928	421
	0,3%	1,5	396,27	0,9946	442
	0,5%	1,2	369,05	0,9922	445
	0,7%	1,4	401,9	0,9926	439
	1%	1,1	318,09	0,9920	436
PP/PEAD	0%	1,1	238,06	0,9864	384
	0,3%	1,2	237,27	0,9848	399
	0,5%	1,7	276,88	0,9838	378
	0,7%	1,0	177,07	0,9972	380
	1%	1,1	219,07	0,9839	399
	Polybond	1,2	289,5	0,9831	407

Figura N°46. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de PEAD según el contenido de aditivo en cada formulación.

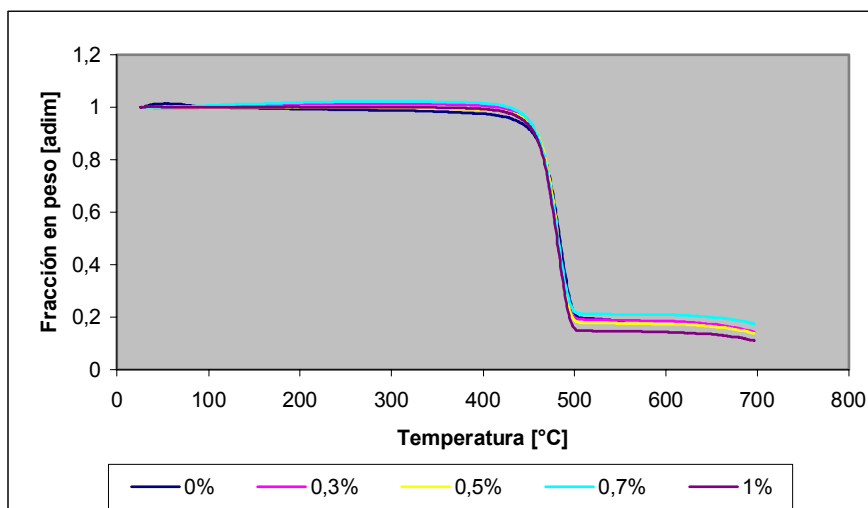


Figura N°47. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras del PP según el contenido de aditivo en cada formulación.

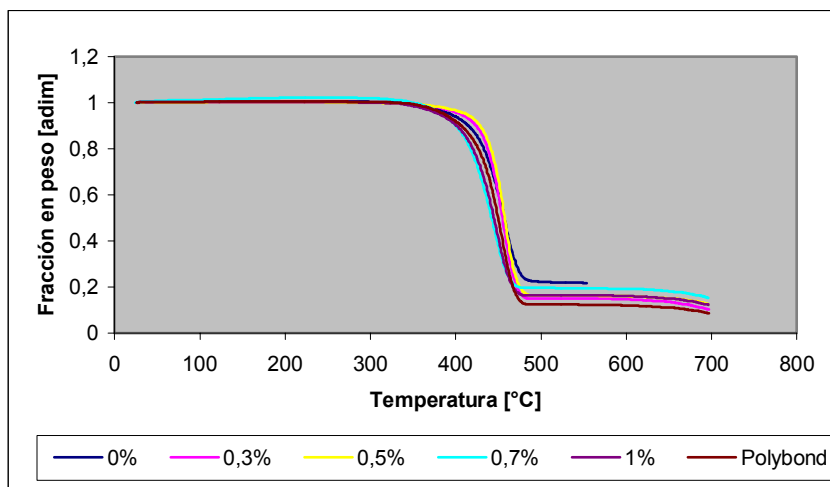
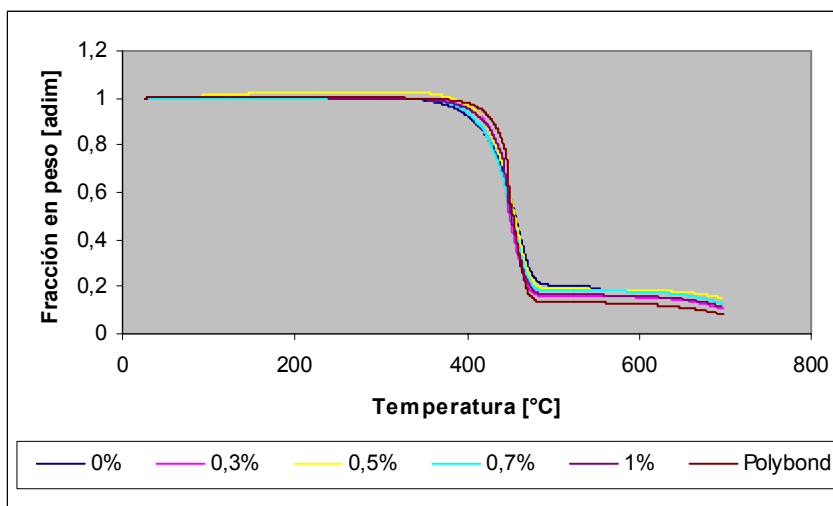


Figura N°48. Resultados del análisis termogravimétrico de las muestras de la mezcla PP/PEAD según el contenido de aditivo en cada formulación.



III.2.2.-Propiedades Reológicas.

En las Figuras N°49, 50, 51, se muestran las curvas reológicas para los compuestos de PP, PEAD y la mezcla PP/PEAD, con 22 ppc de carga, respectivamente. En ellas se puede apreciar, que la adición de los aditivos no afecta de manera apreciable el comportamiento lineal de las curvas ni tampoco los niveles de viscosidad, esto se observa en el hecho de que todas las curvas se solapan entre sí. Sin embargo, las investigaciones de *Han et al (1981)*, establecen que es posible cambiar drásticamente las propiedades reológicas de sistemas poliméricos altamente

cargados a través del uso de agentes de acoplamiento. Un posible mecanismo mediante el cual se producen estos cambios es el efecto plastificante de las macromoléculas que producen los agentes de acoplamiento, modificando las características interfaciales del material polimérico y formando fuertes atracciones de Van der Waals entre las cadenas orgánicas cortas del agente de acoplamiento y las cadenas largas del polímero, mejorándose así la compatibilidad entre las partículas y la matriz polimérica. Por lo que, al observar para las formulaciones cargadas con conchas (*bivalvos*) no hubo una modificación apreciable en el comportamiento reológico, se puede decir que al parecer la Lica 12, en estos porcentajes, no actúa como modificador de superficie para las partículas de conchas (*bivalvos*).

Figura N°49. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PP a 22 ppc de carga según el contenido de aditivo en cada formulación.

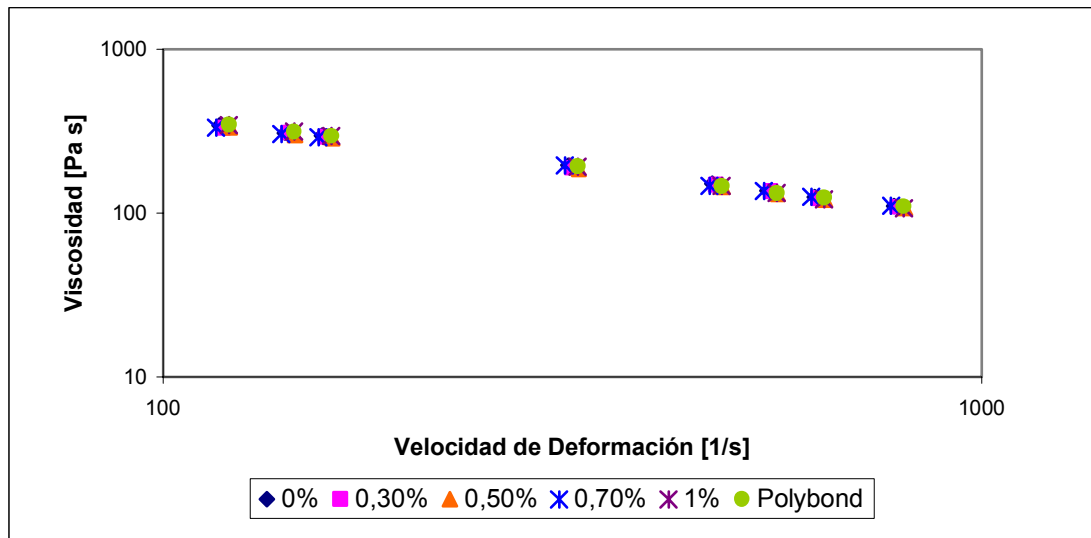


Figura N°50. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para el PEAD a 22 ppc de carga según el contenido de aditivo en cada formulación.

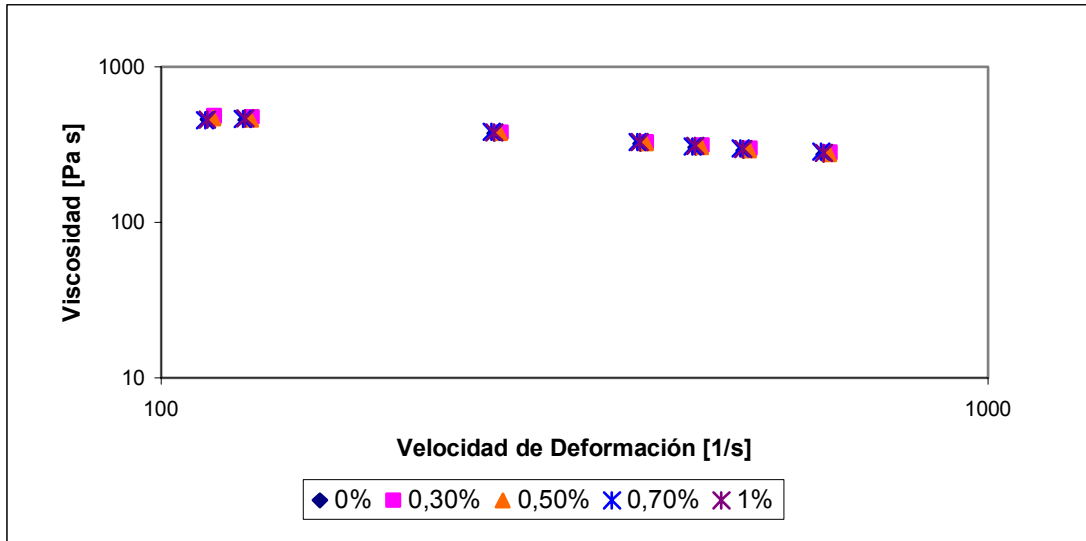
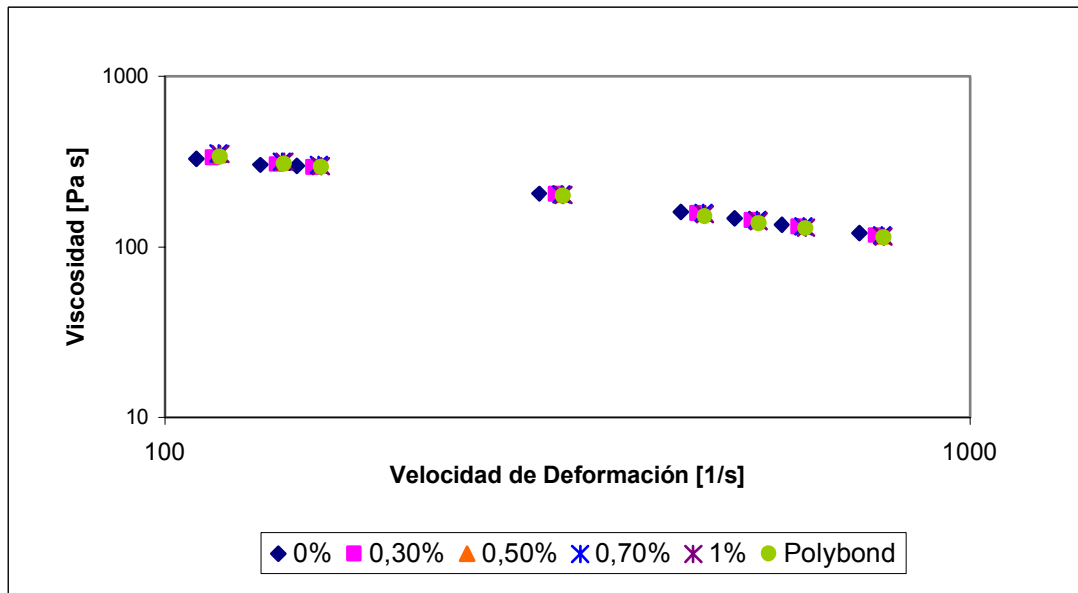


Figura N°51. Variación de la viscosidad en función de la velocidad de deformación para la mezcla PP/PEAD a 22 ppc de carga según el contenido de aditivo en cada formulación.



En la Tabla N°15, se presentan los valores de n y K de la Ley de la Potencia correspondientes a las formulaciones con carga tratada. Para el caso del PP, no se observa una tendencia clara en la variación de estos parámetros a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo en estas formulaciones, sin embargo para la muestra de 1% de Lica 12, el valor de n se reduce y el de K aumenta significativamente debido a la existencia de una posible interfase, aunque débil, que opone resistencia al flujo del material. En las formulaciones de PEAD, de manera similar no se observa un comportamiento definido, al igual que en las de PP, no obstante para la muestra de 0,7% de Lica 12, se observó una disminución del K y un aumento del n, lo cual evidencia un posible efecto plastificante de las cadenas por el agente de acoplamiento, haciendo que se deslicen las cadenas de polímero facilitando el flujo. En cambio, para la mezcla PP/PEAD se aprecia una disminución en el valor de n y un ligero incremento en el valor de K a medida que aumenta el contenido de agente de acoplamiento, lo cual podría ser indicio de la formación de una débil interfase. Evaluando el Polybond, en el caso del PP, se observa una disminución en el n y un aumento en el K, lo que se atribuye a la acción compatibilizante por parte del aditivo.

De nuevo, para obtener una idea del comportamiento reológico a más bajas velocidades de deformación y por ser una medida fácil de obtener en la práctica, se realizó el ensayo de MFI para todas las formulaciones con carga tratada. En la Tabla N°16, se muestran los resultados de MFI para todas las formulaciones, y como se puede apreciar las variaciones en los resultados no son significativas.

Tabla N°15. Exponente (n) e Índice de consistencia (k) de la Ley de la Potencia según el porcentaje de aditivo en cada formulación.

Formulación		n [adim]	K [Pa s ⁿ]
PP	0%	0,3967	6146
	0,3%	0,4010	5904
	0,5%	0,3909	6222
	0,7%	0,4102	5578
	1%	0,3719	7089
	Polybond	0,3812	6748
PEAD	0%	0,6944	1968
	0,3%	0,6815	2193
	0,5%	0,6895	2052
	0,7%	0,7209	1717
	1%	0,7092	1839
PP/PEAD	0%	0,4613	4230
	0,3%	0,4385	4888
	0,5%	0,4176	5583
	0,7%	0,4125	5828
	1%	0,4111	5812
	Polybond	0,4153	5547

Tabla N°16. Índice de Fluidez según el contenido de aditivo en cada formulación.

Formulación		MFI [g/10min]
PP	0%	7,57 ± 0,72
	0,3%	6,06 ± 0,29
	0,5%	6,06 ± 0,39
	0,7%	6,26 ± 0,42
	1%	6,23 ± 0,26
	Polybond	6,20 ± 0,20
PEAD	0%	10,23 ± 0,84
	0,3%	10,88 ± 0,58
	0,5%	11,41 ± 0,83
	0,7%	12,31 ± 0,70
	1%	11,32 ± 0,33
PP/PEAD	0%	8,13 ± 0,28
	0,3%	7,34 ± 0,32
	0,5%	7,50 ± 0,32
	0,7%	7,16 ± 0,32
	1%	6,85 ± 0,42
	Polybond	6,84 ± 0,42

III.2.3.-Propiedades Mecánicas.

