

**ESTUDIO DE LA PREPARACIÓN DE FORMULACIONES ESTIRENO-
CAUCHO Y CAUCHO METACRILATO DE METILO, UTILIZANDO
POLIESTIRENO POSTCONSUMO**

LADY CAROLINA RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

NATHALY ARCHILA PRADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2015

**ESTUDIO DE LA PREPARACIÓN DE FORMULACIONES ESTIRENO-
CAUCHO Y CAUCHO METACRILATO DE METILO, UTILIZANDO
POLIESTIRENO POSTCONSUMO**

LADY CAROLINA RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

NATHALY ARCHILA PRADA

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el título de
Químico**

DIRECTOR:

JOSE CARLOS GUTIERREZ GALLEGO.

Químico, Msc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2015

DEDICATORIA

A Dios y a María Santísima por su inmenso amor, por guiarme en el camino de la verdadera felicidad, y por la oportunidad que me dan de poder culminar este trabajo de forma satisfactoria.

Además lo dedico de forma muy especial a las personas más maravillosas que hacen parte de mi vida:

A mi madre Ninfa Hernández que no hay mujer ni madre como ella, una verraca.

A mi ángel del cielo, mi padre Alcides Rodríguez que siempre me acompaña y se alegra de este logro.

A mis dos hermanas Enith y Angela, que por sus valiosos consejos me enseñan a ser una mejor mujer.

A mis bellas sobrinas Catalina e Isabella que con sus acciones de cariño fortalecen mi vida.

Al amor de mi vida Carlos Alberto que por su amor, tolerancia, ayuda, y compañía me motiva a vencer obstáculos y a seguir adelante.

Lady Carolina

DEDICATORIA

Este trabajo es gracias a Dios, por los beneficios recibidos, porque en este trabajo siempre estuvo su mano, y su gran obra.

A mis padres María Eugenia y Luis Antonio, que con su amor desinteresado, apoyo incondicional, constantes consejos, y gran deseo de ver a sus hijos realizados como buenas personas, y profesionales, logre alcanzar esta meta.

*A mis hermanos, **Luis Mauricio**, Pablo Antonio, mi cuñada Mayra, mis sobrinas María Paulá, y Saraí, personas también muy importantes, quienes me animan siempre a salir adelante, y a alcanzar grandes metas.*

A mis amigas Mary, Judith, quienes con sus consejos, palabras de apoyo, lealtad, también ayudaron a que este gran paso fuera más consolidado.

A mi amiga Claudia, quien fue otra de mis compañeras durante la carrera, distinguiéndose como aquella persona colaboradora, entregada, no sólo a los suyos sino a lo de los demás, estuvo ahí en los momentos que más la necesite, siempre con su solidaridad, apoyo, y capacidad de escucha.

También le agradezco mucho a Carolina, a quien la conocí durante el paso por mi carrera, y que me hubiera gustado conocer mucho antes, gracias por su gran ayuda, y lindas palabras de apoyo, que el Señor siempre la bendiga.

Nathaly Archila Prada.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a Mamita María porque llenan mi vida de mucha fortaleza y muchas bendiciones.

A mis padres, hermanas, sobrinas y a mis cuñados, por su interés de querer colaborar en mi superación y en lo que hoy en día soy.

A Calos Alberto por recorrer el mismo camino, gracias amor por darme tanta felicidad, te AMO.

A mi abuela Custodia por sus oraciones que llenan mi vida de mucha alegría, y a toda mi familia en general.

A mi suegra Hermelinda, por sus oraciones y por sus muestras de mucho afecto.

A mis amigos por hacer parte de mi vida en los momentos que más los necesité y que fueron mi apoyo.

A la comunidad de hermanas carmelitas descalzas en especial la hermana Paulina de Jesús y la postulante María Isabel por su oración continua y sus sabios consejos. También a las hermanas Misioneras del niño Jesús, que por su intercesión mi señor estuvo siempre conmigo.

A la calificadora de trabajo de grado Dra. Angela Marcela Montaña por sus correcciones y valiosos consejos.

Al Msc. José Carlos Gutierrez por la dirección del trabajo de grado, llevando siempre adelante el proyecto, por su colaboración.

Al resto de gente hermosa que se alegran conmigo de este triunfo.

Lady Carolina

AGRADECIMIENTOS

Total agradecimiento a Dios, por permitir que este trabajo llegara satisfactoriamente a su meta.

A nuestras familias por estar siempre pendientes, y dispuestas a colaborar todo el tiempo.

A nuestro director de Proyecto: El profesor José Carlos Gutiérrez Gallego, por permitirnos trabajar bajo su dirección, quien por medio de sus consejos, y grandes aportes a nuestro trabajo, lograron que alcanzáramos nuestra meta.

También a nuestra evaluadora la Profesora Ángela Marcela Montaña Angarita, quien gracias a su paciencia, grandes aportes, e interés por nuestro trabajo realizado, nos ha brindado gran motivación, por este gran paso que hemos dado hacía nuestras vidas profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Química, por habernos acogidos como estudiantes, y apoyarnos en nuestra formación profesional.

A nuestros grandes amigos, personas que estuvieron siempre ahí, sin ningún interés, y a quienes debemos parte de esta gran alegría. Y a todas las demás personas que siempre nos incluyeron en sus oraciones, para que este sueño se hiciera realidad.

CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCIÓN.....	21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
2. JUSTIFICACIÓN.....	24
3. OBJETIVOS.....	26
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	26
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
4. MARCO TEÓRICO.....	27
4.1 MATERIALES POLIMÉRICOS (PLASTICOS).....	27
4.1.1 Material Termoestable.....	27
4.1.2 Material Termoplástico.....	27
4.2 POLIMERIZACIÓN.....	28
4.2.1 Polimerización por Condensación.....	28
4.2.2 Polimerización por Adición.....	29
4.3 ALEACIÓN POLIMÉRICA.....	30
4.3.1 Dispersión.....	31
4.3.2 Solución.....	32
4.4 MONÓMERO.....	32
4.4.1 Funcionalidad de un Monómero.....	32
4.5 MONÓMERO ESTIRENO.....	33
4.5.1 Polimerización del Estireno a Poliestireno.....	33
4.5.2 Propiedades, ventajas, usos, y aplicaciones del Poliestireno.....	35
4.6 MONÓMERO METILMETACRILATO.....	35
4.6.1 Polimerización del Metilmetacrilato a Polimetilmetacrilato.....	36

4.6.2 Propiedades, ventajas, usos, y aplicaciones del Polimetilmetacrilato...	37
4.7 PROCESO DE CURADO.....	37
4.8 CATALIZADOR NAFTENATO DE COBALTO.....	37
4.9 ACELERANTE MEK PERÓXIDO.....	38
4.10 CAUCHO NATURAL.....	39
4.11 TECNICAS DE CARACTERIZACION.....	39
4.11.1 Espectroscopía Infrarroja con Reflectancia Total Atenuada (IR/ATR)..	39
4.11.2 Termogravimetría (TGA).....	40
4.11.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	41
4.11.4 Interacción con solventes.....	41
4.11.5 Ensayos Mecánicos.....	41
4.11.5.1 Ensayo de Impacto.....	42
4.11.5.2 Ensayo de Dureza.....	42
4.11.5.3 Ensayo de Resistencia a la Flexión.....	43
5. METODOLOGÍA.....	45
5.1 CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA ATR DEL CAUCHO NATURAL, CATALIZADOR NAFTENATO COBALTO, ACELERANTE MEK PERÓXIDO, POLIESTIRENO POSTCONSUMO, MONÓMEROS ESTIRENO Y METILMETACRILATO SIN INHIBIDORES.....	45
5.2 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE POLIESTIRENO-ESTIRENO Y POLIESTIRENO-METILMETACRILATO.....	45
5.2.1 Poliestireno-Estireno.....	45
5.2.2 Poliestireno-MMA.....	47
5.3 ELABORACIÓN DE LAS DISPERSIONES DE CAUCHO-ESTIRENO, CAUCHO-MMA, CAUCHO-ESTIRENO-POLIESTIRENO, CAUCHO-METILMETACRILATO-POLIESTIRENO.....	48
5.3.1 Dispersión de Caucho-Estireno.....	48
5.3.2 Dispersión de Caucho-metilmetacrilato.....	49
5.3.3 Dispersión de Caucho-S-PS.....	50

5.3.4	Dispersión de Caucho-MMA-PS.....	50
5.4	POLIMERIZACIONES CON EL CATALIZADOR Y EL ACELERANTE.....	51
5.4.1	Estireno.....	51
5.4.1.1	Caucho-Estireno, Estireno-Poliestireno, Caucho-Estireno Poliestireno.....	51
5.4.2	Metilmetacrilato.....	52
5.4.2.1	Caucho-Metilmetacrilato, Poliestireno-Metilmetacrilato, Caucho- Metilmetacrilato-Poliestireno.....	52
5.5.	CARACTERIZACION DE LAS POLIMEZACIONES.....	52
5.5.1	Espectroscopía Infrarroja con Reflectancia Total Atenuada (IR/ATR).....	53
5.5.2	Termogravimetría (TGA).....	52
5.5.3	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	54
5.5.4	Interacción con solventes (Solubilidad).....	55
5.5.5	Ensayos Mecánicos.....	55
5.5.5.1	Ensayo de Impacto.....	56
5.5.5.2	Ensayo de Dureza.....	56
5.5.5.3	Ensayo de Resistencia a la Flexión.....	57
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
6.1	Preparación de las soluciones y dispersiones de PS-S, PS-MMA, Caucho- S, Caucho-MMA, Caucho-S-PS y Caucho-MMA-PS CON y SIN el Catalizador y el acelerante.....	59
6.2	Caracterización por Espectroscopía Infrarroja con Reflectancia Total Atenuada (IR/ATR).....	64
6.2.1	Comparación de los espectros IR del Caucho-S en dispersión y polimerizado.....	65
6.2.2	Comparación de los espectros IR del S Monómero y PS-S Polimerizado.....	66
6.2.3	Comparación de los espectros IR del PS-S (1:2) y PS-S (1:3).....	67