Los agentes de acoplamiento son químicos que mejoran la adhesión entre dos fases en un material compuesto, siendo un material compuesto aquel que posea dos o más componentes distintos que no estén unidos químicamente el uno al otro. Las razones para usar agentes de acoplamiento o agentes de tratamiento de superficie para realizar el tratamiento superficial de las cargas de partículas son ligeramente diferentes a los aplicables para las fibras reforzantes. El objetivo de realizar un tratamiento superficial es prevenir la aglomeración de partículas finas durante las etapas preliminares del procesamiento, siendo esto perjudicial para la viscosidad del polímero que contiene la carga, y también para la resistencia mecánica del producto terminado [Pritchard (1998)].

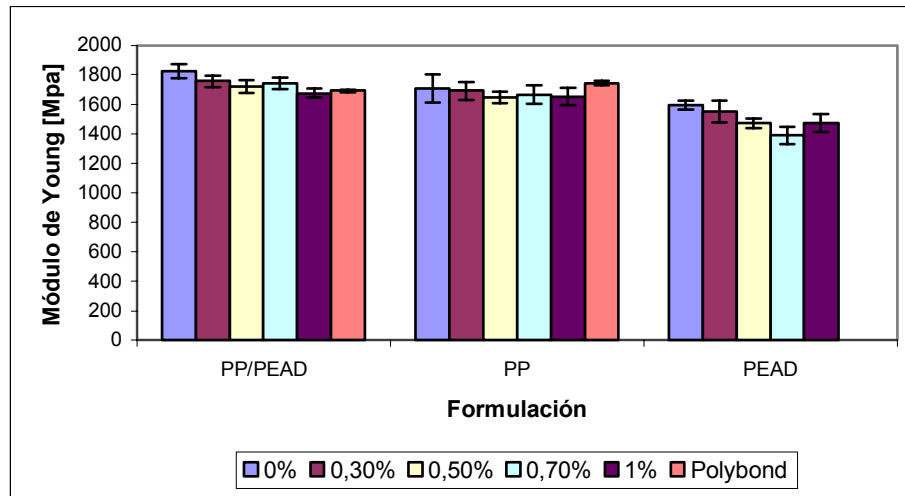
Desde el punto de vista de la escogencia de partículas rígidas como carga, *Thio et al (2002)*, encontraron que existe un óptimo grupo de tamaño de partículas que conduce al mejoramiento de la dureza. Por otro lado, partículas muy pequeñas son difíciles de dispersar creando aglomerados que se comportan como una única partícula larga; por lo que el tamaño óptimo depende del procesamiento de los componentes y de la tolerancia de la matriz polimérica a grandes inclusiones. En tal sentido para mejorar las dificultades presentes entre ambos componentes polímero-carga, *Nakagana et al (1985)* encontraron que utilizando partículas de CaCO₃ de un

menor tamaño en compuestos de PP, se mejoraba la dispersión y se incrementaba la resistencia al impacto. Por su parte, *Han C.D et al (1978,1981)* y *Maiti S.N. et al (1991)*, determinaron que aplicando agentes de acoplamiento (del tipo titanatos) sobre la superficie del carbonato de calcio y mezclando con el PP, se promovía un buen enlazamiento entre la carga y la matriz lo que conlleva a una mejora en las propiedades tensiles y de impacto del compuesto al existir una mayor afinidad entre las partes. Adicionalmente, se conoce que el tratamiento de la superficie de la carga con agentes de acoplamiento, promueve una mayor dispersión de las partículas evitando la formación de aglomerados y mejorando la distribución de esfuerzos en la matriz [Liu et al (2002)].

Conociendo que los agentes de acoplamiento trabajan como agentes dispersantes para cargas como el CaCO_3 debido a que disminuyen su energía superficial reduciendo la interacción entre polímero-carga [Pritchard (1998)], como se observa en la Figura N°52, la energía necesaria para lograr la mínima deformación (representada por el módulo de Young) disminuye a medida que el porcentaje de agente de acoplamiento aumenta en el compuesto, mostrando con esto el efecto lubricante mencionado anteriormente siendo más marcada en los compuestos de PEAD a excepción de la muestra de 1% donde existe un ligero aumento de esta propiedad con respecto al valor anterior.

Para el caso del Polybond en la formulación de PP, se observa un aparente incremento en las propiedades del módulo de Young y esfuerzo a la ruptura (Figura N°53) y una disminución en la deformación a la ruptura (Figura N°54), en comparación con aquellas formulaciones que contienen Lica 12 evidenciando su efecto compatibilizante haciendo el material más rígido, pero cercano a los valores reportados por aquella no tratada debido a la mejoría de la afinidad de los componentes que conforman el compuesto final. En cambio, para la mezcla PP/PEAD tratada con Polybond, no se observa un efecto compatibilizante al no incrementar el Módulo de Young ni el esfuerzo a la ruptura.

Figura N°52. Módulo de Young según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (*bivalvos*) a 22 ppc.



Según *Díaz (1999)* al examinar la morfología de las muestras con distintos tamaños de partícula de carbonato de calcio al añadirle el mismo porcentaje de Lica 12, determinó que existe una mayor interacción entre las partículas de menor tamaño y la matriz; lo que induce a pensar, según los resultados de *Maiti S.N. et al (1991)*, que dependiendo de la composición de agente de acoplamiento que se incorpore a la carga, así como el tamaño de partícula de carga que se adicione a la matriz en estudio se pueden provocar cambios en las propiedades de resistencia de los compuestos, teniendo en cuenta que las partículas de menor tamaño tienden a distribuirse de una manera más uniforme y homogénea en la matriz, incrementando la rigidez y la resistencia de la cadena polimérica [*Nakagana H. et al (1985)* y *Vollenberg P.H.T.H et al (1990)*]. Por lo que concluye que la incorporación del agente de acoplamiento tipo Lica 12 a las mezclas de PP/PEAD cargadas con carbonato de calcio, no logra promover un incremento en la resistencia tensil del material y sugiere que un aumento de estas propiedades con la adición de este aditivo depende en una gran proporción del tamaño de partícula del relleno que se estudie.

Teniendo en cuenta que la adición de carga a la matriz polimérica afecta de forma considerable los valores del esfuerzo a la ruptura y fluencia debido a que promueven la formación de microgrietas; al incorporar los agentes de acoplamiento se aumenta el área interfacial debido a la dispersión que ellos provocan en el relleno, por lo que al existir una mayor área interfacial los puntos sensibles a la fractura son mayores y la energía necesaria para lograr la falla y la deformación permanente es menor. (Figura N°53).

Estudiando la deformación a la ruptura (Figura N°54), se observa un incremento de esta propiedad debido a la mejor distribución del esfuerzo a lo largo del material debido a que la carga se encuentra dispersa como consecuencia de la

adición de un agente de acoplamiento; por lo que la pieza puede deformarse en un mayor rango de fracturar, a excepción de la muestra de PEAD de 0,7%, en donde se observa un comportamiento inusual, tal vez producto de la mala distribución del agente en la carga. En cambio al utilizar agentes compatibilizantes como el Polybond, el efecto de dispersión mencionado no se genera sino que se mejora la unión entre los componentes aumentando el valor del esfuerzo y la deformación a la ruptura.

Figura N°53. Esfuerzo a la Ruptura según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (*bivalvos*) a 22 ppc.

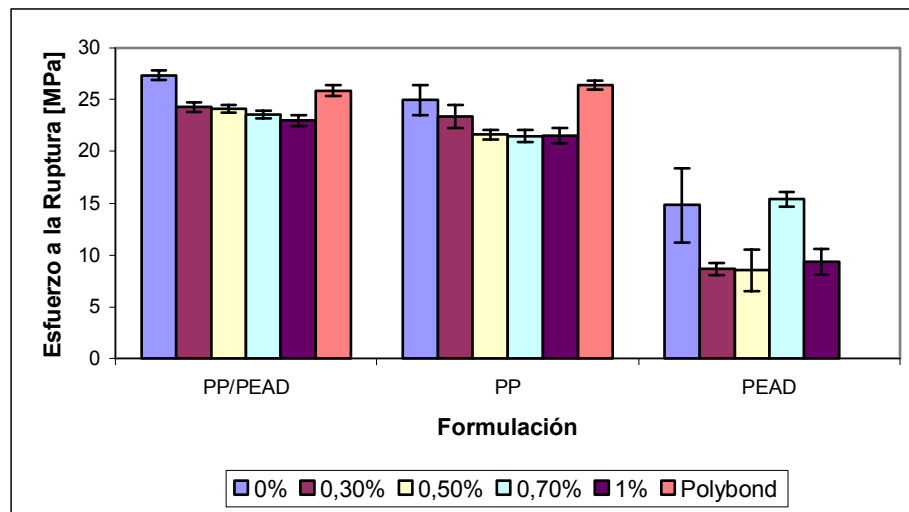
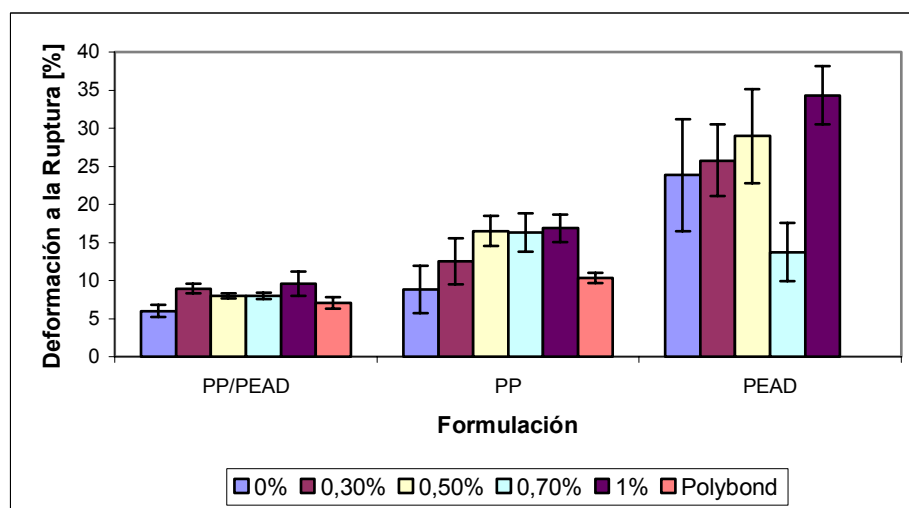


Figura N°54. Deformación a la Ruptura según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (*bivalvos*) a 22 ppc.



La tendencia ligeramente decreciente que se observa para las propiedades de resistencia a la ruptura y el incremento en la elongación a la ruptura de las piezas al incrementar el contenido del agente de acoplamiento del tipo Lica 12, han sido atribuidos según los resultados de las investigaciones de *Han C.D. et al (1978, 1981)* y *Díaz (1999)* al efecto lubricante-plastificante que suelen ejercer los agentes de acoplamiento en los compuestos poliméricos cargados, lo que contribuye a que se mejore tanto la etapa de estiramiento en frío del material, etapa iniciadora y/o promotora de la posterior deformación plástica, así como la prolongación de la ruptura final de la pieza fabricada.

La falta de adhesión entre la matriz y la carga debida a la pobre transferencia de esfuerzos en la interfase de estos componentes provoca una disminución de las propiedades de resistencia a la tracción al comparar las muestras tratadas con las del polímero solo [Sharma Y.N et al (1982, 1986)]. Por su parte, *Chiang W. et al (1988)* comprobó según los resultados de morfología, que el incremento en la resistencia a la ruptura de los compuestos de PP cargados con mica fueron ocasionados por el mejoramiento de la adhesión entre ellos. Trabajos similares como los de *Maiti S.N. et al (1991)*, muestran que aunque se incrementa en gran proporción la adhesión entre el carbonato de calcio y la matriz del polipropileno con la incorporación de Lica 12, el detrimento en la resistencia a la ruptura se le atribuye a la presencia de ciertas microgrietas o cavidades huecas, así como aglomerados que quedaron en la estructura de estos compuestos aún después del tratamiento, que hacen que el esfuerzo que se aplique sobre este material no se propague y/o magnifique a través de toda la pieza, sino que se acumule alrededor de las partículas de carga creando una discontinuidad en la estructura evitando el incremento de la resistencia de estos compuestos a pesar de haber sido tratados.

Para las propiedades referentes a la fluencia (ver Apéndice N°4), se tiene que el esfuerzo disminuye con el incremento de los agentes de acoplamiento; mientras que el valor de la deformación aumenta. Esta tendencia, en conjunto con la observada para la ruptura, nos lleva a pensar que los materiales se hacen más flexibles a medida que el porcentaje de aditivo se incrementa en cada formulación. En el caso de las muestras con el agente compatibilizante, para el PP se tiene un aumento en los parámetros de fluencia, de forma similar a los resultados obtenidos para la ruptura. En el caso de los compuestos PP/PEAD/Carga tratada, todas presentaron comportamiento frágil.

El detrimento en las propiedades mecánicas, en algunos compuestos, con la adición del agente de acoplamiento del tipo Lica 12, se atribuye a que el agente no esté ejerciendo su función o que no se encuentra homogéneamente disperso en la carga (*bivalvos*) produciéndose zonas en las que se produzca un mejor tratamiento que en otras, en otras palabras existen zonas más débiles en la formulación. En el Apéndice N°4, se presentan todos los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas.

CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo especial de grado, en donde se estudió la adición de conchas de mar (*bivalvos*), como carga, con y sin agente de acoplamiento al PP, PEAD y la mezcla PP/PEAD; se concluye:

En base al contenido de carga:

- La cristalinidad de los compuestos PEAD/Conchas aumenta a medida que el contenido de carga (*bivalvos*) se incrementa por ser, posiblemente, puntos de inicio para la cristalización del material.
- La incompatibilidad entre el PP y el PEAD, en la mezcla y en la proporción estudiada inhibe el efecto iniciador de cristalización que poseen las partículas de carga, no observándose ninguna tendencia clara en los resultados de cristalinidad al aumentar la proporción de carga.
- De la reacción de descomposición térmica, se concluye que todas las formulaciones siguen el modelo Reich-Stivala (R-S), con un orden de reacción igual a uno, y un incremento en la energía de activación a medida que se adiciona la carga (*bivalvos*) en los compuestos de PP y PEAD.
- Todas las formulaciones cumplen con la Ley de la Potencia, y exhiben un comportamiento pseudoplástico.
- Para el PP y la mezcla PP/PEAD, se aprecia que el incremento en el contenido de carga (*bivalvos*) no afecta la viscosidad.
- Para el PEAD, los niveles de viscosidad incrementan con la adición de carga (*bivalvos*), debido a que las partículas interfieren con el libre movimiento de las cadenas.
- Para los compuestos de PP y la mezcla PP/PEAD, disminuye el exponente de la Ley de la Potencia, debido a la formación de aglomerados de las partículas de carga (*bivalvos*), y se incrementa el índice de consistencia, evidenciando así la rigidización del material, a medida que se incrementa el contenido de carga (*bivalvos*) en cada una de las formulaciones obteniéndose así un comportamiento más pseudoplástico.
- El módulo de Young aumenta con el contenido de carga (*bivalvos*) para todos los compuestos estudiados.
- Las propiedades tensiles en el punto de ruptura, para el PP y la mezcla, disminuyen con el contenido de carga (*bivalvos*) debido a que éstas pueden suprimir la formación de cuellos e iniciar el rompimiento por microgrietas.
- Los parámetros de fluencia disminuyen con el incremento del contenido de carga (*bivalvos*) evidenciando la fragilización del material.
- La proporción óptima de carga (*bivalvos*) que se utilizó, para los polímeros estudiados fue de 22 ppc; debido a que no se observaron cambios significativos en las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas de los compuestos. La escogencia de esta proporción en particular, se establece por razones económicas.

En base al contenido de aditivo:

- Existe una leve influencia del tratamiento de la carga sobre los parámetros térmicos de los compuestos, haciendo que la cristalinidad disminuya de forma evidente en las muestras de PEAD.
- La cristalinidad del PP/Polybond, es similar a la obtenida para la muestra sin tratar.
- De los estudios de geometría capilar se puede apreciar, que la adición de los aditivos no afecta de manera apreciable el comportamiento lineal de las curvas ni tampoco los niveles de viscosidad, observándose en el hecho de que todas las curvas se solapan entre sí.
- Para el caso del PP, no se observa una tendencia clara en la variación del exponente y la constante de la Ley de la Potencia a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo en estas formulaciones. Pero para la muestra de 1% de Lica 12, el valor de n se reduce y el de K aumenta significativamente debido, posiblemente, a la existencia de una interfase carga-polímero.
- Para la muestra de PEAD 0,7% de Lica 12, se tiene una disminución del K y un aumento del n, evidenciando un efecto plastificante de las cadenas de agente de acoplamiento.
- Para la mezcla PP/PEAD se aprecia una disminución en el valor de n y un ligero incremento en el valor de K a medida que aumenta el contenido de agente de acoplamiento, lo cual podría ser indicio de la formación de una débil interfase.
- Con la incorporación del Polybond en los compuestos PP/Conchas, se observó una disminución en el n y un aumento en el K, lo que se atribuye a la acción compatibilizante por parte del aditivo.
- El módulo de Young y los esfuerzos a la ruptura y a la fluencia, disminuyen ligeramente a medida que el porcentaje de aditivo en las formulaciones se incrementa, quizás, por el efecto lubricante del agente de acoplamiento.
- Para las muestras con Polybond, en el caso del PP, se aprecia un incremento del módulo de Young y el esfuerzo a la ruptura, así como en los parámetros de fluencia, y una disminución en la deformación, lo que evidencia un efecto compatibilizante.
- El esfuerzo a la fluencia disminuye con el incremento de los agentes de acoplamiento, mientras que el valor de la deformación a la fluencia aumenta.
- El comportamiento de los propiedades de fluencia en conjunto con los de ruptura, indican que los materiales se hacen más flexibles a medida que el porcentaje de Lica 12 se incrementa.

RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones que, según los autores, podrían mejorar la etapa de procesamiento y los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados.

- Encontrar una manera más eficiente de adicionar la carga (*bivalvos*) al polímero en la etapa de extrusión, para no tener que realizar un concentrado (50 ppc) y para evitar que el error en la proporción se propague a las posteriores diluciones.
- Trabajar con un mismo lote de polímero para evitar que modificaciones en la etapa de obtención del polímero por parte del fabricante, afecten los resultados de los ensayos posteriores.
- Aumentar el tiempo de enfriamiento en el proceso de inyección para evitar o minimizar la formación de rechupe en las probetas de impacto.
- Trabajar con otro tipo de matriz polimérica como elastómeros.
- Estudiar el efecto de la variación del tamaño de partícula sobre las propiedades de los compuestos.
- Estudiar el efecto de diferentes agentes de acoplamiento: Titanatos, Silanos, Zirconatos; así como otros agentes compatibilizantes en las propiedades de los compuestos.
- Realizar los estudios de morfología y microscopía electrónica de barrido para establecer la formación de aglomerados y comprobar el efecto lubricante-plastificante del agente de acoplamiento y compatibilizante del Polybond en los compuestos cargados con conchas (*bivalvos*).
- Estudiar la adición de otro tipo de conchas de moluscos como carga, producto de la industria pesquera, para valorar la factibilidad económica de este tipo de trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Albano, C., “Reutilización de plásticos: estudio térmico, mecánico y termodegradativo de las mezclas de PP y PEDB con PEAD degradado”, Trabajo de ascenso presentado a la Universidad Central de Venezuela, Diciembre (1994).
- American Society for Testing and Materials., “Annual book of ASTM standards. Plastics-General Test Methods, Nomenclature”,**35** (1980).
- Arends, Charles., “Polymer Toughening”, 1-60, New York (1996).
- Arroyo R., Sanchez B.,Vigo J.P., “Effect of talc surface treatment on the mechanical properties of composites based on PP/PELD blend matrices”, Polymer Engineering and Science, v31,**4**, 245-252 (1991).
- Bálsamo, V., “Estudio sobre la miscibilidad y propiedades físicas de Polietilenos Ramificados”, Tesis de Maestría presentada a la Universidad Simón Bolívar (1993).
- Brydson, J., “Plastics Materials”, 124-157, 205-246 (1999).
- Carrasco, F., “The evaluation of kinetic parameters from thermogravimetric data: composition between established methods and the general analytical equation”, Thermochemica Acta,**213**, 115-134 (1993).
- Carrol, B. y Manche, E., “Kinetic análisis of chemical reactions for non-isothermal procedures”, Thermochemica Acta, v3,**6**, 449-459 (1972).
- Chan, CH., Wu, J., Li,J., Cheung, Y., “Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites”, Polymer, v43, 2981-2992 (2002).
- Collar, E., ”Propiedades y ensayos de los materiales plásticos: Parte I Esfuerzos normales”, Revista de plásticos modernos,**475**, 32-41, Mayo (1996).
- Deanin, R. y Sansone, M., “Polyblend of polyethylenes and polypropylene: compatibility and practical properties”, Polymer Preprints, v19,**1**, 211-215 (1978).
- Diaz, B., “Influencia del carbonato de calcio tratado con AA sobre las propiedades mecánicas, térmicas y morfológicas de las mezclas de PP/PEAD y

- PP/PEAD/EPR”, Trabajo de grado presentado a la Universidad Central de Venezuela, Junio (1999).
- Encyclopedia of polymer science and technology, “Plastic, Resins, Rubber, Fibers”, (1971).
- Flory, J., Ellenson, L y Eichinger, B., “Thermodynamics of mixing of n-Alkanes with polyisobutylene”, *Macromolecules*, v1,3, 279-284 (1968).
- Gaylord, N., “Compatibilizing agents: structure and function in polyblends”, *Journal of Macromolecular Science-Chemistry*, A26,8, 1211-1229 (1989).
- Haidar, B., Vuillaume, K., Vidal, A., “Polymer filler interface characteristics: Determinant elements for filler polymer properties”, *Polymer Preprints*, v42,2, 11-12 (2001).
- Han, C.D., Sandford, C., Yoo, H.J., “Effects of titanate coupling agents on the rheological and mechanical properties of filled polyolefins”, *Polymer Engineering and Science*, v18,11, 849-854, August (1978).
- Han, C.D., Van Den Weghe, T., Shete, P., Haw, J.R., “Effects of coupling agents on the rheological properties, processability, and mechanical properties of filled polypropylene”, 241-245 (1981).
- Karger-Kocsis, J., “Polypropylene: Structure, blends and composites, Volume 1 Structure and Morphology”, 65-67 (1995).
- Kim, K., White, J., Dehennau, C. y Choe, S., “Stearic acid and particle shape effects on rheological properties of talc, CaCO₃ and talc/ CaCO₃ filled polypropylene composites”, *Proceedings of the 60th SPE Annual Technical Conference held San Francisco, Ca. paper 313 session T16-Polymer modifiers and additives.* pp.5, May (2002).
- Kovacevic, V., Lucic, S., Hage, D., Cerovecki, Z., “Tensile properties of calcium carbonate-reinforced polyvinyl acetate”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, v10,12, 1273-1285 (1996).
- Laguna C., O., “Materiales compuestos: matrices Refuerzos e Interface”, *Revista de plásticos modernos*,33, 130-134, Julio (1987).

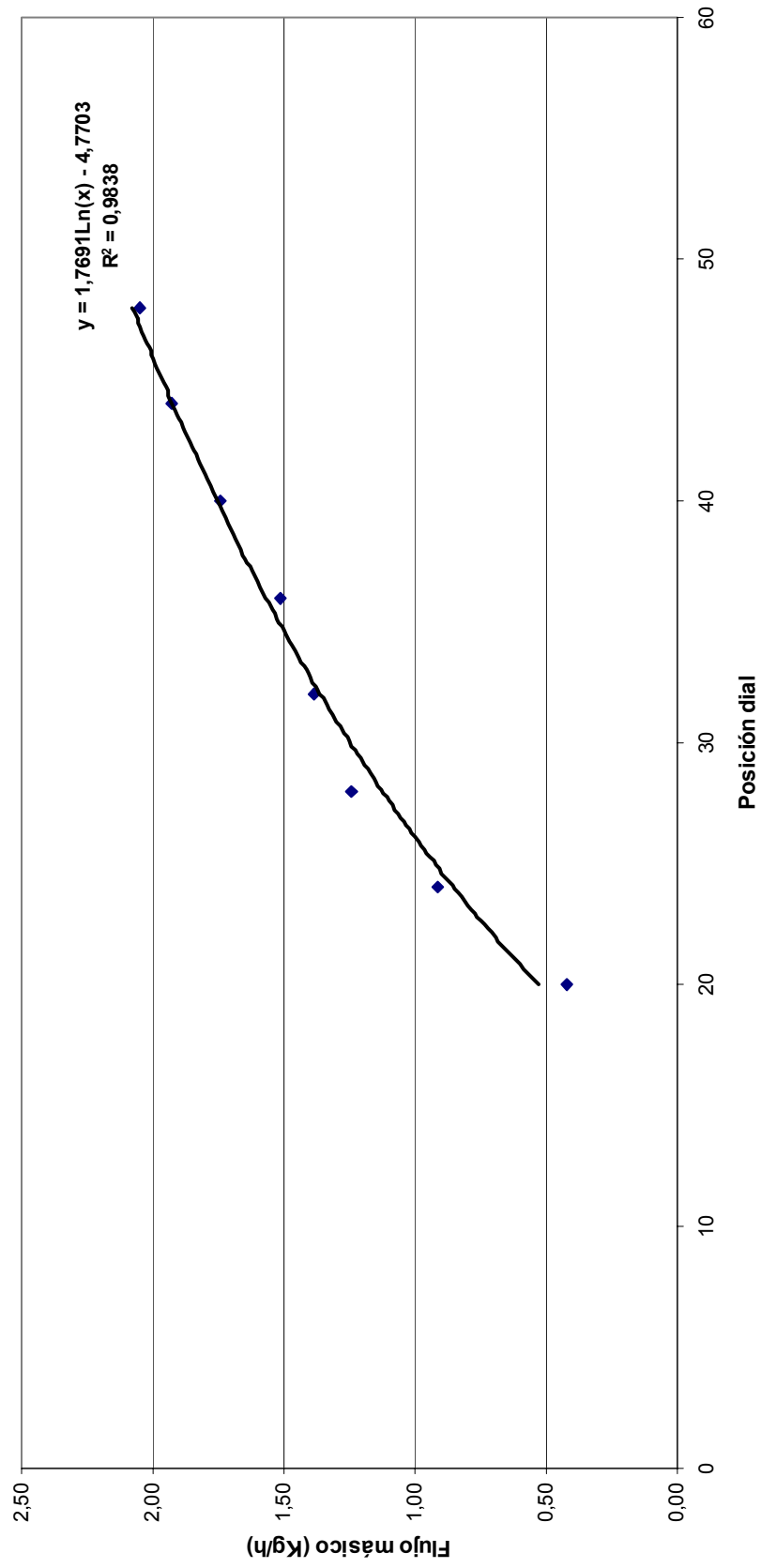
- Liu, N.C., Baker, W. E., "Reactive polymers for blends compatibilization", *Advances in polymer technology*, v11,4, 249 (1992).
- Liu, Z., Kwok, K., Li, R.K.Y., Choy, C.L., "Effects of coupling agents and morphology on the impact strength of high density polyethylene/CaCO₃ composites", *Polymer*, v43,8, 2501-2506 (2002).
- Lovinger, A.J., Williams, M.J., "Tensile properties and morphology by blends of polyethylene and polypropylene", *Journal of Applied Polymer Science*, v25, 1073 (1980).
- Maiti, S.N., Mahapatro, P.K., "Mechanical properties of i-PP/CaCO₃ composites", *Journal of Applied Polymer and Science*, v42, 3101-3110 (1991).
- Manson, A., Sperling, L.H., "Polymer blends and composites", Plenum, New York (1976).
- Martuscelli, E., Prascella, M., Avella, M., Greco, R., Ragosta, G., "Macromolecules Chemical", **181**, 957 (1980).
- Mc. Crum, N., Buckley, C., Bucknall, C., "Principles of polymer engineering", Oxford University Press, 184-295 (1997).
- Mitsuyoshi, F., Kawasaki, Y., "Rheological properties of Polypropylene/High Density Polyethylene blend melts", *Journal of Applied Polymer Science*, v42,2 (1991).
- Mitsubishi, K., Kodama, S., Kawasaki, H., "Mechanical properties of polypropylene filled with calcium carbonate", *Polymer Engineering and Science*, v25,17, 1069-1073 (1985).
- Morales N., R., "Relación morfológica–propiedades reológicas en mezclas PS-Poliiolefinas", Tesis de Maestría presentada a la Universidad Simón Bolívar (1995).
- Morton J., D., "Procesamiento de plásticos", Editorial Limusa, 95-135/177-207, México (1993).
- Nakagana, H., Sno, H., "Improvement of impact resistance of calcium carbonate filled polypropylene and propylene-ethylene block copolymer", *Polymer Preprints*, **26**, 249 (1985).

- Nava, R., "Efectos de la adición de CaCO₃ tratado con AA sobre las propiedades mecánicas de las mezclas de PP con PEAD virgen y reciclado (80/20) compatibilizadas con EPR", Trabajo de grado presentado a la Universidad Central de Venezuela, Noviembre (1997).
- Nielsen, L., "Mechanical properties of polymers and composites", 1-17, New York (1974).
- Noel, O.F., Carley, J.F., "Properties of polyethylene-polypropylene blends", Polymer Engineering and Science, v15,117 (1975).
- Olabisi, O., "Encyclopedia Chemical Technology", 3rd. ed., v18, 443 (1982).
- Paul, D. R., Newman, S., "Polymer blends", Academic New York (1978).
- Plochocki, A. P., Paul, D. R., Newman, S., "Polymer blends", v2, 319-368, Academic Press, New York (1978).
- Premphet, K., Horanont, P., "Improving performance of polypropylene through combined use of calcium carbonate and metallocene-produce impact modifier", Polymer and Plastics-Technology and Engineering, v40,3, 235-247 (2001).
- Pritchard, G., "Plastics Additives", Chapman & Hall, 148-152/189-196/241-259/590-603 (1998).
- Ramos, M., "Caracterización reológica, térmica, espectrocópica y morfológica de mezclas de PP y SBS vulcanizado estáticamente y sin vulcanizar", Trabajo de grado presentado a la Universidad Central de Venezuela (2001).
- Ravanetti, G., Zini, M., "A study on the thermal degradation kinetics of syndiotactic polystyrene by thermogravimetric analysis", Thermochimica Acta, v207, 53-64 (1992).
- Robertson, R., Paul, D., "Stress-Strain behaviour of polyolefin blends", Journal of Applied Polymer Science, v17, 2579-2595 (1973).
- Romero, D., "Modificación de las propiedades de polipropileno con caucho natural", Trabajo de grado presentado a la Universidad Central de Venezuela (2002).
- Rodríguez F.,O., Sanchez V., S., Ramirez V.,R., Yanez F.,I., Lopez Q.,M., "Of thermoplastic/thermoset blends", Antec 97, v11, 2636-2640 (1997).