6.2.4 Comparación de los espectros IR de los materiales PS-S (1:1), (1:2), (1:3) y [Caucho-(PS-S 1:2)] y [Caucho-(PS-S 1:3)].....	69
6.2.5 Análisis IR de las muestras de [Caucho-(PS-MMA 1:1)] y [Caucho-(PS-MMA 1:3)].....	72
6.3 ANÁLISIS TEMOGRAVÉTRICOS (TGA) DE LOS COPOLÍMEROS.....	76
6.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	82
6.4.1 Análisis a alto vacío - con recubrimiento en oro.....	83
6.4.2 Análisis a bajo vacío - con vapor de H ₂ O.....	83
6.5 INTERACCIÓN QUÍMICO CON SOLVENTES (SOLUBILIDAD).....	90
6.6 ENSAYOS MECÁNICOS.....	95
6.6.1 Ensayo de Impacto.....	95
6.6.2 Ensayo de Dureza.....	97
6.6.3 Ensayo de Resistencia a la Flexión.....	99
7. CONCLUSIONES.....	102
8. RECOMENDACIONES.....	104
CITAS.....	105
BIBLIOGRAFIA.....	109
ANEXOS.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Monómero Estireno.....	33
Figura 2. Polimerización del Estireno.....	34
Figura 3. Monómero MMA.....	36
Figura 4. Polimerización del Metilmetacrilato.....	36
Figura 5. Caucho Natural.....	39
Figura 6. Lavado del estireno para la eliminación de los Inhibidores.....	46
Figura 7. Solución PS-S.....	46
Figura 8. Eliminación de Inhibidores en MMA Monómero.....	47
Figura 9. Solución PS-MMA.....	48
Figura 10. Dispersión Caucho-S.....	49
Figura 11. Agitación a motor de la dispersión Caucho-S.....	49
Figura 12. Dispersión de Caucho-MMA.....	50
Figura 13. Balanza Termogravimétrica.....	53
Figura 14. Microscopio Electrónico.....	55
Figura 15. Máquina de Impacto.....	56
Figura 16. Durómetro.....	57
Figura 17. Montaje experimental DMA.....	58
Figura 18. Polimerización de las muestras con S, con y sin Cat y Acel.....	69
Figura 19. Polimerización de las muestras con MMA, con y sin Cat y Acel.....	63
Figura 20. Polimerización en mayor proporción de las muestras con Estireno.....	64
Figura 21. Espectro IR (1) Comparación Caucho-S en dispersión y polimerizado....	66
Figura 22. Espectro IR (2) Comparación S monómero y PS-S polimerizado.....	67
Figura 23. Espectro IR (3) Comparación PS-S (1:2) y PS-S (1:3).....	68
Figura 24. Espectro IR (4) Comparación PS (1:1), PS-S (1:2), PS-S (1:3), [Caucho (PS-S 1:2)], [Caucho (PS-S 1:3)].....	71
Figura 25. Comparación del PS-MMA, PS-MMA(1:2)-Caucho.....	74

Figura 26. Comparación del PS-MMA (1:2), PS-MMA (1:3).....	75
Figura 27. Comparación del PS-MMA (1:1), PS-MMA (1:3).....	75
Figura 28. Distribución y Dispersión.....	84
Figura 29. Imágenes Microscópicas SEM de Caucho-S.....	85
Figura 30. Imágenes Microscópicas SEM de Caucho-MMA.....	86
Figura 31. Imágenes Microscópicas SEM de PS-S.....	87
Figura 32. Imágenes Microscópicas SEM de Caucho-S-PS.....	87
Figura 33. Imágenes Microscópicas SEM de PS-MMA.....	88
Figura 34. Imágenes Microscópicas SEM de PS-MMA-Caucho.....	89
Figura 35. Imágenes Microscópicas SEM de [Caucho-(PS-MMA 1:3)].....	90
Figura 36. Resultados obtenidos de Ensayos de la Resistencia Al Impacto.....	96
Figura 37. Resultados debidos a la prueba de Dureza.....	98
Figura 38. Probetas usadas para el ensayo de Flexión.....	99
Figura 39. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Flexión.....	100
Figura 40. Comparación de la Resistencia a la Flexión de las cuatro muestras pasadas por equipo el DMA.....	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Bandas de absorción del IR con las vibraciones de las Muestras de S.....	72
Tabla 2. Bandas de absorción del IR con las vibraciones de las Muestras Metilmetacrilato.....	73
Tabla 3. Termodegradación Caucho-S.....	77
Tabla 4. Termodegradación [Caucho-(PS-S 1:1)].....	78
Tabla 5. Termodegradación Caucho-MMA.....	79
Tabla 6. Termodegradación [Caucho-(PS-MMA 1:1)].....	81
Tabla 7. Pruebas de Resultados de ataque a las muestras de S.....	93
Tabla 8. Pruebas de Resultados de ataque a las muestras de MMA.....	94
Tabla 9. Resultados de ensayos de Impacto.....	96
Tabla 10. Resultados Pruebas de Dureza.....	97
Tabla 11. Dimensiones de las probetas para los ensayos de Flexión.....	99
Tabla 12. Resultados del DMA de la Resistencia Máxima a la Flexión.....	100

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. TG 1 Caucho-S.....	77
Grafica 2. TG 2 [Caucho-(PS-S 1:1)].....	78
Grafica 3. TG 3 Caucho-MMA.....	80
Grafica 4. TG 4 [Caucho-(PS-MMA 1:1)].....	81

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	Absorciones de los espectros IR para el Caucho Natural, estireno monómero y poliestireno postconsumo	111
Anexo B	Bandas del espectro IR para el Caucho-S en dispersión	112
Anexo C	Espectro infrarrojo del estireno monómero	113
Anexo D	Espectro infrarrojo del caucho natural	114
Anexo E	Espectro infrarrojo del poliestireno postconsumo	115
Anexo F	Bandas del espectro IR para la muestra 8 [Caucho-PS-S 1:3]	116
Anexo G	Bandas del espectro IR para la muestra 6 [Caucho-PS-S 1:1]	117
Anexo H	Espectro infrarrojo del metil metacrilato teórico	118
Anexo I	Retrodispersión en el EDS de la muestra PS-MMA-Caucho	119
Anexo J	Resistencia a la flexión de la muestra PS-S(1:1)-Caucho	120
Anexo K	Resistencia a la flexión de la muestra PS-S(1:2)-Caucho	121
Anexo L	Resistencia a la flexión de la muestra Caucho-S	122
Anexo M	Resistencia a la flexión de la muestra PS-S(1:3)-Caucho	123

LISTA DE ABREVIATURAS

S	Estireno
MMA	Metacrilato de Metilo
PS	Poliestireno
MEK	Metil Etil Cetona
mL	mililitro
g	gramo
IR/ATR	Espectroscopía de Infrarroja con reflectancia total atenuada
ASTM	American Society for Testing and Materials
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
TGA	Termogravimetría
TG	Temograma

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA PREPARACIÓN DE FORMULACIONES ESTIRENO-CAUCHO Y CAUCHO- METACRILATO DE METILO, UTILIZANDO POLIESTIENO POSTCONSUMO*

Autores: LADY CAROLINA RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, NATHALY ARCHILA PRADA**

Palabras claves: Aleación polimérica, copolímero, estireno, metacrilato de Metilo, poliestireno postconsumo.

Descripción:

Existe un interés en la investigación y desarrollo de nuevas vías para el reciclado de residuos plásticos, entre las opciones de reciclado está que estos residuos se puedan incorporar en procesos industriales, brindándole mayor valor a los residuos postconsumo. El poliestireno es uno de los materiales con más alta proporción en los residuos plásticos presente en un 12.3%.

En este trabajo de investigación se llevaron a cabo formulaciones poliméricas incluyendo poliestireno postconsumo como carga a las dispersiones caucho-estireno y caucho metacrilato de metilo, para quedar disperso o en solución en la nueva matriz polimérica que se puede tomar como aleación polimérica, brindándole un valor agregado. Los copolímeros son formados a partir de la polimerización en cadena vía radicalaria, teniendo en cuenta las variables de temperatura, concentración y tiempo de reacción, con la presencia de catalizador naftenato de cobalto y acelerante Mek peróxido.

A cada uno de los materiales obtenidos de las copolimerizaciones y aleaciones poliméricas de PS-S, PS-MMA, Caucho-S, Caucho-MMA y Caucho-S-PS, Caucho-MMA-PS, se les realizó su respectivo análisis por diferentes técnicas como IR/ATR, TGA, SEM y también interacción con solventes; además por ensayos mecánicos de impacto, dureza y flexión, para conocer sus propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas. Obteniendo materiales con buena resistencia al ataque químico como aquellos elaborados con MMA, otros con buena dispersión como las soluciones de Caucho-S, PS-S y Caucho-S-PS, también buena resistencia a la flexión como Caucho-S-PS y además con buena dureza, y resistencia al impacto como Caucho-S. Se menciona que la adición de PS postconsumo permitió a los materiales tener una mejor resistencia térmica, obteniendo materiales con propiedades que permitan su empleo como material compuesto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Director: José Carlos Gutiérrez Gallego

ABSTRACT

TITLE: STUDY FOR THE PREPARATION OF STYRENE-RUBBER, RUBBER-METHYLMETHACRYLATE FORMULATIONS, BY THE USE OF POST-CONSUMER POLYSTYRENE.*

Authors: LADY CAROLINA RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, NATHALY ARCHILA PRADA**

Key words: Polymer alloy, copolymer, styrene, methylmethacrylate, post-consumer polystyrene.

Description:

There is an interest in studying and developing new alternatives for plastic waste recycling, which includes the possibility of including plastic waste in industrial processes, thus increasing the value of post-consumer waste. Polystyrene was one of the materials with higher rate in plastic waste, present in 12 %.

This research project conducted polymery formulations, including post-consumer polystyrene as a charge to rubber-methylmethacrylate, styrene-rubber dispersions. Here, post-consumer polystyrene is dispersed or immersed into a solution in a new polymer matrix which can be used as a polymer alloy, thus adding an aggregate value. Copolymers are formed by chain polymerization through free radical route, considering temperature variables, reaction time and concentration, with presence of cobalt naphthenate catalyst and Mek peroxide accelerator.

Each of the materials obtained from copolymerization and polymer alloying from PS-A, PS-MMA, rubber-S, rubber-MMA and rubber-S-PS, rubber-MMA-PS, was submitted to individual analysis, using different techniques such as IR/ATR, TGA, SEM and solvent interaction, as well as impact, hardness and flexion mechanical studies, with the purpose of establishing their physicochemical and physicomechanical properties. The procedure yielded materials with high etching resistance, like the ones produced with MMA; others with high dispersion, like rubber-S, PP-S and rubber-S-PS solutions; and also materials with high impact resistance, such as rubber-S. It is stated that the addition of post-consumer PS provided materials with higher heat resistance, which in turn, yielded materials whose properties could be used as compound material.

* Work Degree

** Faculty of Science. School of Chemistry. Director: José Carlos Gutiérrez Gallego

INTRODUCCIÓN

Los materiales poliméricos hoy en día han llegado a ser indispensables para la humanidad en el vestir, la construcción, la comunicación, el transporte, entre otros; han sustituido a los metales, vidrios, maderas, papel, siendo los polímeros (plásticos) materiales adecuados por el bajo costo y propiedades eficientes. Los plásticos se dividen en dos clases los termoestables y los termoplásticos. Los termoestables una vez calentados no se dejan volver a refundir, mientras que los termoplásticos tienen la propiedad de ser reformados una y otra vez sin sufrir cambios significativos en sus propiedades.