- Romero, S., Garcia, C. E., "Anales de Química", **58**, 464 (1988).
- Rosales, C., "Guía de Reología", Universidad Simón Bolívar (1994).
- Sanz R., S., "PP el mismo polímero sus nuevas aplicaciones y desarrollos", Revista de plásticos modernos, v75, **502**, 365-376, Abril (1998).
- Seymour, R. B., "Compuestos poliméricos: polímeros cargados", Revista de plásticos modernos, **370**, 501-507, Abril (1987).
- Sharma, Y.N., Patel, R.D., Dhimmar, I.H., Bhardwaj, I.S., "Studies of the effect of titanate coupling agent on the performance of polypropylene-calcium carbonate composite", Journal of Applied Polymer Science, v27, 97-104 (1982).
- Siegmann, A., "Crystalline/Crystalline polymer blends: some structure-property relationships", Journal of Applied Polymer Science, v24, 2333-2345 (1979).
- Slonimskii, I., Musayelyan, V., Kazantseva, V., Ozerov, B., "Mechanical properties of polymer mixtures-II Mixing amorphous with amorphous, and crystalline with crystalline polymers", Polymer Science USSR, v6, **5**, 900-905 (1964).
- Smith, P., Hara, M., Eisemberg, M., "Current Topics in Polymer Science", v11, Ottenbrite, R. M., Utraki, L. A. e Inoue, S. (Eds.), Hanser, **25**, Munich (1987).
- Sundararaj, U., Macosko, CW., "Macromolecules", v32, 3412 (1999).
- Tabtiang, A., Venables, R.A., "Compatibiliser activity and morphology stability during twin-screw extrusion and injection of compatibilised blends", Polymer, v43, 4791-4801 (2002).
- Taylor, D., Paynter, C., "Toughening of Polypropylene by CaCO₃: Effect of particle size and surface coating", Toughening of plastic III, Conference proceedings, 628-638, Septiembre (1994).
- Teh, J.W., Rudin, A., "A review of polyethylene-polypropylene blends and their compatibilization", Advances in Polymer Technology, v13, **1**, 1 (1994).
- Thio, Y., Argon, A., Cohen, R., Weinberg, M., "Toughening Of Isotactic Polypropylene with CaCO₃ Particles", Polymer, **43**, 3661-3674 (2002).

- Tiziano, A., Martinez, J., "Cálculo de los parámetros cinéticos y posibles mecanismos de reacción en la descomposición térmica de polímeros", Trabajo de grado presentado a la Universidad Central de Venezuela, Junio (1999).
- Torres, D., "Estudio de mezclas inmiscibles", Trabajo de grado presentado a la Universidad Simón Bolívar (1993).
- Upadhyay, R. D., "Rheological and optical properties of polypropylene filled with synthetic silicates and calcium carbonate", *Journal of Polymer research*,**3**, 175-181 (2001).
- Utraki, L.A., "Polymer alloys and blends-thermodynamics and rheology", New York (1989).
- Varenes, S., Charlet, G., Delmas, G., "Use of the lower critical solution temperature for the characterization of polymer mixtures and the study of their compatibility application to polyethylenes, polypropylenes, and their copolymers", *Polymer Engineering and Science*, v24,**2**, 98-103 (1984).
- Vollenberg, T. H., Heikens, D., "The mechanical properties of Chalk-filled polypropylene a preliminary investigation", *Journal of materials science*, v25, 3089-3095 (1990).
- Wang, Y., Lee, W., "Interfacial interactions in calcium carbonate-polypropylene composites I. Surface characterization and treatment of calcium carbonate: a comparative study", *Polymer composites*,**24**, 119-131, Febrero (2003).
- Wenig, W., Meyer, K., "Investigation of the crystallization behaviour of polypropylene-polyethylene blends of optical microscopy", *Colloid & Polymer Science*, v254,**9**, 1009-1014 (1980).
- Xanthos, M., "Interfacial agents for multiphase polymer systems: recent advances", *Polymer Engineering and Science*, v28,**21**, 1392-1400 (1988).
- Xanthos, M., Dagli, S., "Compatibilization of polymer blends by reactive processing", *Polymer Engineering and Science*, v31,**13**, 929-935 (1991).
- Young, R. J., Lovell, P.A., "Introduction to polymers", Chapman and Hall, 1-30 (1994).

Apéndice N°1.
Figura N°55. Curva de Calibración tolva de alimentación



APÉNDICE N°2

PROPIEDADES TÉRMICAS

Tabla N°17. Propiedades térmicas de los compuestos según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

Formulación		Tf PP [°C ± 1]	Tf PEAD [°C ± 1]	ΔHf [J/g ± 1]	Tc [°C ± 1]	ΔHc [J/g ± 1]	X (%)
PP	Blanco	161	-	105	111	-102	51
	10 ppc	164	-	99	114	-97	52
	20 ppc	162	-	94	115	-89	53
	30 ppc	164	-	88	115	-83	52
PEAD	Blanco	-	135	194	115	-204	66
	10 ppc	-	135	187	115	-181	70
	20 ppc	-	135	183	116	-178	73
	30 ppc	-	135	184	116	-184	77
PP/PEAD	Blanco	163	132	142	113	-137	64
	10 ppc	165	133	103	115	-104	50
	20 ppc	164	133	107	115	-108	56
	30 ppc	162	132	88	116	-90	49

NOTA: los datos de entalpía de fusión y cristalización están en función de los gramos de muestra.

Figura N°56. Curvas de cristalinidad para el PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

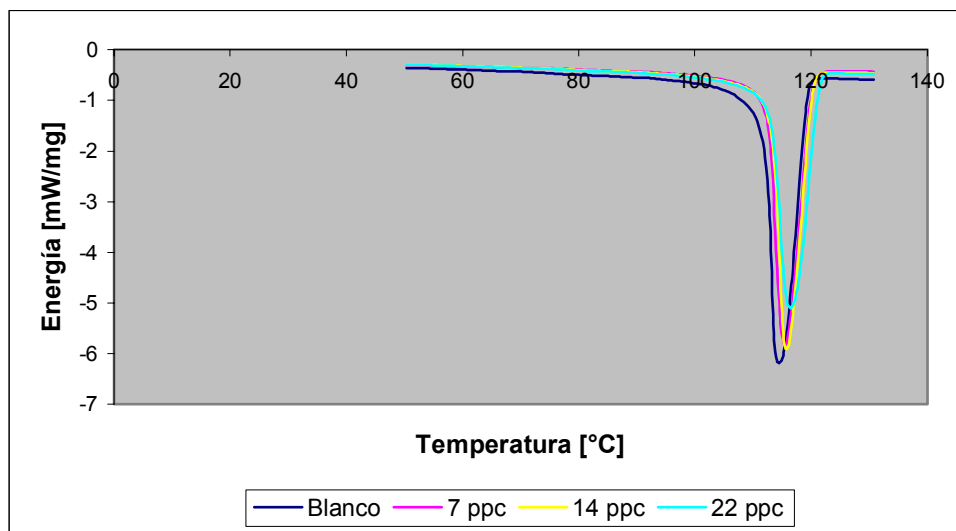


Figura N°57. Curva de cristalinidad para el PP según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

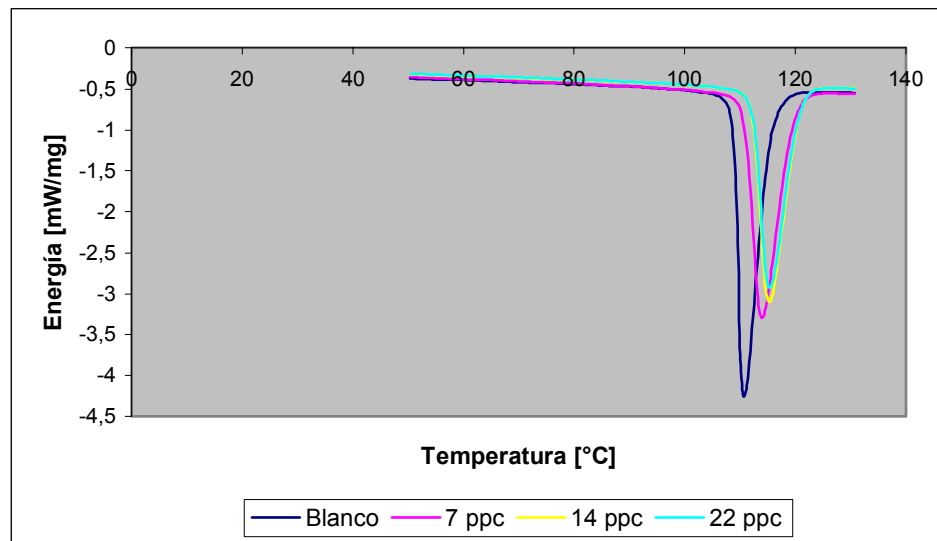


Figura N°58. Curva de cristalinidad para la mezcla PP/PEAD según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

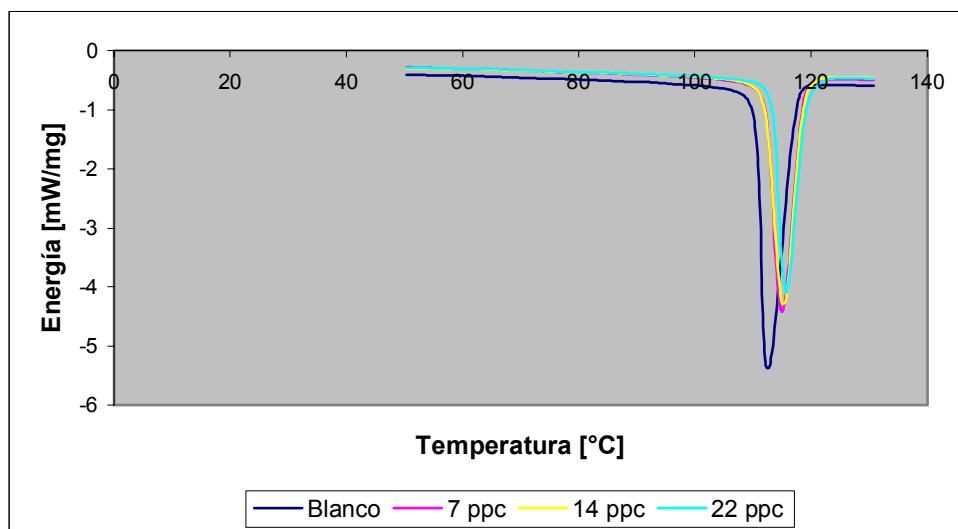


Tabla N°18. Propiedades térmicas de los compuestos con 22 ppc según el porcentaje de aditivo en cada formulación.

Formulación	Tf PP [°C ± 1]	Tf PEAD [°C ± 1]	ΔHf [J/g ± 1]	Tc [°C ± 1]	ΔHc [J/g ± 1]	X (%)	
PP	0%	164	-	88	115	-83	52
	0,3%	162	-	83	115	-80	49
	0,5%	163	-	72	114	-71	43
	0,7%	162	-	82	114	-79	49
	1%	162	-	91	114	-86	54
	Polybond	164	-	85	120	-84	51
PEAD	0%	-	135	184	116	-184	77
	0,3%	-	135	173	116	-172	73
	0,5%	-	135	189	116	-185	79
	0,7%	-	135	186	115	-182	78
	1%	-	135	180	115	-174	76
PP/PEAD	0%	162	132	88	116	-90	49
	0,3%	163	132	103	115	-95	57
	0,5%	163	132	109	114	-101	60
	0,7%	163	132	96	115	-93	53
	1%	163	132	106	114	-105	58
	Polybond	163	132	104	120	-98	57

NOTA: los datos de entalpía de fusión y cristalización están en función de los gramos de muestra.

Figura N°59. Curva de cristalinidad para el PEAD según el porcentaje de aditivo en cada formulación.

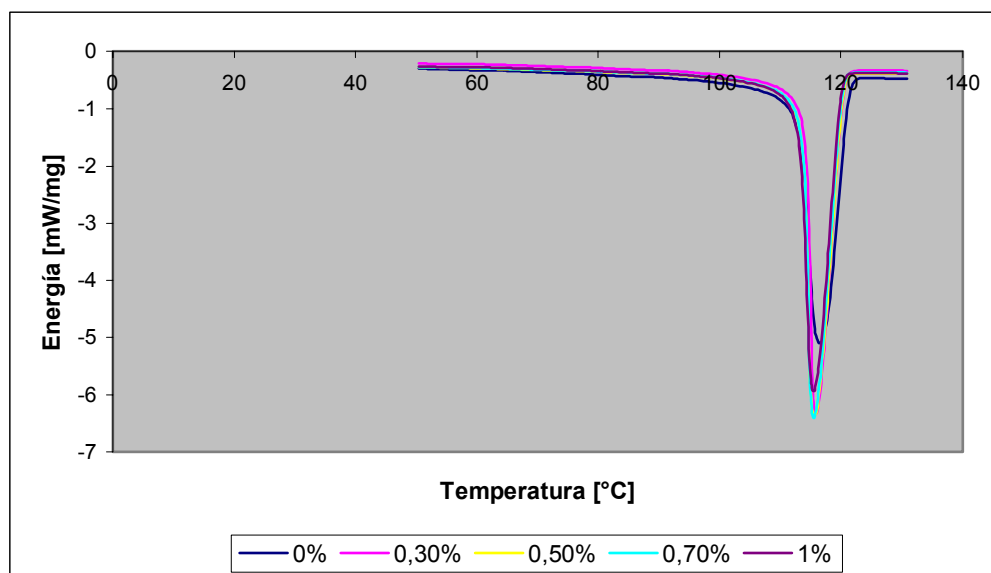


Figura N°60. Curva de cristalinidad para el PP según el porcentaje de aditivo en cada formulación.

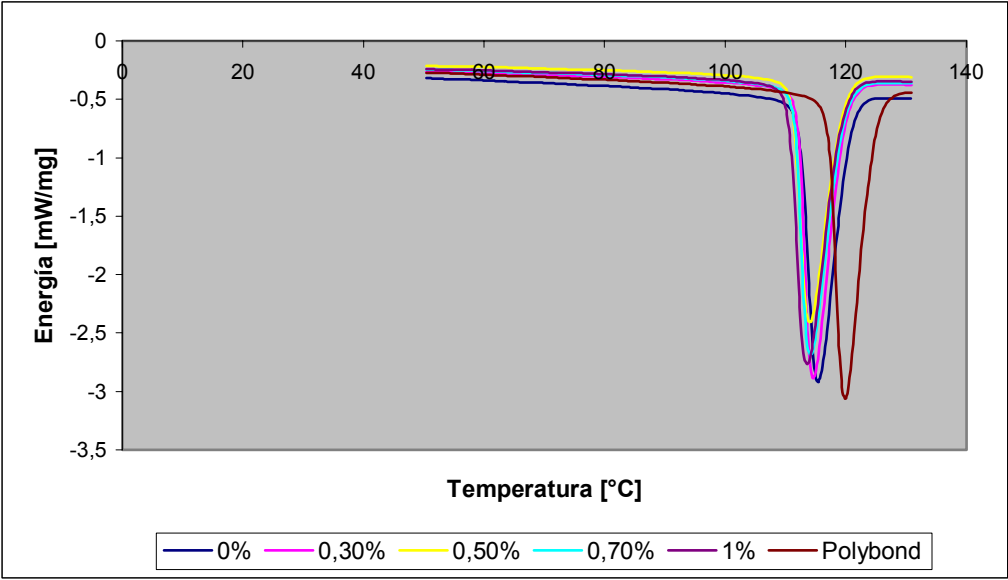


Figura N°61. Curva de cristalinidad para la mezcla PP/PEAD según el porcentaje de aditivo en cada formulación.