El fuerte incremento en el uso de productos fabricados con materiales termoplásticos que van desde artículos para el hogar a sofisticadas piezas aeronáuticas, aumentó la competencia dentro de este mercado de manera significativa. Las aplicaciones parecen ilimitadas para los termoplásticos, pudiendo hacerse desde piezas simples a muy complejas con una grande tolerancia dimensional ^[1].

Estudios recientes han mostrado que la adición de materiales termoplásticos como el poliestireno permite la compatibilidad y el mejoramiento de las propiedades de los copolímeros formados a partir de la polimerización radicalaria. Es así, lo que en este estudio se estima usar para la elaboración de formulaciones poliméricas el material termoplástico poliestireno postconsumo.

Los polímeros postconsumo, son materiales reciclados. Este tema del reciclaje se ha convertido en un asunto prioritario de la problemática ambiental, que consiste inicialmente en la gestión de la recolección del material polimérico de los residuos

sólidos, para luego darles uso alcanzándose soluciones que cuidan el medio ambiente.

El poliestireno postconsumo utilizado brindará un valor agregado al nuevo material, proporcionándole una elevada rigidez, se empleará como aditivo a las dispersiones de Caucho-S y Caucho-MMA para quedar disperso o en solución en la nueva matriz polimérica, que se puede tomar como una aleación polimérica en términos generales; finalmente los materiales obtenidos se caracterizarán por diversas técnicas para determinar sus diferentes propiedades.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El plástico es uno de los materiales más usados hoy en día; para su fabricación se parte del crudo de petróleo, que en último término produce plásticos un 4% y carburantes el 96% restante ^[2]. El aumento en el consumo de plásticos en la sociedad moderna se estima que crece un 4% anualmente^[3], la producción alrededor del mundo se evaluó en 260.000.000 t en el año 2008, y la cifra continúa creciendo ^[4]. De todos los residuos generados, más del 80% es utilizado como rellenos o llevado a vertederos, el 8% es incinerado y se estima que tan solo el 7% es reciclado ^[5].

El poliestireno es uno de los productos petroquímicos de mayor uso para la elaboración de nuevos materiales plásticos, es utilizado especialmente como aislante térmico, es un material que a pesar de sus grandes aplicaciones y bajo costo, termina siendo alterable a la interperie con el paso del tiempo; no se degrada rápidamente al contrario dura varios años en desaparecer, siendo el poliestireno el 12.3% uno de los mayores componentes en los desechos de plástico ^[6].

Para reciclar el material poliestireno se debe considerar, que otro fin, aparte de ayudar al medio ambiente que aplicación se tendría de él, proyectando a la constante innovación de los materiales aumentando la calidad ^[7]. Lo que se pretende con este trabajo es elaborar copolímeros de estireno-caucho, caucho-metilmacrilato a los que se les adicionará poliestireno postconsumo con el fin de obtener formulaciones poliméricas que tengan propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas que proporcionen su empleo en la elaboración de materiales compuestos, por ejemplo material para juntas de dilatación.

2. JUSTIFICACIÓN

Se han llevado a cabo, diversas acciones relacionadas con la promoción del reciclaje de residuos plásticos mediante una activa participación en iniciativas de gestión de las diversas autoridades y entidades ambientales ^[8].

Considerablemente existe un interés en la investigación y desarrollo de nuevas vías para el reciclado de residuos plásticos. Entre las opciones de reciclado está que estos residuos se puedan incorporar en procesos industriales, brindándole un mayor valor a los residuos postconsumo ^[9].

El trabajo presente quiere aprovechar el poliestireno postconsumo como aditivo para los copolímeros Caucho-S, Caucho-MMA con el fin de obtener formulaciones poliméricas que posean propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas con potencial industrial, considerando variables de concentración, temperatura y tiempo de reacción que permitan su empleo en la creación de materiales compuestos como material para juntas de dilatación.

Aplicar el poliestireno postconsumo disminuye costos, promueve el reciclaje y aprovecha las propiedades de fácil manejo, proporciona además el diseño de nuevos materiales con mejores propiedades en resistencia, estabilidad y rigidez, entre otros.

El PS presenta buena transparencia, alta rigidez excelente procesabilidad, si está puro es quebradizo, pero es lo suficientemente duro para que se pueda originar un

producto de alta utilidad mediante la transferencia de propiedades de un material más elástico, como el caucho; en condiciones naturales el poliestireno y el caucho no pueden ser mezclados, es así que se combina el estireno, el caucho, el catalizador y el acelerante para que ocurra la polimerización.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener copolímeros de Caucho-estireno, y Caucho-Metil metacrilato a los que se les adicionará poliestireno postconsumo como carga para caracterizarlos evaluando sus propiedades fisicoquímicas y fisicomecánicas.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Eliminar los inhibidores de los monómeros Estireno y Metil metacrilato, mediante procesos válidos de decantación y destilación simple.
- Caracterizar espectroscópicamente los monómeros estireno y metilmetacrilato sin inhibidores, además el caucho natural, el poliestireno postconsumo, el Naftenato de cobalto y el MEK peróxido.
- Determinar las relaciones óptimas de las dispersiones de Estireno-Caucho y Caucho-MMA y de las soluciones PS-S y PS-MMA, para la elaboración de los copolímeros.
- Obtener Copolímeros uniformes de Caucho-S, Caucho-MMA, [Caucho(S-PS)] y [Caucho (MMA-PS)].
- Evaluar las características estructurales, térmicas y mecánicas de los copolímeros obtenidos.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 MATERIALES POLIMÉRICOS (PLÁSTICOS)

La mayoría están formados por largas cadenas o redes de moléculas orgánicas. Estructuralmente, la mayoría de los materiales poliméricos no son cristalinos, pero algunos constan de mezclas de regiones cristalinas y no cristalinas. Son buenos aislantes eléctricos y en general tienen bajas densidades y bajas temperaturas de reblandecimiento o descomposición.

4.1.1 Material Termoestable. Este tipo de plástico posee una estructura molecular tipo reticular a base de uniones covalentes. Algunos se entrecruzan por el calor o una combinación de calor-presión, otros mediante una reacción química que tiene lugar a temperatura ambiente (endurecidos en frío).

Estos materiales no pueden ser recalentados y refundidos, a su vez no pueden ser reciclados ni reutilizados; una de las ventajas es su estabilidad térmica, alta rigidez y peso ligero.

4.1.2 Material Termoplástico. Muchos poseen una larga cadena principal de átomos de carbono unidos covalentemente. A veces existen átomos de nitrógeno, oxígeno o azufre unidos por enlace covalente en la cadena molecular principal. Para ser conformados requieren la aplicación de calor previo al enfriamiento que les confiere la forma definitiva. Estos materiales pueden ser recalentados y reformados en nuevas formas varias veces, sin sufrir cambios significativos en sus propiedades [10].

4.2 POLIMERIZACIÓN

Unión de monómeros. Hay dos formas distintas que pueden dar lugar a una reacción de polimerización: el crecimiento de cadenas, que se conoce también como polimerización por adición, que involucra una rápida reacción en cadena de monómeros activos químicamente; y el crecimiento por etapas también conocido como polimerización por condensación, incluye reacciones químicas individuales que tienen lugar entre pares de monómeros reactivos y es un proceso mucho más lento que el de adición.

En cualquier caso, la característica crítica de un monómero que le permite unirse a moléculas similares y formar un polímero, es la presencia de sitios reactivos, es decir enlaces dobles (crecimiento de cadenas) o grupos funcionales reactivos (crecimiento por etapas) ^[11].

4.2.1 Polimerización por Condensación. Tiene lugar el enlace entre unidades monómeras, que deben tener al menos dos grupos funcionales; la polimerización transcurre mediante la reacción entre los grupos funcionales, usualmente de distinta naturaleza tales como hidroxilo -OH, cloruros de acilo -COCl, carboxilo -COOH, amina -NH₂, entre otros ^[12]; exige moléculas distintas, bifuncionales y reactantes en proporción estequiométrica, que se combinan durante la polimerización, con o sin la eliminación de subproducto, cuando hay productos secundarios por lo general es agua, o eliminación de una molécula pequeña, razón por la cual los polímeros de condensación tienen menos átomos en su unidad de repetición que en los reactivos y el esqueleto del mismo contiene átomos de más de una clase de elementos.

El grupo funcional resultante de la reacción de los grupos funcionales de los monómeros, forma parte de la cadena principal del polímero, repitiéndose ininterrumpidamente a lo largo de ella, en cualquier instante a lo largo de la polimerización, la mezcla de reacción consiste en una distribución continua de tamaños moleculares que comprende desde el mismo monómero hasta polímero de elevado peso molecular. El peso molecular del polímero crece de manera lenta a medida que aumenta el tiempo de reacción ^[13].

4.2.2 Polimerización por Adición. La reacción de crecimiento de cadenas emplea el monómero como materia prima; el monómero es químicamente insaturado es decir posee enlace doble capaz de formar polímeros.

El polietileno y otros polímeros sencillos de alqueno se llaman polímeros de cadena en crecimiento, ya que se forman en un proceso de reacción en cadena en la que un iniciador se adiciona a un enlace carbono-carbono doble para producir un reactivo intermediario. El intermediario reacciona con una segunda molécula de monómero para producir un nuevo intermediario, que reacciona con una tercera unidad de monómero y así sucesivamente ^[14].

La polimerización transcurre mediante la adición continua de monómero a una cadena en crecimiento, que contiene un extremo activado hasta el momento de su terminación, la reacción se da sin pérdida de materia, por lo que la unidad constitucional repetitiva del polímero y el monómero presentan una estequiometría idéntica, en cualquier instante a lo largo de la polimerización, la mezcla de reacción tiene una composición constituida por monómero y polímero de elevado peso molecular.

El monómero de partida, ya dicho que es una molécula con doble enlace o en anillo estable químicamente, normalmente es gas o líquido volátil a temperatura ambiente. La polimerización por adición se puede esquematizar con una serie de reacciones en cadena:

1. Iniciación $I - I \rightarrow 2I^*$
2. Crecimiento $I^* + CH_2 = CHX \rightarrow I - CH_2 - C^*HX$
3. Crecimiento $R_n^* + \text{monómero} \rightarrow R_{n+1}^*$
4. Terminación $R_b^* + R_p^* \rightarrow R_{n+p}$

La polimerización vía radical se inicia debido a la presencia de moléculas distintas del monómero, llamadas iniciador que con facilidad se descomponen formando radicales (moléculas con electrones desapareados) Reacción 1. Aunque mantienen neutralidad eléctrica trata de capturar electrones compartidos que fijan un monómero transfiriendo su inestabilidad al extremo siguiente de la cadena (Reacción 2). Esta etapa de crecimiento se repite sucesivamente (Reacción 3), hasta por recombinación de dos extremos de radical en crecimiento (Reacción 4) o por un fenómeno de transferencia al iniciador y el radical se desactiva.

La etapa de crecimiento es muy rápida, por lo que la vasija de reacción contendrá muy pocos radicales en crecimiento, habiendo más iniciador, monómero y polímero acabado; la concentración de iniciador y su velocidad de descomposición, dependiente de la temperatura controlan la velocidad global de polimerización y afectan inversamente a la longitud promedio de cadena ^[14]. Como variantes del proceso anterior, se emplean iniciadores aniónicos o catiónicos, que no se anunciarán.

4.3 ALEACIÓN POLIMÉRICA

Las aleaciones de polímeros están formadas por mezclas de homopolímeros (son constituidos por cadenas de polímeros compuestas de unidades sencillas repetidas)

estructuralmente diferentes o copolímeros (consisten en cadenas de polímeros compuestas de dos o más unidades químicas diferentes y repetidas, las cuales están en secuencias distintas). En las aleaciones de polímeros termoplásticos diferentes tipos de cadenas moleculares de polímeros están unidas por fuerzas dipolares secundarias intermoleculares.

En un copolímero dos monómeros están unidos en una cadena molecular por fuertes enlaces covalentes.

Los componentes de una aleación de polímeros deben tener algún grado de compatibilidad o adherencia para prevenir una separación de fases durante el proceso ^[10].

4.3.1 Dispersión. Los sistemas coloidales están constituidos por una fase dispersada (suspensión de partículas sólidas diminutas de una sustancia), y una fase dispersante o medio de dispersión (fase continua que es líquida). Si las partículas dispersadas se encuentran entre 1 μm y 1 nm, se puede decir que el sistema es una dispersión coloidal.

Existen dos subdivisiones de los sistemas coloidales, liofílicos y liofóbicos, los coloides liofílicos son siempre moléculas poliméricas de uno u otro tipo de forma que la solución está compuesta de una dispersión de moléculas únicas. La estabilidad del coloide liofílico es una consecuencia de las interacciones fuertes favorables disolvente-soluto. El proceso de disolución puede ser muy lento las primeras adiciones de disolvente son absorbidas lentamente por el sólido, que se hincha (esta etapa se conoce como imbibición); una adición posterior de disolvente con agitación mecánica (como en el caso de caucho en el disolvente) distribuye lentamente al disolvente y al soluto de manera uniforme.

Los coloides liofóbicos que repelen al solvente, son sustancias de alta insolubilidad en el medio dispersante, suelen ser agregados de pequeñas moléculas ^[15].

4.3.2 Solución. Una solución es una mezcla totalmente homogénea. Formada por dos o más sustancias puras y su composición puede variar dentro de ciertos límites. Una solución consiste en un soluto disuelto en un disolvente. El soluto es la sustancia disuelta en una solución por lo regular presente en menor cantidad; y el disolvente es la sustancia disolvente en una solución, por lo general presente en mayor cantidad que el soluto ^[16].

4.4 MONÓMERO

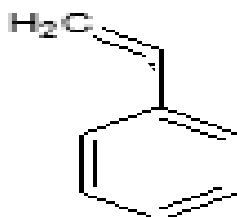
Compuesto molecular sencillo que se puede enlazar de modo covalente para formar largas cadenas moleculares (llamadas polímeros). El subíndice n es conocido como grado de polimerización de la cadena del polímero y es equivalente al número de subunidades en la cadena molecular polimérica ^[10].

4.4.1 Funcionalidad de un Monómero. Para polimerizar un monómero deben existir dos enlaces químicos activos. Cuando un monómero posee tales enlaces activos puede reaccionar con otros dos monómeros y por sucesivas uniones de otros monómeros del mismo tipo se puede formar una cadena larga de un polímero lineal. Si el monómero posee más de dos enlaces activos, la polimerización puede tener lugar en más de dos direcciones, y de este modo se abre la posibilidad a distribuciones en redes tridimensionales. (El número de enlaces activos que posee un monómero se llama funcionalidad del monómero, un monómero que utilice dos enlaces activos para la polimerización de cadenas largas se denomina bifuncional).

4.5 MONÓMERO ESTIRENO

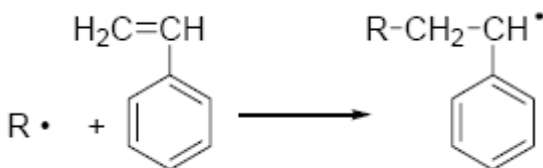
El estireno (Figura 1), es uno de los intermediarios químicos de más valor comercial y de gran consumo en la actualidad, aparte es uno de los monómeros más importantes en la producción de polímeros como las resinas, cauchos sintéticos y plásticos. La demanda de estireno se incrementa anualmente y su capacidad de producción mundial superó las 23 megatoneladas en el año 2009 ^[17].

Figura 1. Estireno Monómero

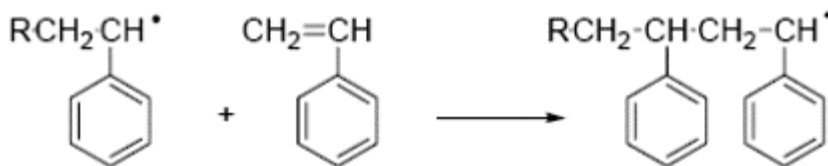


4.5.1 Polimerización del Estireno a Poliestireno. La polimerización se da vía radicalaria (Figura 2). En la etapa de iniciación debe formarse una pequeña cantidad de radicales libres, (resulta habitual la adición de un iniciador que es un compuesto que se descompone a temperaturas moderadas generando radicales libres). Uno de los radicales formados reacciona con el monómero estireno, para dar lugar a un nuevo radical libre que es el que va a iniciar el proceso de polimerización, de modo que se van adicionando sucesivamente unidades de monómero por el extremo de la cadena donde se encuentra el centro radicalario. (Es importante mencionar que la formación del radical libre en la posición bencílica es siempre más favorable ya que de esa manera el radical se encuentra conjugado con el anillo aromático).

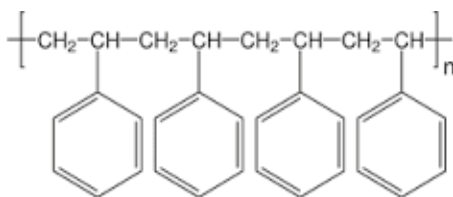
Figura 2. Polimerización del Estireno a Poliestireno



Estas reacciones que permiten el crecimiento de la cadena, forman la etapa de propagación.



La pérdida del carácter radicalario impide el crecimiento de la cadena polimérica, forma la etapa de terminación.



Fuente: LA FUENTE, Luis. V, Santiago. BURGUETE AZCÁRATE, María Isabel. Introducción a la química orgánica. Universitat Jaume I. Ed IV. Tíol. V. Serie 547. P 213.

Este proceso en cadena finalizará por combinación de dos radicales, sean ambos radicales polímeros, o bien un radical polímero y otro radical del iniciador, o por abstracción de un átomo de hidrógeno de otra molécula.

4.5.2 Propiedades, ventajas, usos, y aplicaciones del Poliestireno. El poliestireno es un polímero vinílico, producido por una polimerización vinílica por radicales libres a partir del monómero estireno. Estructuralmente es una cadena larga hidrocarbonada, con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono.

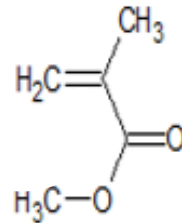
El poliestireno lineal es relativamente soluble en algunos disolventes orgánicos, pero la adición de pequeñas cantidades (aproximadamente 1%) de un agente de entrecruzamiento como el divinilbenceno da lugar a la formación de polímeros completamente insolubles (como el PS-DVB) ^[18].

El poliestireno homopolímero sin modificar es un material plástico transparente, inodoro, y relativamente frágil. La presencia del anillo fenileno en cada átomo de carbono de la cadena principal produce una configuración voluminosa rígida, con un impedimento estérico que determina la alta flexibilidad del material a temperatura ambiente. El PS es un Termoplástico que se caracteriza por su brillo, claridad, pero tiende a ser frágil. El poliestireno encuentra aplicación en el recubrimiento de interiores de automóviles, electrodomésticos, discos, manillares y utensilios de cocina en general ^[10].

4.6 MONÓMERO METILMETACRILATO

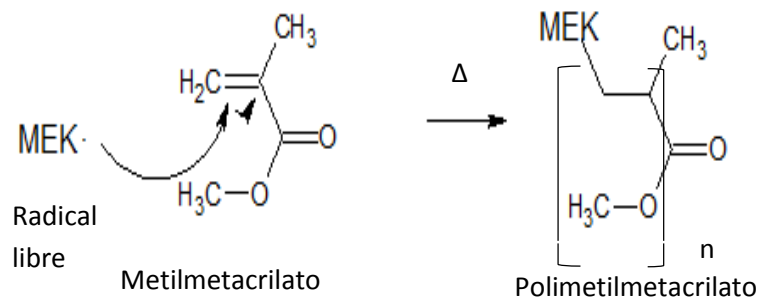
Es el monómero (Figura 3), del que está hecho el polimetilmetacrilato, conocido como Lucita, Plexiglás o Perspex.

Figura 3. Metilmetacrilato



4.6.1 Polimerización del Metilmetacrilato a Polimetilmetacrilato. La polimerización en bloque de un monómero líquido, como el metil metacrilato es relativamente sencilla en ausencia de oxígeno usando frascos o tubos de ensayo pequeños; como se muestra en la (Figura 4), se puede calentar el monómero en presencia de un iniciador para obtener plástico transparente que adopta la forma del recipiente, pero de tamaño ligeramente menor debido a la contracción. La mayoría de los monómeros se contraen durante la polimerización haciendo que la densidad de los polímeros sea mayor que la de los monómeros correspondientes [19].

Figura 4. Polimerización del Metilmetacrilato a Polimetilmetacrilato



4.6.2 Propiedades, ventajas, usos, y aplicaciones del Polimetilmetacrilato. Al fragmento básico de etileno hay unidos grupos voluminosos laterales, lo que hace que cadenas del polímero se dispongan juntas de una manera muy irregular. Como el sólido es amorfo a escala molecular no dispersa la luz cuando esta pasa a través de él. El polimetilmetacrilato es más transparente que el propio cristal así que se puede utilizar para hacer ventanas gruesas, necesarias cuando estas han de soportar presiones altas (como por ejemplo en acuarios) ^[20]. Se utiliza para poner cristales en aviones, embarcaciones, iluminación exterior y señales publicitarias. Entre otros usos en pantallas de seguridad, y gafas protectoras.