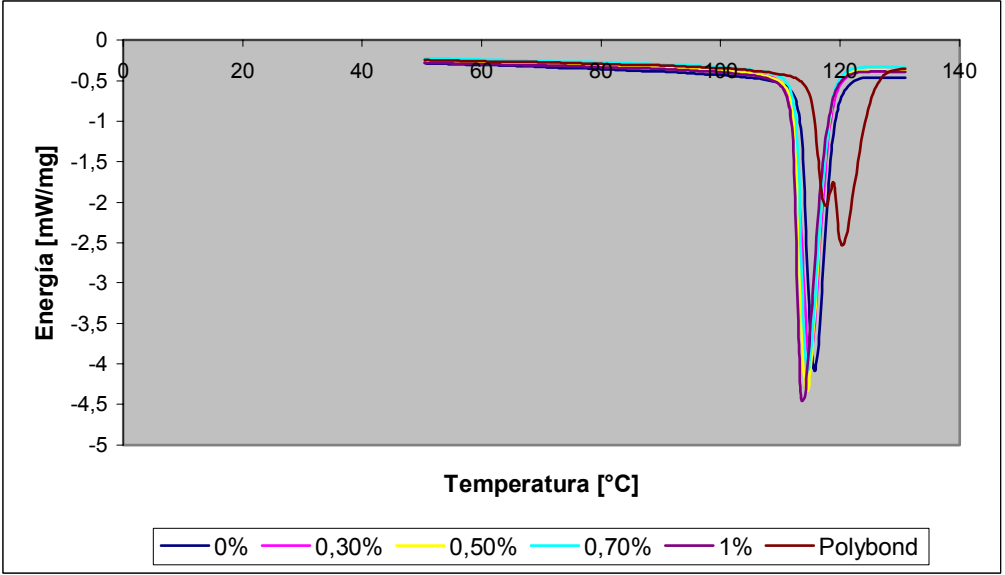
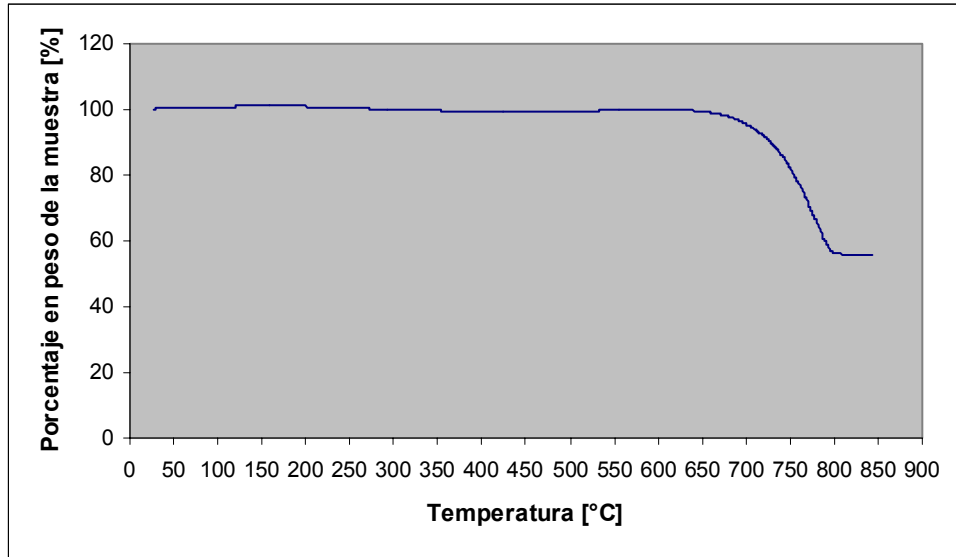


Figura N°62. Resultado del análisis termogravimétrico de la carga (*bivalvos*).



APENDICE N°3. PROPIEDADES REOLÓGICAS

Donde:

V: Velocidad del reómetro (mm/s)

Q: Caudal (m³/s)

P: Presión (Pa)

$\gamma\dot{\alpha}$: Velocidad de Deformación (1/s)

τ_w : Esfuerzo (Pa)

$\gamma\dot{c}$: Velocidad de Deformación corregida (1/s)

μ : Viscosidad (Pa s)

Tabla N°19. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para la mezcla PP/PEAD/Conchas.

Del saco										
V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	$\gamma\dot{\alpha}$ (1/s)	τ_w (Pa)	$\gamma\dot{c}$	μ		
0,02	0,00002	2,26E-09	255	1758225	23,04	14651,875	31,24	468,90		
0,05	0,00005	5,65E-09	425	2930375	57,6	24419,792	78,11	312,60		
0,06	0,00006	6,79E-09	475	3275125	69,12	27292,708	93,74	291,14		
0,075	0,000075	8,48E-09	540	3723300	86,4	31027,5	117,17	264,79		
0,09	0,00009	1,02E-08	600	4137000	103,68	34475	140,61	245,17		
0,1	0,0001	1,13E-08	645	4447275	115,2	37060,625	156,23	237,210		
0,2	0,0002	2,26E-08	905	6239975	230,4	51999,792	312,47	166,41		
0,3	0,0003	3,39E-08	1075	7412125	345,6	61767,708	468,70	131,78		
0,35	0,00035	3,96E-08	1160	7998200	403,2	66651,667	546,82	121,88		
0,4	0,0004	4,52E-08	1220	8411900	460,8	70099,167	624,94	112,16		
0,5	0,0005	5,65E-08	1390	9584050	576	79867,083	781,17	102,23		

Blanco

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	235	1620325	23,04	13503	27,54	490,16
0,05	0,000050	5,65E-09	365	2516675	57,60	20972	68,86	304,52
0,06	0,000060	6,79E-09	395	2723525	69,12	22696	82,64	274,63
0,075	0,000075	8,48E-09	515	3550925	86,40	29591	103,30	286,44
0,09	0,000090	1,02E-08	565	3895675	103,68	32464	123,96	261,88
0,1	0,000100	1,13E-08	595	4102525	115,20	34188	137,73	248,21
0,2	0,000200	2,26E-08	860	5929700	230,40	49414	275,47	179,37
0,3	0,000300	3,39E-08	1060	7308700	345,60	60906	413,21	147,39
0,35	0,000350	3,96E-08	1150	7929250	403,20	66077	482,07	137,06
0,4	0,000400	4,52E-08	1215	8377425	460,80	69812	550,94	126,712
0,5	0,000500	5,65E-08	1360	9377200	576,00	78143	688,68	113,46

7 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	245	1689275	23,04	14077	28,27	497,80
0,05	0,000050	5,65E-09	435	2999325	57,60	24994	70,69	353,54
0,06	0,000060	6,79E-09	485	3344075	69,12	27867	84,83	328,48
0,075	0,000075	8,48E-09	555	3826725	86,40	31889	106,04	300,71
0,09	0,000090	1,02E-08	635	4378325	103,68	36486	127,25	286,71
0,1	0,000100	1,13E-08	680	4688600	115,20	39072	141,39	276,33
0,2	0,000200	2,26E-08	940	6481300	230,40	54011	282,78	190,99
0,3	0,000300	3,39E-08	1155	7963725	345,60	66364	424,17	156,45
0,35	0,000350	3,96E-08	1245	8584275	403,20	71536	494,87	144,55
0,4	0,000400	4,52E-08	1325	9135875	460,80	76132	565,57	134,610
0,5	0,000500	5,65E-08	1485	10239075	576,00	85326	706,96	120,69

14 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	280	1930600	23,04	16088	29,26	549,74
0,05	0,000050	5,65E-09	490	3378550	57,60	28155	73,16	384,82
0,06	0,000060	6,79E-09	540	3723300	69,12	31028	87,795	353,40
0,075	0,000075	8,48E-09	620	4274900	86,40	35624	109,74	324,61
0,09	0,000090	1,02E-08	705	4860975	103,68	40508	131,69	307,59
0,1	0,000100	1,13E-08	755	5205725	115,20	43381	146,32	296,47
0,2	0,000200	2,26E-08	1040	7170800	230,40	59757	292,65	204,19
0,3	0,000300	3,39E-08	1205	8308475	345,60	69237	438,97	157,72
0,35	0,000350	3,96E-08	1285	8860075	403,20	73834	512,13	144,16
0,4	0,000400	4,52E-08	1365	9411675	460,80	78431	585,30	134,00
0,5	0,000500	5,65E-08	1525	10514875	576,00	87624	731,62	119,76

22 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	290	1999550	23,04	16663	29,18329	570,97
0,05	0,000050	5,65E-09	495	3413025	57,60	28442	72,95821	389,83
0,06	0,000060	6,79E-09	540	3723300	69,12	31028	87,54986	354,39
0,075	0,000075	8,48E-09	625	4309375	86,40	35911	109,43732	328,14
0,09	0,000090	1,02E-08	690	4757550	103,68	39646	131,32479	301,89
0,1	0,000100	1,13E-08	755	5205725	115,20	43381	145,91643	297,30
0,2	0,000200	2,26E-08	1040	7170800	230,40	59757	291,83286	204,76
0,3	0,000300	3,39E-08	1220	8411900	345,60	70099	437,74929	160,13
0,35	0,000350	3,96E-08	1305	8997975	403,20	74983	510,70750	146,82
0,4	0,000400	4,52E-08	1370	9446150	460,80	78718	583,66572	134,86
0,5	0,000500	5,65E-08	1530	10549350	576,00	87911	729,58215	120,49

Tabla N°20. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PP/Conchas.

Del saco										
V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ		
0,02	0,00002	2,26E-09	270	1861650	23,04	15513,75	32,11	483,02		
0,05	0,00005	5,65E-09	470	3240650	57,6	27005,417	80,29	336,33		
0,06	0,00006	6,79E-09	525	3619875	69,12	30165,625	96,35	313,07		
0,075	0,000075	8,48E-09	600	4137000	86,4	34475	120,44	286,23		
0,09	0,00009	1,02E-08	670	4619650	103,68	38497,083	144,52	266,36		
0,1	0,0001	1,13E-08	710	4895450	115,2	40795,417	160,58	254,03		
0,2	0,0002	2,26E-08	925	6377875	230,4	53148,958	321,17	165,48		
0,3	0,0003	3,39E-08	1085	7481075	345,6	62342,292	481,76	129,40		
0,35	0,00035	3,96E-08	1165	8032675	403,2	66938,958	562,05	119,09		
0,4	0,0004	4,52E-08	1235	8515325	460,8	70961,042	642,35	110,47		
0,5	0,0005	5,65E-08	1380	9515100	576	79292,5	802,94	98,75		

Bianco										
V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ		
0,02	0,000020	2,26E-09	300	2068500	23,04	17238	30,56	564,03		
0,05	0,000050	5,65E-09	495	3413025	57,60	28442	76,40	372,26		
0,06	0,000060	6,79E-09	530	3654350	69,12	30453	91,68	332,15		
0,075	0,000075	8,48E-09	610	4205950	86,40	35050	114,60	305,83		
0,09	0,000090	1,02E-08	660	4550700	103,68	37923	137,52	275,75		
0,1	0,000100	1,13E-08	695	4792025	115,20	39934	152,80	261,33		
0,2	0,000200	2,26E-08	940	6481300	230,40	54011	305,61	176,73		
0,3	0,000300	3,39E-08	1100	7584500	345,60	63204	458,41	137,87		
0,35	0,000350	3,96E-08	1155	7963725	403,20	66364	534,81	124,08		
0,4	0,000400	4,52E-08	1220	8411900	460,80	70099	611,22	114,68		
0,5	0,000500	5,65E-08	1370	9446150	576,00	78718	764,02	103,03		

7 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	270	1861650	23,04	15514	30,37	510,70
0,05	0,000050	5,65E-09	505	3481975	57,60	29016	75,94	382,08
0,06	0,000060	6,79E-09	560	3861200	69,12	32177	91,13	353,08
0,075	0,000075	8,48E-09	610	4205950	86,40	35050	113,91	307,68
0,09	0,000090	1,02E-08	700	4826500	103,68	40221	136,69	294,23
0,1	0,000100	1,13E-08	760	5240200	115,20	43668	151,88	287,51
0,2	0,000200	2,26E-08	1030	7101850	230,40	59182	303,76	194,82
0,3	0,000300	3,39E-08	1145	7894775	345,60	65790	455,65	144,38
0,35	0,000350	3,96E-08	1225	8446375	403,20	70386	531,5	132,40
0,4	0,000400	4,52E-08	1280	8825600	460,80	73547	607,53	121,05
0,5	0,000500	5,65E-08	1425	9825375	576,00	81878	759,42	107,81

14 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	330	2275350	23,04	18961	30,43	623,09
0,05	0,000050	5,65E-09	520	3585400	57,60	29878	76,07	392,73
0,06	0,000060	6,79E-09	570	3930150	69,12	32751	91,29	358,75
0,075	0,000075	8,48E-09	660	4550700	86,40	37923	114,11	332,318
0,09	0,000090	1,02E-08	725	4998875	103,68	41657	136,93	304,20
0,1	0,000100	1,13E-08	770	5309150	115,20	44243	152,15	290,77
0,2	0,000200	2,26E-08	1025	7067375	230,40	58895	304,30	193,53
0,3	0,000300	3,39E-08	1195	8239525	345,60	68663	456,46	150,42
0,35	0,000350	3,96E-08	1265	8722175	403,20	72685	532,53	136,48
0,4	0,000400	4,52E-08	1330	9170350	460,80	76420	608,61	125,56
0,5	0,000500	5,65E-08	1465	10101175	576,00	84176	760,76	110,64

22 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	350	2413250	23,04	20110	31,27	643,10
0,05	0,000050	5,65E-09	585	4033575	57,60	33613	78,17	429,96
0,06	0,000060	6,79E-09	605	4171475	69,12	34762	93,81	370,55
0,075	0,000075	8,48E-09	700	4826500	86,40	40221	117,26	342,98
0,09	0,000090	1,02E-08	755	5205725	103,68	43381	140,71	308,28
0,1	0,000100	1,13E-08	805	5550475	115,20	46254	156,35	295,82
0,2	0,000200	2,26E-08	1060	7308700	230,40	60906	312,70	194,76
0,3	0,000300	3,39E-08	1230	8480850	345,60	70674	469,06	150,67
0,35	0,000350	3,96E-08	1300	8963500	403,20	74696	547,23	136,49
0,4	0,000400	4,52E-08	1365	9411675	460,80	78431	625,41	125,40
0,5	0,000500	5,65E-08	1500	10342500	576,00	86188	781,76	110,24

Tabla N°21. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PEAD/Conchas.