El polimetil metacrilato es un polímero vinílico, termoplástico duro, rígido, es más resistente al impacto que el vidrio, tiene también una buena resistencia química en entornos exteriores y resistencia al envejecimiento ^[10]

4.7 PROCESO DE CURADO

Uno de los sistemas empleados es el curado por calor, con posterior enfriamiento hasta que la película se solidifique. Este proceso de fusión en caliente o activación por calor del adhesivo, no presenta en general problemas de reducción de volumen. En este caso el procedimiento es una polimerización. El empleo de calor en las operaciones de curado se debe, al hecho de que si bien bastantes adhesivos pueden curar a temperatura ambiente, aunque esta reacción es tan lenta que no es viable industrialmente. El calor actúa entonces como acelerador de la reacción ^[21].

4.8 CATALIZADOR NAFTENATO DE COBALTO

Las soluciones de Cobalto son líquidas de color azul o morado, que se utilizan con los sistemas de iniciadores de MEKP (Metiletilcetona) o CHP (Hidroperóxido de Cumeno). Cuando se utilizan a temperaturas por debajo de 24°C, se recomienda diluir el cobalto en monómero de estireno antes de agregarlo a la resina; la dilución en estireno impedirá que se formen partículas pequeñas de cobalto y permitirá una mezcla uniforme [22].

El Naftenato de cobalto es usualmente ofrecido para uso con peróxido de metiletilcetona, pero el acelerador y el catalizador nunca deben mezclarse solos pues pueden causar una explosión; el punto de inflamación de ambos puede ser tan bajo como 20°C [23].

4.9 ACELERANTE MEK PERÓXIDO

El MEKP es el sistema de iniciadores que más se utiliza. Se utiliza con promotores generalmente con Naftenato de cobalto al 6% u Octoato de cobalto al 6% o 12% y dimetilnilina (DMA) o dietilnilina (DEA) [22].

La metiletilcetona (MEK) se obtiene, como subproducto en la oxidación de butano a ácido acético. Por adición de agua oxigenada se obtiene el peróxido de metiletilcetona como mezcla de isómeros, que junto con el peróxido de benzoílo, se cuenta entre los peróxidos más importantes cuantitativamente; su aplicación más importante es para el endurecimiento de resinas poliéster no saturadas pero se usa también como disolvente para pinturas y resinas, además para desparafinar los aceites lubricantes [24]

4.10 CAUCHO NATURAL

La materia prima es un líquido lechoso llamado látex (la fuente más destacada es el árbol Hevea), que es una suspensión que contiene partículas muy pequeñas de caucho; el látex se diluye hasta un 15% de contenido en caucho y se coagula con ácido fórmico, ya coagulado se comprime con rodillos para eliminar el agua y producir un material laminado.

El caucho (Figura 5), es un polímero de isopreno de elevado peso molecular, prácticamente todos los isoprenos tienen la configuración *cis*-1,4. Tienen la propiedad que pueden variar mucho sus dimensiones si son sometidos a tensiones, volviendo a las originales cuando se retira la deformación [25].

Figura 5. Caucho Natural



4.11 TECNICAS DE CARACTERIZACIÓN

4.11.1 Espectroscopía Infrarroja con Reflectancia Total Atenuada (IR/ATR). Un espectrómetro de Infrarrojo somete el compuesto muestra a radiación infrarroja en la banda de longitudes de onda de 2 a 15 micrómetros. Esta región se describe más a menudo en términos de número de onda (frecuencia), 5000 cm^{-1} a 670 cm^{-1} , que

es fundamentalmente el número de ciclos u ondas en una distancia de un centímetro, calculado como $1/\lambda$, con λ en centímetros. Aunque esta radiación es débil e incapaz de causar una alteración permanente en una molécula, suministra energía suficiente para que sus enlaces vibren por alargamiento (Vibración longitudinal), tijereteo, flexión, balanceo, torsión o coleo. Los átomos de una molécula se pueden concebir como ligados por resortes que se ponen en movimiento al aplicarse energía. Cuando la molécula se somete a radiación con frecuencias del orden de 5000 cm^{-1} a 670 cm^{-1} , absorbe sólo las que posee exactamente la energía que se requiere para causar una vibración en particular. Las absorciones de energía se registran como bandas en papel. Puesto que los distintos enlaces y grupos funcionales absorben energía a frecuencias diferentes, los espectros en el infrarrojo se aplican ordinariamente en el análisis cualitativo, es decir, en la determinación de los tipos de grupos que hay en una molécula [26].

La espectroscopia IR/ATR con reflectancia total atenuada, se trata de un accesorio de un solo rebote con cristal de diamante, lo que permite analizar cantidades de muestra muy pequeñas y casi de cualquier naturaleza gracias a la dureza del cristal que no se daña con este tipo de muestras [27]

4.11.2 Termogravimetría (TGA). La termogravimetría (TGA) es una técnica de análisis térmico en la que se determina la pérdida o ganancia de masa de una muestra en función de la temperatura. Se pueden definir tres clases de análisis termogravimétricos:

Análisis termogravimétrico isotérmico: en el que se mantiene la temperatura constante mientras se registran los cambios de la masa.

Análisis termogravimétrico cuasi isotérmico: en el que la muestra a analizar se calienta mientras la masa es constante y se estabiliza la temperatura mientras se van produciendo los cambios de masa.

Análisis termogravimétrico dinámico: en el que la muestra se calienta en una atmósfera controlada con una rampa de temperatura previamente fijada [28].

4.11.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). El microscopio de Barrido es un instrumento que dirige un haz de electrones a un punto exactamente focalizado de la superficie de una muestra y recoge la señal electrónica emitida por la muestra, que a su vez produce una imagen. Esta técnica proporciona información morfológica sobre la superficie de los polímeros [10].

4.11.4 Interacción con solventes. La solubilidad de una sustancia en un disolvente, es una propiedad física que depende de la estructura química de ambos compuestos. La similitud estructural suele ser un criterio acertado para predecir si un compuesto orgánico es o no soluble en un determinado disolvente. La estructura molecular condicionará el tipo de interacciones intermoleculares que se producirán entre el soluto y el disolvente y permitirá la solubilidad entre ambos, en mayor o menor proporción. Es necesario tener en cuenta, el tamaño molecular del soluto y del disolvente si se desea conocer con exactitud la posibilidad de la formación de una disolución, así como el carácter ácido o básico del medio en que se encuentran [29].

4.11.5 Ensayos Mecánicos

4.11.5.1 Ensayo de Impacto. Este ensayo consiste en golpear una probeta de forma y tamaños definidos, con un péndulo de energía conocida, este ensayo se corresponde con una fractura a alta velocidad y mediante él se determina la energía absorbida durante el proceso de rotura del material, cuyo valor equivale a la diferencia de la energía potencial inicial del péndulo y la que pertenece al mismo después de la rotura de la probeta. La resistencia al impacto de una probeta entallada se define como la energía de impacto absorbida por el material en el proceso de su rotura y referida a la superficie inicial de la sección transversal de la entalla se expresa en J/m², y se obtiene a partir de la siguiente ecuación 1:

$$R = \left(\frac{A}{X} * Y \right) * 10^3$$

Ecuación 1. Utilizada para calcular la resistencia al impacto, en donde *R* es la resistencia al impacto, *A*: Energía de impacto absorbida por la probeta entallada en Julios, *X*: Longitud de la probeta en milímetros, *Y*: Espesor de la entalla en milímetros.

Las características en impacto dependen de muchos factores, referidos unos a la naturaleza intrínseca del material (peso molecular, grado de cristalinidad, entre otros), y otros a la integridad del mismo (homogeneidad, presencia de burbujas, entre otros) [30].

4.11.5.2 Ensayo de Dureza. La dureza de un material se puede definir como su resistencia a la indentación permanente. Una buena dureza significa generalmente que el material es resistente al rayado y al desgaste [31].

El ensayo de dureza Shore, se utiliza para realizar principalmente ensayos sobre goma o plásticos blandos. El penetrador es una punta de acero de 1.25 mm de diámetro que se presiona sobre la superficie de la pieza de ensayo por la fuerza de un muelle. La longitud modificada del muelle (recorrido del muelle) al realizar esta operación es una medida de la dureza Shore. En el método Shore D se aplica una carga previa de muelle de 0.55 N; la punta de acero tiene la forma de un cono truncado (ensayo de goma dura). El coeficiente de rigidez c es de 4N/mm. En el método de Shore A, la medición se realiza sin carga previa de muelle con una punta de acero redondeada con forma de cono. El coeficiente de rigidez c es de 17.8 N/mm. A cada 0.025 mm de recorrido de muelle corresponden 100 unidades Shore [32].

4.11.5.3 Ensayo de Resistencia a la Flexión. Se usa para determinar la deformación sufrida por un material a velocidad constante, es el estudio de sus características en flexión. Mediante este ensayo se puede determinar, módulo de elasticidad, y resistencia máxima a la flexión. Primero el módulo de elasticidad viene dado por la pendiente en la parte inicial de la curva carga-elongación y debe considerarse únicamente como un valor aproximado del módulo de elasticidad de Young. Se expresa en MPa y está dado por la ecuación 2:

$$E_f = \frac{L^3}{4be^3} \left(\frac{dF}{dY} \right)$$

Ecuación 2: es empleada para calcular el módulo de elasticidad; donde L es la distancia entre apoyos (mm), b la anchura de la probeta (mm), e es el espesor de la probeta (mm), F es el incremento de la fuerza a la que se somete el material entre

dos puntos elegidos en la parte recta inicial de la curva carga-flecha, y corresponde a la diferencia de flechas perteneciente a $F(\text{mm})$.

Para la resistencia máxima a la flexión se define como el esfuerzo máximo de flexión que puede coincidir o no con el instante de la rotura. El valor de esta variable viene expresado en MPa y se obtiene a partir de la ecuación 3:

$$\sigma = \frac{3FL}{2be^2}$$

Ecuación 3: cálculo del esfuerzo máximo. Donde F : Carga en Newton, L : Distancia entre apoyos medida en milímetros, b y e : Dimensiones de la probeta en milímetros (anchura y espesor respectivamente)^[30].

5. METODOLOGÍA

5.1 CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA ATR DEL CAUCHO NATURAL, CATALIZADOR NAFTENATO COBALTO, ACELERANTE MEK PERÓXIDO, POLIESTIRENO POSTCONSUMO, MONÓMEROS ESTIRENO Y METILMETACRILATO SIN INHIBIDORES.

Estos compuestos se analizaron por medio de la técnica de IR/ATR, los componentes líquidos como: el estireno y el metilmetacrilato con inhibidores, el Naftenato de Cobalto y el MEK peróxido de cada uno se tomó, una gota para colocarlas una a una en el portamuestra de diamante del equipo IR; además para los componentes sólidos como el caucho natural y el poliestireno, se cortaron de tal manera, que quedaron pequeños trozos. Luego al final se colocaron en el equipo: espectroscopio de infrarrojo, marca Bruker, Serie Tensor 27, con celda ATR Platimun A225/Q de cristal de diamante, en el Laboratorio de Análisis de Instrumentación Química de la escuela de química. Las muestras son leídas por el equipo que a su vez proporciona el espectro para el respectivo análisis de las vibraciones de los enlaces.

5.2 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES DE POLIESTIRENO-ESTIRENO Y POLIESTIRENO-METILMETACRILATO

5.2.1 Poliestireno-estireno. La elaboración de esta solución a temperatura ambiente, requirió primero de un lavado del Estireno con NaOH al 5% para retirar los inhibidores de la polimerización (Figura 6), adicionándolos en un decantador de separación, la misma cantidad tanto del NaOH al 5%, como del estireno, en este

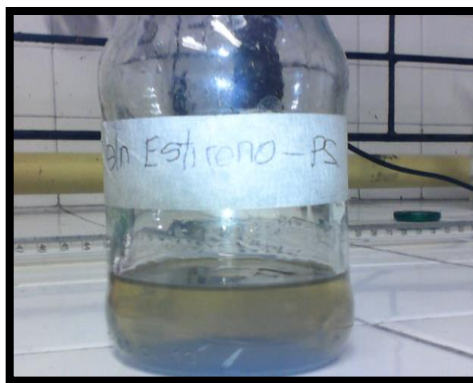
caso 100 mL de estireno y 100 mL de soda. De las dos fases que se formaron se recogió la soda, y se obtuvo el estireno sin inhibidores de color amarillo, embazado en un recipiente oscuro, para su posterior uso. Adicionalmente se retiró el H₂O que contenía el estireno, secándose con sulfato de calcio.

Figura 6. Lavado del Estireno para la eliminación de los Inhibidores



La segunda parte consistió en realizar la solución (Figura 7), pesando 20 g de PS, y 40 g (44 mL) de Estireno, los cuales se mezclaron formando una relación 1:2 peso a peso. Posteriormente se realizaron las relaciones 1:1, 1:3 de PS-S, con el fin de obtener la mejor solución.

Figura7. Solución PS-S



5.2.2 Poliestireno-MMA. Fue necesaria la eliminación de los inhibidores presentes en el MMA, llevándose a cabo una destilación simple (Figura 8), La temperatura de ebullición del MMA, corresponde a 101 °C.

Figura 8. Eliminación de los Inhibidores en el MMA



El procedimiento consistió en que, en un matraz de destilación se le adicionó 200 mL de MMA, y se ubicó en un montaje de destilación simple, donde se calentó, por medio de un baño de aceite a una temperatura de 115°C, en la cual se empezó a notar una ebullición constante del MMA dentro del matraz, posteriormente los vapores pasaban al refrigerante convirtiéndose en líquido (de MMA sin inhibidores), el cual se fue recogiendo, en un recipiente colector de vidrio ámbar, para su posterior uso.

Para la solución, se tomaron 20 gramos de PS y 40 gramos de MMA, los cuales al mezclarlos formaron una relación 1:2; seguidamente se elaboraron también las soluciones 1:1 y 1:3 de PS-S para conseguir la mejor solución (Figura 9).

Figura 9. Solución PS-MMA



5.3 ELABORACIÓN DE LAS DISPERSIONES DE CAUCHO-ESTIRENO, CAUCHO-MMA, CAUCHO-ESTIRENO-POLIESTIRENO, CAUCHO-METILMETACRILATO-POLIESTIRENO.

5.3.1 Dispersión de Caucho-Estireno. Para la elaboración se llevó a cabo a temperatura ambiente, se realizó una relación 1:17 que corresponde a 9.14 gramos de caucho natural y 155.38 gramos de estireno. En donde el caucho se hinchó en el estireno (Figura 10), por un tiempo de aproximadamente 168 horas (una semana, hasta lograr la mayor homogeneidad) con ayuda de agitación manual inicialmente, seguida de una agitación a motor (Figura 11).

Figura 10. Dispersión Caucho-S



Figura 11. Agitación a motor de la dispersión Caucho-S



5.3.2 Dispersión de Caucho-Metilmacrilato. A temperatura ambiente se elaboró la dispersión de tal forma que se pesaron 4.48 g de Caucho y 71.7 g de metilmacrilato, para conseguir una relación de 1:16. El caucho se hinchó en el metilmacrilato por un tiempo de 240 horas (10 días) en agitación manual y con el recipiente tapado para evitar la evaporación del metilmacrilato (Figura 12).

Figura 12. Dispersión de Caucho-MMA



5.3.3 Dispersión de Caucho-S-PS. Se incorporó a la dispersión de (Caucho-S 1:17), la solución de (PS-S 1:2), formando una relación de 1:1, a 25°C. Esta mezcla necesitó de una agitación continua, obteniéndose la dispersión de [Caucho-Estireno-(PS-S 1:2)].

Posteriormente se agregó a la dispersión de Caucho-S, las soluciones de PS-S 1:1 y PS-S 1:3, obteniéndose las dispersiones de [(PS-S 1:1)-Caucho-estireno] y [(PS-S 1:3)-Caucho-estireno] respectivamente.

5.3.4 Dispersión de Caucho-MMA-PS. En la formación de esta dispersión, se mezcló la solución de (MMA-PS 1:2), y la dispersión de (Caucho-MMA 1:16), generando una relación de 1:1, con una constante agitación. Formando la dispersión de [(PS-MMA 1:2)-Caucho-MMA]

Además la dispersión de Caucho-Metilmetacrilato, se mezcló con las soluciones de PS-MMA, 1:1 y 1:3, produciendo las siguientes dispersiones de [(PS-MMA 1:1)-Caucho-MMA], [(PS-MMA 1:3)-Caucho-MMA] respectivamente.

5.4 POLIMERIZACIONES CON EL CATALIZADOR Y EL ACELERANTE.

Para este proceso se necesitó la presencia del catalizador y del acelerante, puesto que por sí sola no se produce la polimerización, o se produce con mucha dificultad. Se utilizaron de esta forma para facilitar la reacción, los cuales se adicionan al momento de proseguir la polimerización por calor.

5.4.1 Estireno. Al estireno sin inhibidores se le adicionó una gota del catalizador (Naftenato de Cobalto al 5%), y una del acelerante (MEK peróxido), los cuales se mezclaron al adicionar uno por uno para evitar reacciones peligrosas. La temperatura de la estufa se gradúo a unos 130°C, (15°C por debajo de la temperatura de ebullición del S) y se dejó en calentamiento por nueve (9) horas, en la primera hora se agitaron las mezclas buscando homogeneidad en estas. Adicionalmente se prosiguió con el procedimiento de curado de 10 horas a temperatura de 60 °C.

5.4.1.1 Caucho-Estireno, Estireno-Poliestireno, Caucho-Estireno Poliestireno.

Para las mezclas de S-PS, Caucho-S, Caucho-S-PS se adicionaron gotas de acelerante y catalizador 4.68, 14.31, y 9.21 respectivamente. (Peso de 1gota de MEK 0.026 g, y el peso de una gota de Naftenato de Co, de 0.04 g). A estas mezclas también se adecuó la temperatura de la estufa a 130°C, el tiempo para la agitación fue de una (1) hora, y después se dejó en calentamiento por seis (6) horas más,

hasta polimerización de las muestras. Finalmente se dejó por diez (10) horas en tratamiento de curado a una temperatura de 60°C.

5.4.2 Metilmetacrilato. El proceso para la polimerización del monómero MMA, inicialmente se gradúo la temperatura en la estufa de aproximadamente 87°C. Al MMA se le añadió una gota tanto del catalizador Naftenato de Cobalto como del acelerante MEK peróxido.

Luego se dejó en calentamiento para su polimerización: Se introdujo a la estufa y durante una hora, cada quince minutos se iba agitando buscando una buena homogenización en la muestra. Después se procedió nuevamente a dejar en calentamiento hasta endurecer completamente y sin que presentara olores del monómero.

5.4.2.1 Caucho-Metilmetacrilato, Poliestireno-Metilmetacrilato, Caucho-Metilmetacrilato-Poliestireno. Teniendo las mezclas, se les adicionó las respectivas gotas del catalizador y acelerante según el peso de cada una; estos ensayos se llevaron a cabo de la siguiente forma. Se pesó 84.02 g de Caucho-MMA, PS-MMA, Caucho-MMA-PS y se le adicionaron 46 gotas del catalizador y del acelerante para los dos primeros, y 23 gotas para la tercera. Se agitó para que las gotas suministradas quedaran distribuidas en toda la mezcla. Seguidamente se llevaron a calentamiento y se realizó un procedimiento de agitación, realizándose por 1 hora y media, logrando la mayor homogenización posible. Finalmente se dejó de nuevo en calentamiento consiguiendo la polimerización a las 7 horas y media, a la temperatura de 79.05°C. Se le realiza además el procedimiento de curado a la temperatura de 60°C por un periodo de 11 horas.

5.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS POLÍMERIZACIONES.

5.5.1 Espectroscopía Infrarroja, con Reflectancia Total Atenuada (IR/ATR).

Para la caracterización por esta técnica, al comienzo se tomaron pequeñas partes de cada una de las muestras poliméricas se trituraron con ayuda de un mortero hasta reducir a polvo, lográndose que al colocar la muestra en el portamuestra del equipo que contiene un diamante, favoreciera un mejor contacto, obteniéndose de esta manera un mejor registro tomado del material en el equipo espectroscopio de infrarrojo marca Bruker, Serie Tensor 27, con celda ATR Platimun A225/Q de cristal de diamante.

5.5.2 Termogravimetría (TGA). Inicialmente se tomó una parte representativa de cada una de las muestras Caucho-S; Caucho-(PS-S 1:1) y Caucho-MMA Caucho-(PS-MMA 1:1), y se pesaron en una balanza termogravimétrica (Instrument 2050 V5.1A) (Figura 13). Con una velocidad de calentamiento 10 °C/min en un rango de temperatura de 25 a 700 °C, bajo una atmosfera de nitrógeno de flujo de 50 mL/min.