Del saco

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,05	0,00005	5,65E-09	515	2723525	57,6	22696,04	63,25	358,79
0,06	0,00006	6,79E-09	560	3033800	69,12	25281,67	75,90	333,06
0,07	0,000075	8,48E-09	635	3516450	86,4	29303,75	94,88	308,83
0,09	0,00009	1,02E-08	770	4171475	103,68	34762,29	113,86	305,30
0,1	0,0001	1,13E-08	845	4619650	115,2	38497,08	126,51	304,29
0,2	0,0002	2,26E-08	1390	7722400	230,4	64353,33	253,02	254,33
0,3	0,0003	3,39E-08	1820	10514875	345,6	87623,95	379,53	230,87
0,4	0,0004	4,52E-08	2190	13169450	460,8	109745,42	506,04	216,86
0,5	0,0005	5,65E-08	2595	15237950	576	126982,92	632,55	200,74

Blanco

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	250	1723750	23,04	14365	26,52	541,4
0,05	0,000050	5,65E-09	505	3481975	57,60	29016	66,32	437,51
0,06	0,000060	6,79E-09	560	3861200	69,12	32177	79,58	404,30
0,075	0,000075	8,48E-09	665	4585175	86,40	38210	99,48	384,08
0,09	0,000090	1,02E-08	755	5205725	103,68	43381	119,378	363,39
0,1	0,000100	1,13E-08	820	5653900	115,20	47116	132,64	355,20
0,2	0,000200	2,26E-08	1260	8687700	230,40	72398	265,28	272,90
0,3	0,000300	3,39E-08	1540	10618300	345,60	88486	397,92	222,36
0,35	0,000350	3,96E-08	1680	11583600	403,20	96530	464,24	207,92
0,4	0,000400	4,52E-08	1880	12962600	460,80	108022	530,57	203,59
0,5	0,000500	5,65E-08	2170	14962150	576,00	124685	663,21	188,00

7 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	250	1723750	23,04	14365	25,38	565,87
0,05	0,000050	5,65E-09	525	3619875	57,60	30166	63,46	475,33
0,06	0,000060	6,79E-09	600	4137000	69,12	34475	76,15	452,70
0,075	0,000075	8,48E-09	715	4929925	86,40	41083	95,19	431,57
0,09	0,000090	1,02E-08	790	5447050	103,68	45392	114,23	397,37
0,1	0,000100	1,13E-08	890	6136550	115,20	51138	126,92	402,90
0,2	0,000200	2,26E-08	1465	10101175	230,40	84176	253,84	331,60
0,3	0,000300	3,39E-08	1900	13100500	345,60	109171	380,77	286,71
0,35	0,000350	3,96E-08	2130	14686350	403,20	122386	444,23	275,50
0,4	0,000400	4,52E-08	2290	15789550	460,80	131580	507,69	259,17
0,5	0,000500	5,65E-08	2700	18616500	576,00	155138	634,61	244,45

14 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	260	1792700	23,04	14939	25,25	591,51
0,05	0,000050	5,65E-09	555	3826725	57,60	31889	63,13	505,06
0,06	0,000060	6,79E-09	610	4205950	69,12	35050	75,76	462,59
0,075	0,000075	8,48E-09	725	4998875	86,40	41657	94,70	439,84
0,09	0,000090	1,02E-08	845	5826275	103,68	48552	113,65	427,20
0,1	0,000100	1,13E-08	940	6481300	115,20	54011	126,27	427,71
0,2	0,000200	2,26E-08	1555	10721725	230,40	89348	252,55	353,77
0,3	0,000300	3,39E-08	2025	13962375	345,60	116353	378,83	307,13
0,35	0,000350	3,96E-08	2235	15410325	403,20	128419	441,97	290,55
0,4	0,000400	4,52E-08	2430	16754850	460,80	139624	505,11	276,42
0,5	0,000500	5,65E-08	2880	19857600	576,00	165480	631,39	262,08

22 ppc

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	270	1861650	23,04	15514	25,31	612,81
0,05	0,000050	5,65E-09	565	3895675	57,60	32464	63,28	512,94
0,06	0,000060	6,79E-09	650	4481750	69,12	37348	75,94	491,76
0,075	0,000075	8,48E-09	790	5447050	86,40	45392	94,93	478,14
0,09	0,000090	1,02E-08	915	6308925	103,68	52574	113,92	461,49
0,1	0,000100	1,13E-08	1005	6929475	115,20	57746	126,57	456,20
0,2	0,000200	2,26E-08	1645	11342275	230,40	94519	253,15	373,36
0,3	0,000300	3,39E-08	2120	14617400	345,60	121812	379,73	320,78
0,35	0,000350	3,96E-08	2340	16134300	403,20	134453	443,02	303,48
0,4	0,000400	4,52E-08	2555	17616725	460,80	146806	506,31	289,95
0,5	0,000500	5,65E-08	3015	20788425	576,00	173237	632,89	273,72

Tabla N°22. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para la mezcla PP/PEAD/Conchas/Aditivos.

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	290	1999550	23,04	16663	29,18	570,97
0,05	0,000050	5,65E-09	495	3413025	57,60	28442	72,95	389,83
0,06	0,000060	6,79E-09	540	3723300	69,12	31028	87,54	354,39
0,075	0,000075	8,48E-09	625	4309375	86,40	35911	109,43	328,14
0,09	0,000090	1,02E-08	690	4757550	103,68	39646	131,32	301,89
0,1	0,000100	1,13E-08	755	5205725	115,20	43381	145,91	297,30
0,2	0,000200	2,26E-08	1040	7170800	230,40	59757	291,83	204,76
0,3	0,000300	3,39E-08	1220	8411900	345,60	70099	437,74	160,13
0,35	0,000350	3,96E-08	1305	8997975	403,20	74983	510,70	146,82
0,4	0,000400	4,52E-08	1370	9446150	460,80	78718	583,66	134,86
0,5	0,000500	5,65E-08	1530	10549350	576,00	87911	729,58	120,49

0,30%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	355	2447725	23,04	20398	30,60	666,43
0,05	0,000050	5,65E-09	585	4033575	57,60	33613	76,51	439,28
0,06	0,000060	6,79E-09	625	4309375	69,12	35911	91,82	391,10
0,075	0,000075	8,48E-09	670	4619650	86,40	38497	114,77	335,40
0,09	0,000090	1,02E-08	730	5033350	103,68	41945	137,73	304,53
0,1	0,000100	1,13E-08	780	5378100	115,20	44818	153,03	292,85
0,2	0,000200	2,26E-08	1085	7481075	230,40	62342	306,07	203,68
0,3	0,000300	3,39E-08	1255	8653225	345,60	72110	459,10	157,06
0,35	0,000350	3,96E-08	1335	9204825	403,20	76707	535,62	143,20
0,4	0,000400	4,52E-08	1400	9653000	460,80	80442	612,14	131,40
0,5	0,000500	5,65E-08	1550	10687250	576,00	89060	765,17	116,39

0,50%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	250	1723750	23,04	14365	31,11	461,69
0,05	0,000050	5,65E-09	600	4137000	57,60	34475	77,78	443,22
0,06	0,000060	6,79E-09	650	4481750	69,12	37348	93,33	400,13
0,075	0,000075	8,48E-09	700	4826500	86,40	40221	116,67	344,73
0,09	0,000090	1,02E-08	760	5240200	103,68	43668	140,00	311,89
0,1	0,000100	1,13E-08	810	5584950	115,20	46541	155,56	299,17
0,2	0,000200	2,26E-08	1090	7515550	230,40	62630	311,12	201,29
0,3	0,000300	3,39E-08	1270	8756650	345,60	72972	466,69	156,35
0,35	0,000350	3,96E-08	1340	9239300	403,20	76994	544,47	141,40
0,4	0,000400	4,52E-08	1420	9790900	460,80	81591	622,25	131,12
0,5	0,000500	5,65E-08	1560	10756200	576,00	89635	777,82	115,23

0,70%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	350	2413250	23,04	20110	31,09	646,78
0,05	0,000050	5,65E-09	610	4205950	57,60	35050	77,73	450,90
0,06	0,000060	6,79E-09	640	4412800	69,12	36773	93,27	394,23
0,075	0,000075	8,48E-09	720	4964400	86,40	41370	116,59	354,80
0,09	0,000090	1,02E-08	770	5309150	103,68	44243	139,91	316,20
0,1	0,000100	1,13E-08	820	5653900	115,20	47116	155,46	303,06
0,2	0,000200	2,26E-08	1100	7584500	230,40	63204	310,92	203,27
0,3	0,000300	3,39E-08	1280	8825600	345,60	73547	466,39	157,69
0,35	0,000350	3,96E-08	1360	9377200	403,20	78143	544,12	143,61
0,4	0,000400	4,52E-08	1430	9859850	460,80	82165	621,85	132,12
0,5	0,000500	5,65E-08	1580	10894100	576,00	90784	777,32	116,79

1%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	455	3137225	23,04	26144	31,24	836,67
0,05	0,000050	5,65E-09	605	4171475	57,60	34762	78,11	444,99
0,06	0,000060	6,79E-09	650	4481750	69,12	37348	93,74	398,41
0,075	0,000075	8,48E-09	710	4895450	86,40	40795	117,17	348,15
0,09	0,000090	1,02E-08	770	5309150	103,68	44243	140,61	314,64
0,1	0,000100	1,13E-08	810	5584950	115,20	46541	156,23	297,89
0,2	0,000200	2,26E-08	1095	7550025	230,40	62917	312,47	201,35
0,3	0,000300	3,39E-08	1275	8791125	345,60	73259	468,70	156,30
0,35	0,000350	3,96E-08	1345	9273775	403,20	77281	546,82	141,32
0,4	0,000400	4,52E-08	1405	9687475	460,80	80729	624,94	129,17
0,5	0,000500	5,65E-08	1565	10790675	576,00	89922	781,17	115,11

Polybond

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	360	2482200	23,04	20685	31,24	661,98
0,05	0,000050	5,65E-09	595	4102525	57,60	34188	78,11	437,64
0,06	0,000060	6,79E-09	625	4309375	69,12	35911	93,74	383,09
0,075	0,000075	8,48E-09	685	4723075	86,40	39359	117,17	335,89
0,09	0,000090	1,02E-08	750	5171250	103,68	43094	140,61	306,47
0,1	0,000100	1,13E-08	800	5516000	115,20	45967	156,23	294,21
0,2	0,000200	2,26E-08	1080	7446600	230,40	62055	312,47	198,59
0,3	0,000300	3,39E-08	1230	8480850	345,60	70674	468,70	150,78
0,35	0,000350	3,96E-08	1305	8997975	403,20	74983	546,82	137,12
0,4	0,000400	4,52E-08	1390	9584050	460,80	79867	624,94	127,79
0,5	0,000500	5,65E-08	1545	10652775	576,00	88773	781,17	113,64

Tabla N°23. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PP/Conchas/Aditivos.

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	$\dot{\gamma}_c$	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	350	2413250	23,04	20110	31,27	643,10
0,05	0,000050	5,65E-09	585	4033575	57,60	33613	78,17	429,96
0,06	0,000060	6,79E-09	605	4171475	69,12	34762	93,81	370,55
0,075	0,000075	8,48E-09	700	4826500	86,40	40221	117,26	342,98
0,09	0,000090	1,02E-08	755	5205725	103,68	43381	140,71	308,28
0,1	0,000100	1,13E-08	805	5550475	115,20	46254	156,35	295,82
0,2	0,000200	2,26E-08	1060	7308700	230,40	60906	312,70	194,769
0,3	0,000300	3,39E-08	1230	8480850	345,60	70674	469,06	150,67
0,35	0,000350	3,96E-08	1300	8963500	403,20	74696	547,23	136,49
0,4	0,000400	4,52E-08	1365	9411675	460,80	78431	625,41	125,40
0,5	0,000500	5,65E-08	1500	10342500	576,00	86188	781,76	110,24

0,30%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	$\dot{\gamma}_c$	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	460	3171700	23,04	26431	31,59	836,66
0,05	0,000050	5,65E-09	585	4033575	57,60	33613	78,97	425,60
0,06	0,000060	6,79E-09	640	4412800	69,12	36773	94,77	388,02
0,075	0,000075	8,48E-09	680	4688600	86,40	39072	118,46	329,817
0,09	0,000090	1,02E-08	760	5240200	103,68	43668	142,15	307,18
0,1	0,000100	1,13E-08	795	5481525	115,20	45679	157,95	289,19
0,2	0,000200	2,26E-08	1030	7101850	230,40	59182	315,90	187,34
0,3	0,000300	3,39E-08	1220	8411900	345,60	70099	473,85	147,93
0,35	0,000350	3,96E-08	1295	8929025	403,20	74409	552,83	134,59
0,4	0,000400	4,52E-08	1350	9308250	460,80	77569	631,81	122,77
0,5	0,000500	5,65E-08	1495	10308025	576,00	85900	789,76	108,76

0,50%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	430	2964850	23,04	24707	32,21	766,87
0,05	0,000050	5,65E-09	610	4205950	57,60	35050	80,54	435,15
0,06	0,000060	6,79E-09	660	4550700	69,12	37923	96,65	392,35
0,075	0,000075	8,48E-09	700	4826500	86,40	40221	120,81	332,90
0,09	0,000090	1,02E-08	755	5205725	103,68	43381	144,97	299,22
0,1	0,000100	1,13E-08	800	5516000	115,20	45967	161,08	285,34
0,2	0,000200	2,26E-08	1040	7170800	230,40	59757	322,17	185,47
0,3	0,000300	3,39E-08	1205	8308475	345,60	69237	483,26	143,26
0,35	0,000350	3,96E-08	1280	8825600	403,20	73547	563,81	130,44
0,4	0,000400	4,52E-08	1350	9308250	460,80	77569	644,35	120,38
0,5	0,000500	5,65E-08	1495	10308025	576,00	85900	805,44	106,64

0,70%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	285	1965075	23,04	16376	31,00	528,23
0,05	0,000050	5,65E-09	565	3895675	57,60	32464	77,50	418,87
0,06	0,000060	6,79E-09	600	4137000	69,12	34475	93,00	370,68
0,075	0,000075	8,48E-09	670	4619650	86,40	38497	116,25	331,14
0,09	0,000090	1,02E-08	735	5067825	103,68	42232	139,50	302,72
0,1	0,000100	1,13E-08	780	5378100	115,20	44818	155,00	289,13
0,2	0,000200	2,26E-08	1050	7239750	230,40	60331	310,00	194,61
0,3	0,000300	3,39E-08	1190	8205050	345,60	68375	465,01	147,04
0,35	0,000350	3,96E-08	1280	8825600	403,20	73547	542,51	135,56
0,4	0,000400	4,52E-08	1350	9308250	460,80	77569	620,01	125,10
0,5	0,000500	5,65E-08	1490	10273550	576,00	85613	775,02	110,46

1%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	350	2413250	23,04	20110	32,11	626,14
0,05	0,000050	5,65E-09	595	4102525	57,60	34188	80,29	425,78
0,06	0,000060	6,79E-09	645	4447275	69,12	37061	96,35	384,63
0,075	0,000075	8,48E-09	725	4998875	86,40	41657	120,44	345,87
0,09	0,000090	1,02E-08	785	5412575	103,68	45105	144,52	312,07
0,1	0,000100	1,13E-08	820	5653900	115,20	47116	160,58	293,39
0,2	0,000200	2,26E-08	1075	7412125	230,40	61768	321,17	192,31
0,3	0,000300	3,39E-08	1225	8446375	345,60	70386	481,76	146,10
0,35	0,000350	3,96E-08	1290	8894550	403,20	74121	562,05	131,87
0,4	0,000400	4,52E-08	1350	9308250	460,80	77569	642,35	120,75
0,5	0,000500	5,65E-08	1495	10308025	576,00	85900	802,94	106,98

Polybond

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	220	1516900	23,04	12641	32,11	393,57
0,05	0,000050	5,65E-09	610	4205950	57,60	35050	80,29	436,51
0,06	0,000060	6,79E-09	675	4654125	69,12	38784	96,35	402,52
0,075	0,000075	8,48E-09	720	4964400	86,40	41370	120,44	343,48
0,09	0,000090	1,02E-08	785	5412575	103,68	45105	144,52	312,07
0,1	0,000100	1,13E-08	825	5688375	115,20	47403	160,58	295,18
0,2	0,000200	2,26E-08	1070	7377650	230,40	61480	321,17	191,42
0,3	0,000300	3,39E-08	1220	8411900	345,60	70099	481,76	145,50
0,35	0,000350	3,96E-08	1295	8929025	403,20	74409	562,05	132,38
0,4	0,000400	4,52E-08	1380	9515100	460,80	79293	642,35	123,44
0,5	0,000500	5,65E-08	1525	10514875	576,00	87624	802,94	109,12

Tabla N°24. Cálculos de reometría capilar para determinar la velocidad de deformación y la viscosidad para el PEAD/Conchas/Aditivos.