Figura 13. Balanza Termogravimétrica TGA



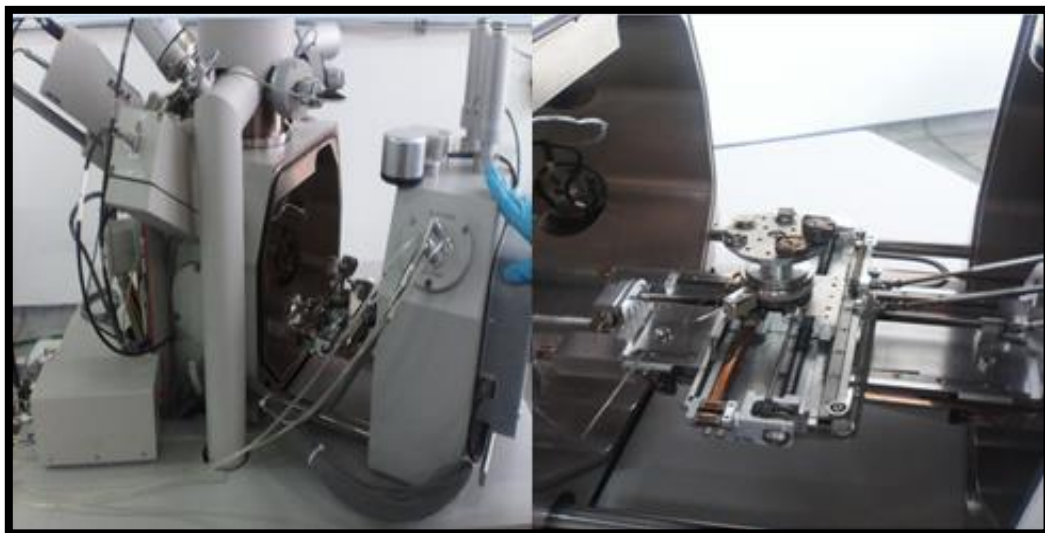
Fuente: UNIVERSIDAD DE JAÉN. [en línea] <http://www10.ujaen.es/conocenos/servicios-unidades/cict/balanza-termogravimetrica-at02>. [citado el 28 de Enero de 2015]

5.5.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Para el análisis microscópico, las muestras se llevaron a cabo: unas a alto vacío con recubrimiento en oro de 10 a 18 nm a (Caucho-S 1: 17), (PS-S 1:2), [Caucho-(PS-S 1:2)] ; y otras a bajo vacío con vapor de agua a (Caucho-MMA 1:16), (PS-MMA 1:2), [Caucho-(PS-MMA 1:2)], [Caucho-(PS-MMA 1:3)].

Inicialmente las muestras se colocaron sobre una cinta de carbono conductora en un porta muestra y se metalizaron con un recubrimiento de oro para mejorar la conductividad; listas las muestras se realizaron los análisis a alto vacío, colocando las muestras en el equipo microscopio electrónico de barrido serie Quanta FEG 650 (Figura 14), y con el detector ETD (secondary electrons). Bajo las siguientes condiciones analíticas. HV: 8-10 Kv; mag: 500, 5000, 20000; det: ETD; mode Custom; 100 μm , 10 μm , 4 μm QUANTA FEG 650.

Se prosiguió a pasar las otras muestras pero esta vez a bajo vacío; se tomó igualmente una pequeña parte de cada una de las muestras para llevarse a bajo vacío (con vapor de agua) en el equipo microscopio electrónico serie Quanta EFG 650 y con el detector LFD (Large Field Detector, imágenes SE, electrones secundarios), bajo las siguientes condiciones analíticas. HV: 10 kV; mag: 500, 5000.20000; det: LFD; mode SE; 200 μm , 20 μm , 5 μm QUANTA FEG 650.

Figura 14. Microscopio Electrónico de Barrido SEM



5.5.4 Interacción con solventes (Solubilidad). En esta prueba se usaron distintos solventes, polares, apolares, tales como éter de petróleo, tetracloruro de carbono, Thinner, Tolueno, Metanol, Benceno, Xileno, Ácido Nítrico, Hidróxido de Sodio al 5%, Ácido Acético y detergente, para determinar la resistencia química de las muestras Caucho-S, PS-S, Caucho-S-PS y Caucho-MMA, PS-MMA, Caucho-MMA-PS en determinados ambientes. Las muestras se cortaron y dispusieron en tubos de ensayo, luego se procedió a adicionar el correspondiente solvente y la muestra a temperatura ambiente y se taparon los tubos. Posteriormente se dejó que los solventes reaccionaran con las muestras por 30 días, y se observó y registró lo ocurrido en ellas.

5.5.5. Ensayos Mecánicos. La determinación de los diferentes parámetros mecánicos se obtiene mediante la realización de los correspondientes ensayos a las probetas del material.

5.5.5.1. Ensayo de Impacto. Para este procedimiento se tomó el molde de una probeta para disposición de esta prueba con las dimensiones requeridas, y se cortaron las muestras PS-S-Caucho, [Caucho-(PS-S 1:1)] y Caucho-S, para llevarlas a la máquina de impacto (figura 15).

Figura 15. Máquina de Impacto



5.5.5.2. Ensayo de Dureza. Para esta prueba se realizó el ensayo a las muestras de PS-S-Caucho, [Caucho-(PS-S 1:1)], Caucho-S, [Caucho-(PS-S 1:3)] y PS-S. Consistió en colocar el equipo durómetro Shore tipo D (Figura 16) sobre el material, dejando presionado el indentador o penetrador en forma de punta por unos segundos y sin golpe; tomándose el valor del resultado en las escalas que van de 0 a 100%.

Figura 16. Durómetro tipo D



5.5.5.3. Ensayo de Resistencia a la Flexión. Para esta práctica se cortaron las muestras Caucho-PS-S (1:1), Caucho-PS-S (1.2), Caucho-PS-S (1:3) y Caucho-S a las dimensiones demandadas por el equipo, (Las exigidas son: longitud de 65 mm a 75 mm; ancho hasta 15 mm; espesor entre 1 y 5 mm (preferible 1.75 mm)).

Las utilizadas fueron aproximadamente de: largo entre 60-67, ancho entre 8-13 y espesor entre 2-4.

***Método creado por las autoras del trabajo para la corrida de las muestras en el DMA.

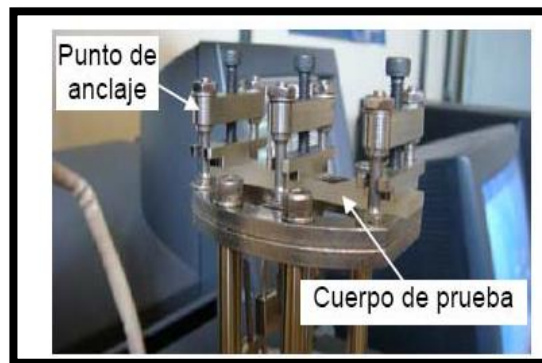
Nombre Esfuerzo / deformación

Lista de segmento

1. Equilibrar a 30 °C
2. Isotérmica durante 5 min
3. Rampa de fuerza 1, 000 N / min a 18.000 N

Posteriormente ya colocado el método, y probado con otras muestras de especie parecida, se realizó la prueba a dos cuerpos de la misma muestra (para cada una) pasándose en el equipo (TA Dynamic Mechanical Analyzer - DMA Q800, en el modo de flexión (Figura 17).

Figura 17. Montaje experimental DMA



Fuente: UNIVERSIDAD FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. [en línea]
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000500014> [citado el 16 de Enero de 2015]

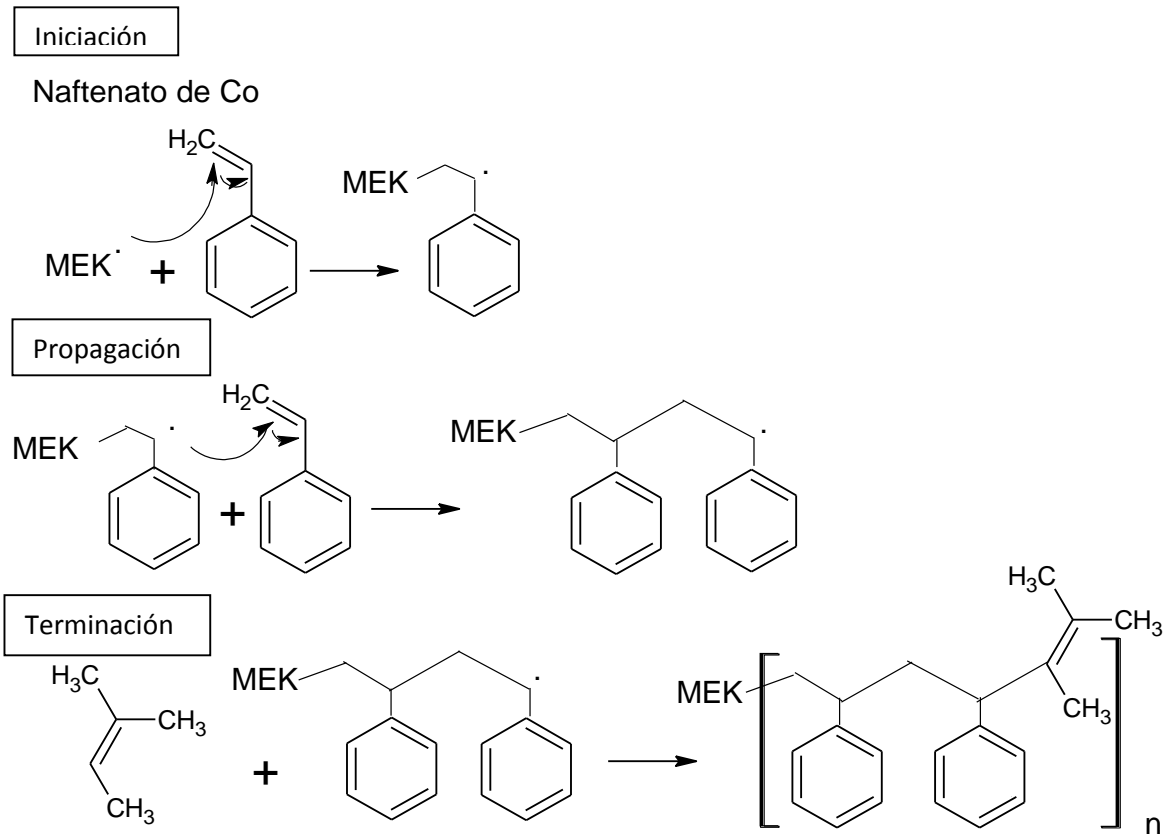
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Polimerización de las soluciones PS-S, PS-MMA y dispersiones Caucho-S, Caucho-MMA, Caucho-PS-S Y Caucho-PS-MMA

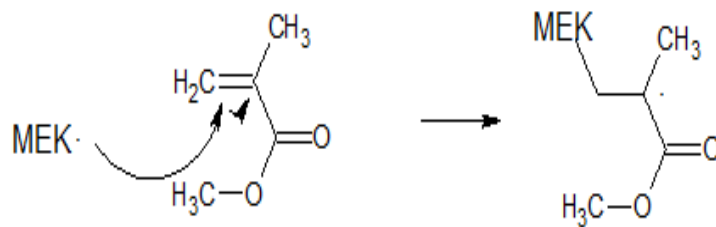
Inicialmente se realizaron los ensayos de polimerización con y sin catalizador y acelerante a las muestras de S y MMA. Los resultados obtenidos presentan que las muestras que no contenían al catalizador y el acelerante, se demoraban en polimerizar, además que reducían y no daban una buena polimerización debido a su poca homogeneidad.