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	$\dot{\gamma}_c$	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	270	1861650	23,04	15514	25,31	612,81
0,05	0,000050	5,65E-09	565	3895675	57,60	32464	63,28	512,94
0,06	0,000060	6,79E-09	650	4481750	69,12	37348	75,94	491,76
0,075	0,000075	8,48E-09	790	5447050	86,40	45392	94,93	478,14
0,09	0,000090	1,02E-08	915	6308925	103,68	52574	113,92	461,49
0,1	0,000100	1,13E-08	1005	6929475	115,20	57746	126,57	456,20
0,2	0,000200	2,26E-08	1645	11342275	230,40	94519	253,15	373,36
0,3	0,000300	3,39E-08	2120	14617400	345,60	121812	379,73	320,78
0,35	0,000350	3,96E-08	2340	16134300	403,20	134453	443,02	303,48
0,4	0,000400	4,52E-08	2555	17616725	460,80	146806	506,31	289,95
0,5	0,000500	5,65E-08	3015	20788425	576,00	173237	632,89	273,72

0,30%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	P (psi)	P (Pa)	$\dot{\gamma}_a$ (1/s)	τ_w (Pa)	$\dot{\gamma}_c$	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	375	2585625	23,04	21547	25,78	835,73
0,05	0,000050	5,65E-09	675	4654125	57,60	38784	64,45	601,73
0,06	0,000060	6,79E-09	730	5033350	69,12	41945	77,34	542,30
0,075	0,000075	8,48E-09	840	5791800	86,40	48265	96,68	499,21
0,09	0,000090	1,02E-08	980	6757100	103,68	56309	116,01	485,34
0,1	0,000100	1,13E-08	1065	7343175	115,20	61193	128,90	474,69
0,2	0,000200	2,26E-08	1700	11721500	230,40	97679	257,81	378,86
0,3	0,000300	3,39E-08	2210	15237950	345,60	126983	386,72	328,35
0,35	0,000350	3,96E-08	2450	16892750	403,20	140773	451,18	312,00
0,4	0,000400	4,52E-08	2670	18409650	460,80	153414	515,63	297,52
0,5	0,000500	5,65E-08	3140	21650300	576,00	180419	644,54	279,91

0,50%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	545	3757775	23,04	31315	25,70	1218,30
0,05	0,000050	5,65E-09	640	4412800	57,60	36773	64,25	572,26
0,06	0,000060	6,79E-09	730	5033350	69,12	41945	77,11	543,95
0,075	0,000075	8,48E-09	825	5688375	86,40	47403	96,38	491,79
0,09	0,000090	1,02E-08	940	6481300	103,68	54011	115,66	466,95
0,1	0,000100	1,13E-08	1025	7067375	115,20	58895	128,51	458,26
0,2	0,000200	2,26E-08	1675	11549125	230,40	96243	257,03	374,43
0,3	0,000300	3,39E-08	2165	14927675	345,60	124397	385,55	322,64
0,35	0,000350	3,96E-08	2400	16548000	403,20	137900	449,81	306,57
0,4	0,000400	4,52E-08	2610	17995950	460,80	149966	514,07	291,72
0,5	0,000500	5,65E-08	3095	21340025	576,00	177834	642,58	276,74

0,70%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m3/s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	285	1965075	23,04	16376	25,12	651,84
0,05	0,000050	5,65E-09	570	3930150	57,60	32751	62,80	521,47
0,06	0,000060	6,79E-09	640	4412800	69,12	36773	75,36	487,92
0,075	0,000075	8,48E-09	770	5309150	86,40	44243	94,20	469,63
0,09	0,000090	1,02E-08	890	6136550	103,68	51138	113,04	452,35
0,1	0,000100	1,13E-08	1005	6929475	115,20	57746	125,61	459,72
0,2	0,000200	2,26E-08	1665	11480175	230,40	95668	251,22	380,81
0,3	0,000300	3,39E-08	2155	14858725	345,60	123823	376,83	328,58
0,35	0,000350	3,96E-08	2360	16272200	403,20	135602	439,63	308,44
0,4	0,000400	4,52E-08	2615	18030425	460,80	150254	502,44	299,04
0,5	0,000500	5,65E-08	3110	21443450	576,00	178695	628,05	284,52

1%

V (mm/s)	V (m/s)	Q (m ³ /s)	P (psi)	P (Pa)	γ_a (1/s)	τ_w (Pa)	γ_c	μ
0,02	0,000020	2,26E-09	275	1896125	23,04	15801	25,30	624,49
0,05	0,000050	5,65E-09	590	4068050	57,60	33900	63,25	535,92
0,06	0,000060	6,79E-09	670	4619650	69,12	38497	75,90	507,16
0,075	0,000075	8,48E-09	790	5447050	86,40	45392	94,88	478,39
0,09	0,000090	1,02E-08	905	6239975	103,68	52000	113,86	456,69
0,1	0,000100	1,13E-08	1020	7032900	115,20	58608	126,51	463,25
0,2	0,000200	2,26E-08	1670	11514650	230,40	95955	253,02	379,23
0,3	0,000300	3,39E-08	2165	14927675	345,60	124397	379,53	327,76
0,35	0,000350	3,96E-08	2395	16513525	403,20	137613	442,78	310,78
0,4	0,000400	4,52E-08	2610	17995950	460,80	149966	506,04	296,34
0,5	0,000500	5,65E-08	3095	21340025	576,00	177834	632,55	281,13

APÉNDICE N°4. PROPIEDADES MECÁNICAS

Tabla N°25. Propiedades mecánicas según el contenido de carga (bivalvos) para los compuestos de PP.

	de saco	Blanco	10 ppc	20 ppc	30 ppc
Resist. al Impacto (J/m)	45,41±10,21	123,43 ± 22,35	46,10 ± 7,69	45,09 ± 4,56	44,38 ± 4,38
Módulo de Young (MPa)	1250,77 ± 55,08	1433,18 ± 47,09	1601,92 ± 28,76	1689,21 ± 25,68	1706,95 ± 93,71
Esf. a la ruptura (MPa)	13,17 ± 1,82	28,43 ± 4,99	27,57 ± 0,96	26,7 ± 0,75	24,95 ± 1,45
Def. a la ruptura (%)	95,05 ± 21,20	14,02 ± 6,2	13,13 ± 1,17	11,69 ± 2,68	8,83 ± 3,1
Esf. a la fluencia (MPa)	29,61 ± 0,53	32,97 ± 1,14	30,93 ± 0,38	29,42 ± 0,61	26,73 ± 1,63
Def. a la fluencia (%)	8,62 ± 0,39	8,04 ± 0,83	6,35 ± 0,18	5,57 ± 0,3	4,6 ± 0,26

Tabla N°26. Propiedades mecánicas según el contenido de carga (bivalvos) para los compuestos de PEAD.

	de saco	Blanco	10 ppc	20 ppc	30 ppc
Resist. al Impacto (J/m)	99,30 ± 10,15	43,49 ± 6,97	46,26 ± 2,92	40,43 ± 3,42	40,5 ± 3,64
Módulo de Young (MPa)	1151,84 ± 78,12	1205,56 ± 91,90	1415,39 ± 24,61	1543,43 ± 41,27	1593,33 ± 31,41
Esf. a la ruptura (MPa)	11,35 ± 0,42	9,76 ± 4,84	12,40 ± 0,47	12,59 ± 0,55	14,80 ± 3,58
Def. a la ruptura (%)	242,85 ± 56,56	79,11 ± 23,43	140,03 ± 35,34	83,68 ± 10,96	23,83 ± 7,37
Esf. a la fluencia (MPa)	21,82 ± 0,45	23,66 ± 1,31	23,47 ± 0,43	6,91 ± 0,20	22,81 ± 0,62
Def. a la fluencia (%)	10,04 ± 0,18	8,50 ± 0,26	7,72 ± 0,24	6,98 ± 0,24	6,79 ± 0,23

Tabla N°27. Propiedades mecánicas según el contenido de carga (bivalvos) para los compuestos de PP/PEAD.

	de saco	Blanco	10 ppc	20 ppc	30 ppc
Resist. al Impacto (J/m)	58,1 ± 4,4	43,65 ± 1,98	85,19 ± 7,68	36,01 ± 2,67	33,47 ± 3,84
Módulo de Young (MPa)	1295,03 ± 52,64	1385,86 ± 23,38	1650,62 ± 42,21	1740,22 ± 26,53	1824,23 ± 49,14
Esf. a la ruptura (MPa)	29,13 ± 0,5	28,99 ± 1,01	29,69 ± 0,3	28,58 ± 0,53	27,34 ± 0,46
Def. a la ruptura (%)	7,5 ± 0,51	6,18 ± 0,6	7,36 ± 0,57	6,84 ± 1,12	6,01 ± 0,78

Tabla N°28. Propiedades mecánicas según el contenido de aditivo para los compuestos de PP.

	0%	0,30%	0,50%	0,70%	1%	Polybond
Resist. al Impacto						
(J/m)	44,38 ± 4,38	71,83 ± 6,23	47,85 ± 10,92	48,75 ± 8,69	88,07 ± 4,16	43,93 ± 8,91
Módulo de Young						
(MPa)	1706,95 ± 93,71	1691,35 ± 59,07	1645,9 ± 38,57	1665,09 ± 63,7	1653,52 ± 58,12	1744,48 ± 15,66
Esf. a la ruptura						
(MPa)	24,95 ± 1,45	23,36 ± 1,13	21,62 ± 0,46	21,48 ± 0,59	21,51 ± 0,73	26,4 ± 0,43
Def. a la ruptura						
(%)	8,83 ± 3,1	12,51 ± 2,99	16,52 ± 1,97	16,31 ± 2,51	16,86 ± 1,81	10,36 ± 0,69
Esf. a la fluencia						
(MPa)	26,73 ± 1,63	26,14 ± 0,29	25,41 ± 0,52	25,27 ± 0,51	25,27 ± 0,51	28,76 ± 0,27
Def. a la fluencia						
(%)	4,6 ± 0,26	5,14 ± 0,16	5,45 ± 0,18	5,27 ± 0,15	5,51 ± 0,26	5,34 ± 0,09

Tabla N°29. Propiedades mecánicas según el contenido de aditivo para los compuestos de PEAD.

	0%	0,30%	0,50%	0,70%	1%
Resist. al Impacto					
(J/m)	40,5 ± 3,64	36,47 ± 2,87	40,29 ± 5,44	42,41 ± 3,34	35,95 ± 1,76
Módulo de Young					
(MPa)	1593,33 ± 31,41	1550,84 ± 74,22	1472,7 ± 31,74	1388,81 ± 57,22	1473,54 ± 59,28
Esf. a la ruptura					
(MPa)	14,80 ± 3,58	8,63 ± 0,60	8,52 ± 2,04	15,4 ± 0,71	9,38 ± 1,24
Def. a la ruptura					
(%)	23,83 ± 7,37	25,75 ± 4,73	28,94 ± 6,19	13,74 ± 3,78	34,30 ± 3,79
Esf. a la fluencia					
(MPa)	22,81 ± 0,62	19,99 ± 0,15	19,78 ± 0,31	18,33 ± 0,71	19,8 ± 0,17
Def. a la fluencia					
(%)	6,79 ± 0,23	6,72 ± 0,24	6,98 ± 0,31	6,56 ± 0,83	7,05 ± 0,25

Tabla N°30. Propiedades mecánicas según el contenido de aditivo para los compuestos de PP/PEAD.

	0%	0,30%	0,50%	0,70%	1%	Polybond
Resist. al Impacto						
(J/m)	33,47 ± 3,84	37,4 ± 7,81	51,07 ± 8,77	40,72 ± 7,5	33,36 ± 8	51,79 ± 8,56
Módulo de Young						
(MPa)	1824,23 ± 49,14	1756,13 ± 37,1	1720,84 ± 42,6	1743,76 ± 33,97	1676,06 ± 29,88	1692,18 ± 8,73
Esf. a la ruptura						
(MPa)	27,34 ± 0,46	24,3 ± 0,46	24,11 ± 0,39	23,58 ± 0,35	22,98 ± 0,52	25,85 ± 0,53
Def. a la ruptura						
(%)	6,01 ± 0,78	8,95 ± 0,62	7,99 ± 0,3	7,96 ± 0,4	9,59 ± 1,59	7,07 ± 0,75

Figura N°63. Resistencia al Impacto según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

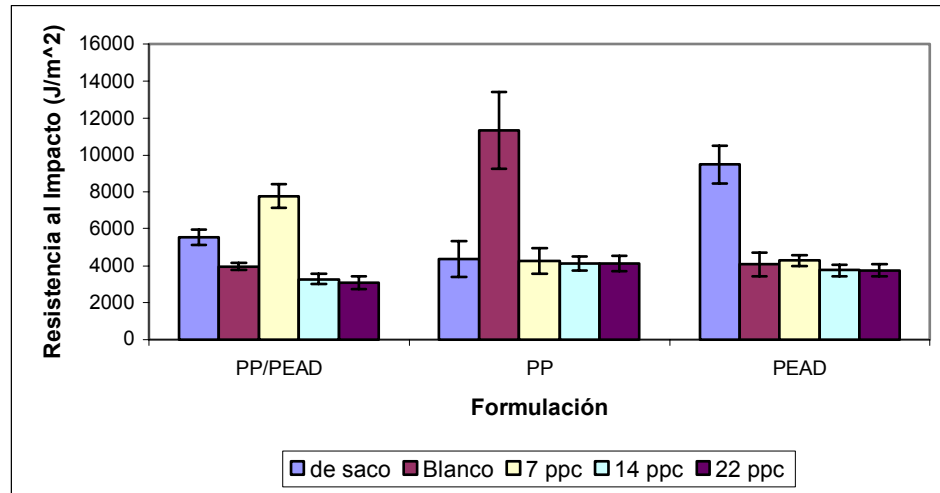


Figura N°64. Esfuerzo a la Fluencia según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

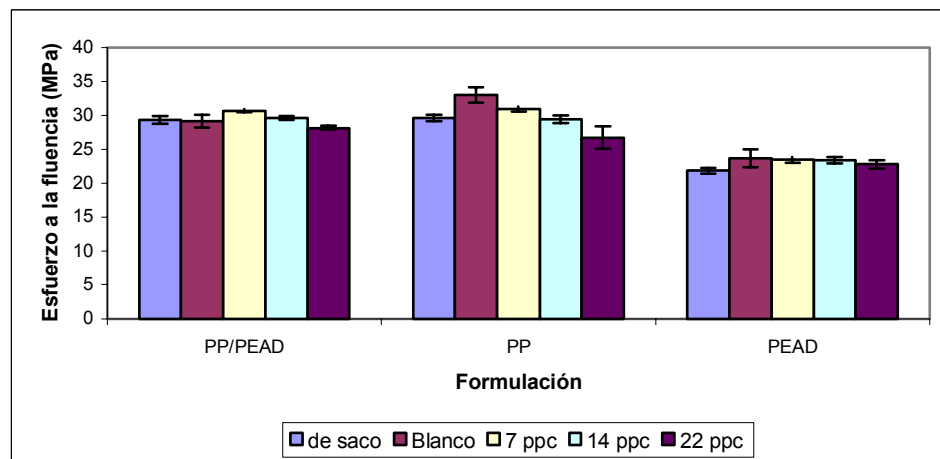


Figura N°65. Deformación a la Fluencia según el contenido de carga (*bivalvos*) en cada formulación.

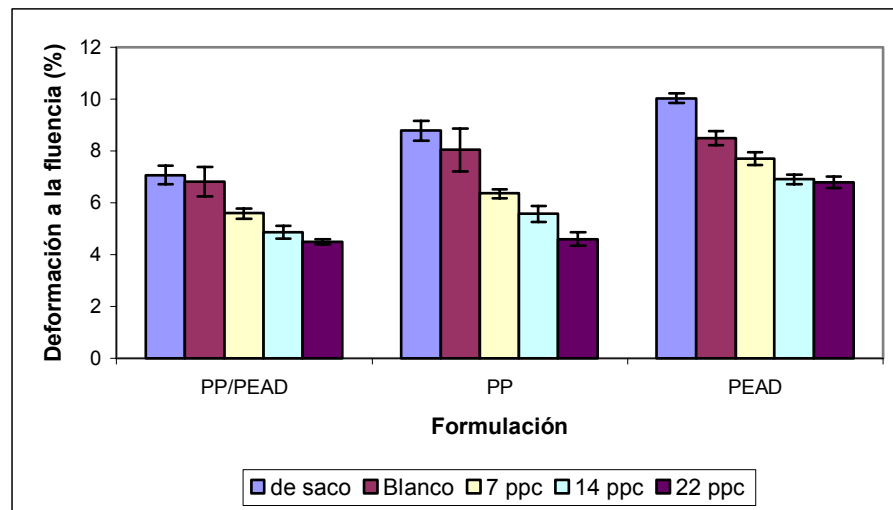


Figura N°66. Resistencia al Impacto según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (*bivalvos*) a 22 ppc.

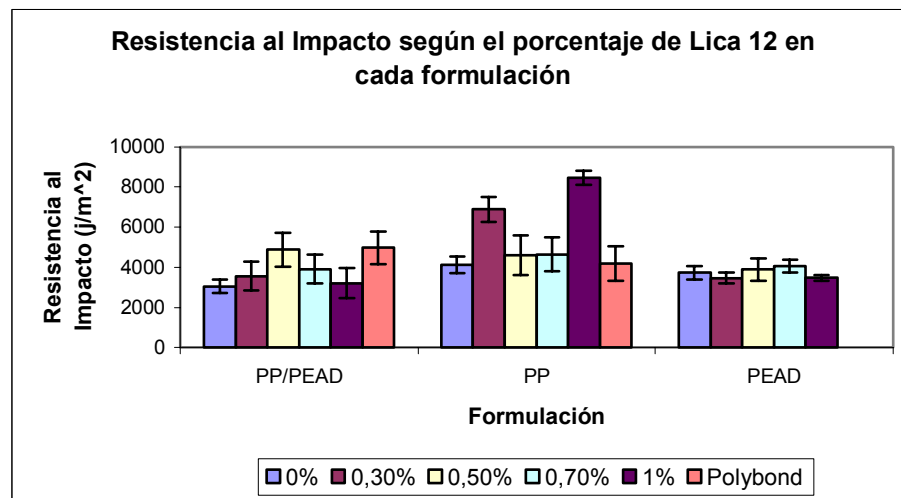


Figura N°67. Esfuerzo a la Fluencia según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (*bivalvos*) a 22 ppc.

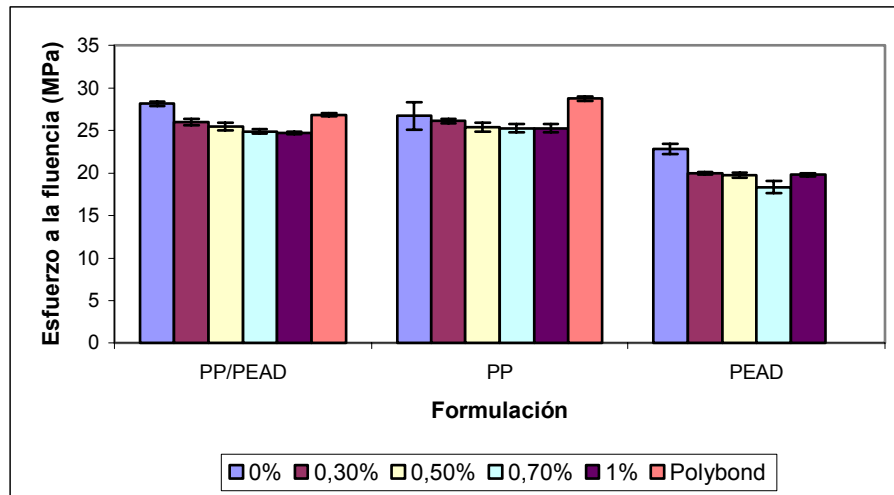
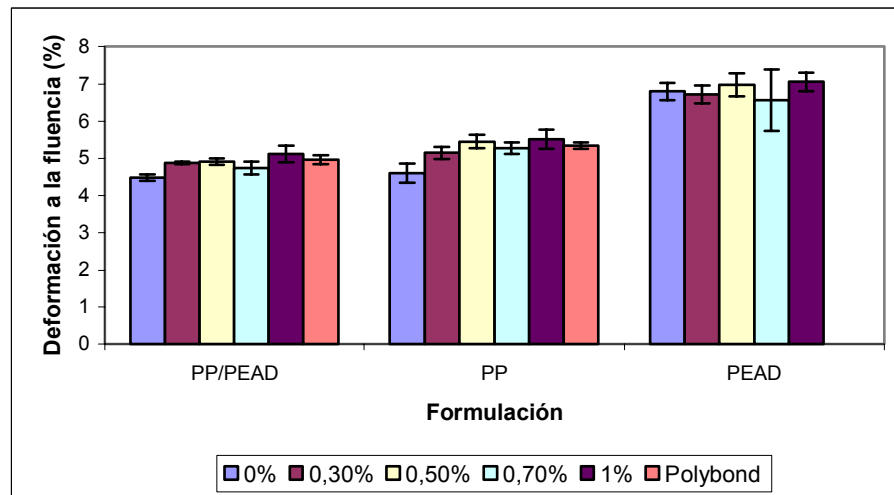


Figura N°68. Deformación a la Fluencia según el porcentaje de Lica 12 y Polybond para las formulaciones cargadas con conchas (*bivalvos*) a 22 ppc.



Anexo N°2. Propiedades Mecánicas

Entre ellas se conocen:

1. Resistencia: involucra la idea de la energía requerida para romper un material; se cuantifica por el esfuerzo según el cual se desarrolla alguna condición limitativa específica. Las principales condiciones o criterios de fallas son: la terminación de la adición elástica, en donde se habla del esfuerzo de fluencia; y la rotura, en donde se define el esfuerzo de rotura. Una medida particular de resistencia, es la dureza, usualmente definida como la resistencia a la penetración o a la abrasión en la superficie de un material.
2. Elasticidad: es aquella propiedad del material en virtud de la cual, las deformaciones causadas por el esfuerzo desaparecen al removerse éste. Un cuerpo perfectamente elástico, se define como uno capaz de recobrar completamente su forma y sus dimensiones originales al ser retirado el esfuerzo. No se conocen materiales que sean perfectamente elásticos a través del rango de esfuerzos completos hasta la rotura.
3. Rigidez: tiene que ver con la deformación relativa de un material bajo carga, y se mide, por la velocidad del esfuerzo con respecto a la deformación: mientras mayor sea el esfuerzo requerido para generar una deformación dada, más rígido se considera el material. Bajo un esfuerzo simple dentro de un rango proporcional (*zona elástica*) la razón entre el esfuerzo y la deformación correspondiente es denominada *Módulo de Elasticidad*.

Con respecto a los tres tipos fundamentales de esfuerzo, existen tres módulos de elasticidad:

- Bajo el esfuerzo de tensión, es llamado *Módulo de Young*.
- Bajo corte simple, es llamado *Módulo de Rigidez*.
- Bajo el esfuerzo de compresión, se llama *Módulo de Compresión*.

En términos del diagrama esfuerzo-deformación, el módulo de elasticidad es la pendiente de la curva de la zona proporcional y se expresa en unidades de fuerza por unidad de área.

4. Plasticidad: es aquella propiedad que permite al material sobrellevar deformaciones permanentes sin que sobrevenga la rotura del mismo. Una expresión general de la acción plástica involucraría es la velocidad de deformación, debido a que en el estado plástico los materiales pueden deformarse bajo el esfuerzo constante y sostenido; así mismo, involucraría el concepto de límite de deformación ante la rotura.

Las evidencias de acción plástica en los materiales se llaman: Deformación y Flujo Plástico.

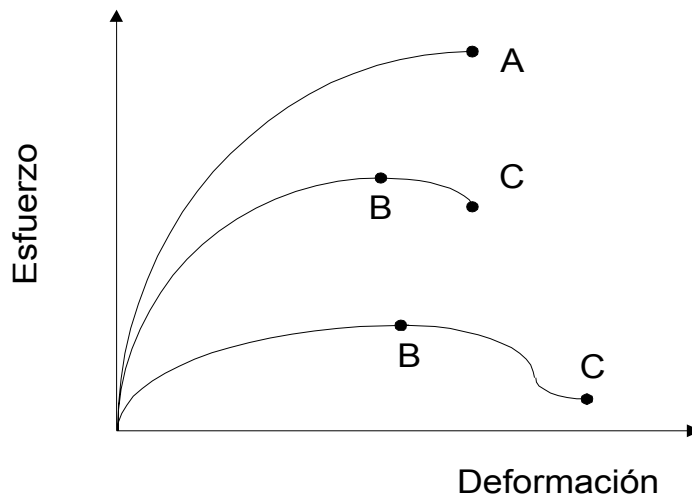
5. Capacidad Energética: es la característica del material que permite absorber o almacenar energía cuando es sometido a cargas externas. La cantidad de energía absorbida al esforzar un material hasta el límite elástico, o la cantidad de energía que puede recobrase cuando el esfuerzo es liberado del límite elástico, es denominada *Resistencia*.

Ensayos Mecánicos

Los ensayos de esfuerzo-deformación son los más utilizados por todos los ensayos mecánicos; sin embargo, la relación entre estos ensayos y las diversas aplicaciones de los polímeros no es muy clara. La razón principal de este hecho radica en la naturaleza viscoelástica de los polímeros y la sensibilidad de los mismos a diversos factores.

1. Ensayos de Tracción: se emplean ampliamente para obtener información básica sobre la resistencia mecánica del polímero y como ensayo de recepción para la especificación de los mismos. Durante la realización de este ensayo, se somete la probeta a una fuerza de tracción monoaxial, que va aumentando de forma progresiva, cuantificando de manera simultánea y continua los correspondientes alargamientos. Con estos datos de carga y alargamientos obtenidos, se construye una *Curva de Tensión-Deformación*.

Figura N°70. Curva Tensión-Deformación.



A: Esfuerzo a la rotura.
Elongación a la rotura.
B: Esfuerzo a la fluencia.
Elongación a la fluencia.
C: Esfuerzo a la ruptura.
Elongación a la ruptura.

La forma y las magnitudes de la curva tensión-deformación dependerá de: la muestra, su composición, tratamiento térmico, historia anterior a la deformación plástica y la velocidad de deformación, temperatura y estado de tensión durante el ensayo. Los parámetros utilizados para describir la curva tensión-deformación de un material son: la resistencia a la tracción, el límite elástico y el porcentaje de alargamiento.

2. Esfuerzo a la Ruptura (σ_B): es el valor de carga máxima que puede soportar un material dividido por la sección transversal inicial de la probeta.
3. Elongación a la Ruptura (ϵ_B): es la relación entre el aumento de la longitud de la distancia entre dos puntos de la probeta y su longitud original. El fin de la curva denota la falla del material, que está caracterizada por la resistencia a la tracción (σ_B) y el alargamiento límite o el alargamiento a la rotura (ϵ_B).
4. Módulo de Elasticidad (E): la pendiente de la parte lineal inicial de la curva tensión-deformación, es el módulo elástico o Módulo de Young, el cual es una medida de la rigidez del material: cuanto mayor sea el módulo, más pequeña será la deformación elástica resultante de la aplicación de una tensión dada.
5. Esfuerzo a la Fluencia (σ_y): es la carga límite por encima de la cual el material ya no soporta elásticamente. El comportamiento elástico está caracterizado por el hecho de que al deformar un material sometido a una carga externa, éste recobra sus dimensiones originales al eliminar la carga. Si se sobrepasa el límite elástico, el cuerpo retiene cierta deformación permanente cuando deja de actuar la carga. Un cuerpo que se ha deformado permanentemente se dice que ha sufrido una deformación elástica.

El comportamiento general de un material bajo carga, se puede calificar como dúctil o frágil, según que el material muestre o no la capacidad para sufrir una deformación plástica. Un material completamente frágil se romperá casi en el límite elástico. Un material en Ingeniería, con la ductilidad adecuada, le permitirá redistribuir tensiones localizadas, por el contrario, en un material frágil, la concentración de tensiones localizadas se incrementarán al aumentar la carga si no hay flujo plástico, finalizando en la iniciación de una grieta.

La formación de una grieta concluye en muchas de las ocasiones, en la destrucción completa de la continuidad de un miembro, lo que constituye una ruptura.

6. Tenacidad: es la capacidad, no solo de absorber energía en el campo plástico; sino que además, la de resistir tensiones superiores al límite elástico, sin que se produzca fractura. Una forma de concretar el concepto de tenacidad, es considerar el área total bajo la curva tensión-deformación. Esta superficie es una indicación del trabajo total por unidad de volumen que puede realizarse sobre el material sin que se produzca la rotura. Esto indica que la tenacidad, es un parámetro que comprende la resistencia mecánica y la ductilidad.
7. Ensayos de Impacto: en la mayoría de los casos, la ruptura en las muestras de polímeros puede dividirse en dos clases: frágil y dúctil. La ruptura frágil o quebradiza, ocurre cuando el material se comporta elásticamente hasta el

punto de rotura, es decir, no cede o se estira, caracterizándose por la ausencia de la distorsión de las partes rotas; mientras que en la rotura dúctil, la muestra se deforma permanentemente cerca del punto de rotura. El punto de fragilidad, o temperatura a la que comienza la fragilidad se determina habitualmente sometiendo a la muestra a un impacto de forma normalizada pero empírica. La temperatura de ensayo se varía hasta que se encuentra una temperatura en la que estadísticamente, la mitad de las muestras se rompen por rotura frágil.

La resistencia al impacto de los plásticos, se cuantifica comúnmente mediante ensayos en los que se deja que un péndulo con un borde de impacto macizo golpee la muestra. Por la trayectoria del péndulo, tras romper la muestra, se puede calcular la energía necesaria para producir la rotura.