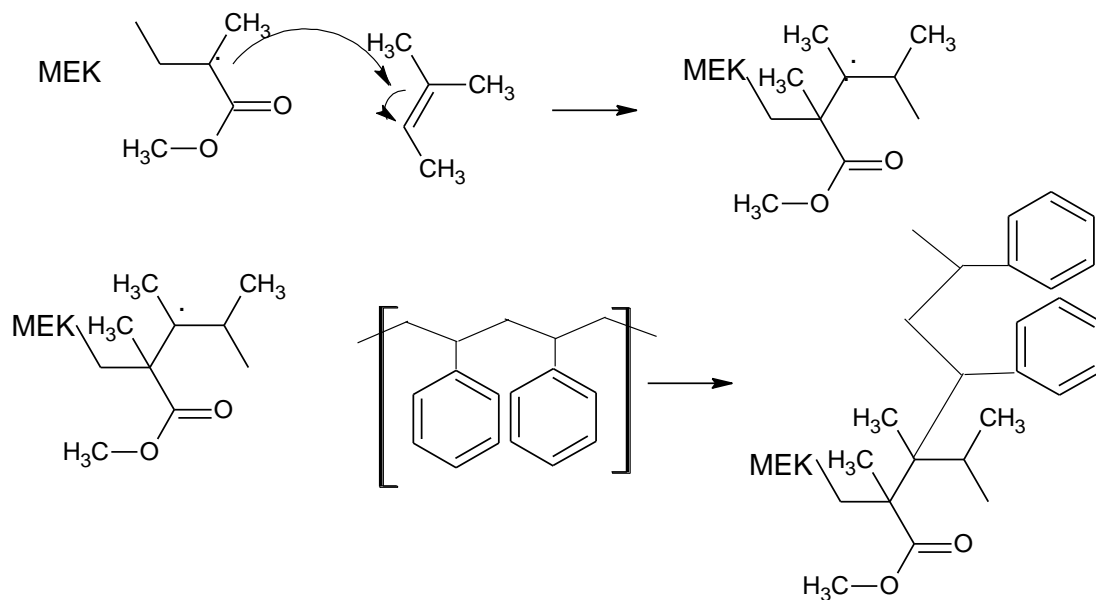
Esto se debió a que no está presente el catalizador que es el que controla la velocidad de la polimerización ni el acelerante, que da vía a los ensayos de mezclado de las dispersiones y soluciones. La reacción que ocurre es, el acelerante Mek con ayuda del catalizador Naftenato que no se consume, libera los radicales libres, uno de estos radicales debe reaccionar con el enlace doble del monómero (Estireno o Metilmetacrilato) y se formará un nuevo radical, que continuará hasta la formación de cadenas largas con la obtención de los copolímeros. Este mecanismo se muestra en las reacciones 1 y 2.

Reacción 1. Mecanismo de Reacción del Copolímero Caucho-S-PS



Reacción 2. Mecanismo de Reacción del Copolímero Caucho-MMA.PS





Obtenidas las polimerizaciones con el catalizador y el acelerante se prosiguió a determinar las características físicas de los polímeros como la homogeneidad y la consistencia.

Las muestras de estireno que si contenían al catalizador y acelerante presentaban homogeneidad, pero al inicio se formaron burbujas que luego de la polimerización y del proceso de curado desaparecían por el calor disipado en el material. Las muestras elaboradas con el metilmetacrilato y que también contenían al catalizador y acelerante no presentaban ninguna homogeneidad, debido a la porosidad de todo el material, con burbujas formadas debido a la acumulación de aire. Se buscó la forma de dar homogeneidad agitándolo pero era más la creación de burbujas que no desaparecían, luego de la polimerización ni del proceso de curado. Mostrado en la (Figura 19).

Para la muestra de caucho estireno con catalizador y acelerante hubo dos características particulares, quedó muy homogéneo y presentó adherencia del material al vidrio contenedor al romperse para adquirir la muestra, además presenta propiedades de aguante de impacto.

Para la muestra de Caucho-S-PS con el catalizador y acelerante, presentó homogeneidad, hay interacción entre la dispersión con la solución y mucho más con la agitación. En la (Figura 18) se puede observar que las muestras sin el catalizador y acelerante no tenían buena polimerización.

Figura 18. Polimerizaciones de las muestras con S, con y sin catalizador y acelerante



Figura 19. Polimerización de las muestras con MMA



Las muestras de MMA con y sin catalizador polimerizaban poco uniformes. La (Figura 19), muestra la evidencia de las muestras de MMA con catalizador y acelerante. Los resultados fueron enunciados atrás. Las muestras de MMA no se dejaron cortar para posteriores ensayos pues se rompen, por esta razón no se les realizaron pruebas mecánicas.

Figura 20. Polimerización de la muestras Caucho-S, S-PS, S-PS-Caucho, a mayores proporciones



Se llevó a cabo las polimerizaciones en mayores cantidades. Se representa en la (Figura 20), muestra de izquierda a derecha la dispersión de Caucho-S, adición de la solución de S-PS formando la dispersión S-PS-Caucho, finalmente su polimerización.

6.2 Caracterización por Espectroscopia Infrarroja con Reflectancia Total Atenuada (IR/ATR)

Para la realización de esta prueba se llevó a cabo bajo la norma ASTM E1252-98 para las muestras de PS-S en relaciones (1:1), (1:2), (1:3), y [Caucho (S-PS)] en relaciones (1:1), (1:2), (1:3), obteniendo los espectros de infrarrojo de cada una de ellas, con las bandas más representativas tabuladas en valores de número de onda cm^{-1} , debidos a las absorciones de las vibraciones de sus enlaces moleculares.

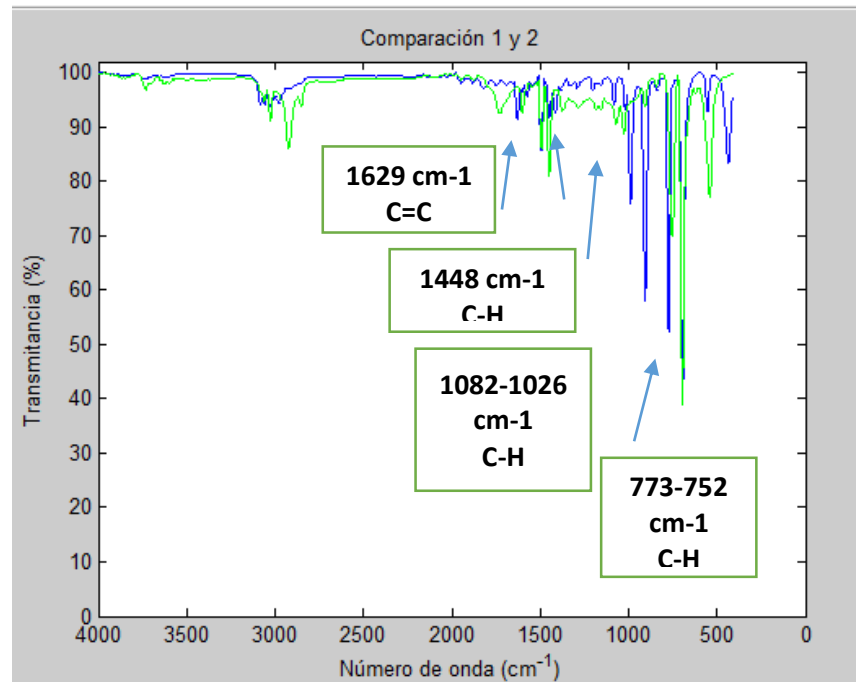
En los espectros se pueden apreciar las bandas características del Poliestireno postconsumo, el caucho, los monómeros S y MMA y los copolímeros Caucho-S, Caucho-S-PS, Caucho-MMA y Caucho-MMA-PS, en donde se evidencia la desaparición de los enlaces dobles y la formación de los sencillos ocurrido durante la polimerización.

Se enumeraran cada una de las muestras para una mejor comprensión:

1. Caucho-S en Dispersión
2. Caucho-S (1:2)
3. PS-S (1:1)
4. PS-S (1:2)
5. PS-S (1:3)
6. [Caucho-(PS-S 1:1)]
7. [Caucho-(PS-S 1:2)]
8. [Caucho-(PS-S 1:3)]

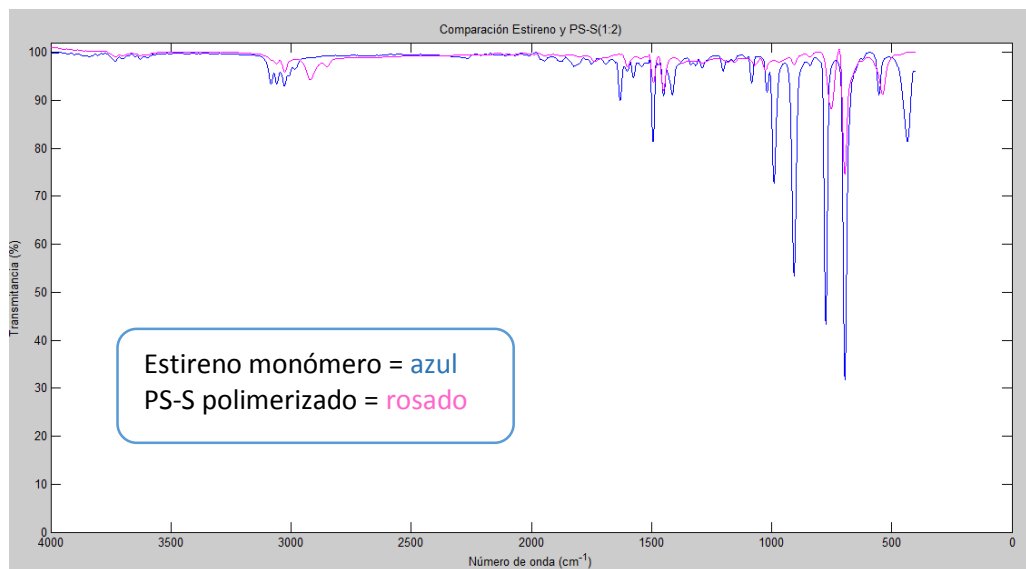
6.2.1 Comparación de los espectros IR del Caucho-Estireno, en Dispersión y Polimerizado. El análisis por el equipo de IR/ATR de las muestras 1 (en azul) y 2 (en verde), representado en el espectro de IR (1) se realiza una comparación en la que se refleja la compatibilidad o la aceptación del caucho en el estireno; exponiéndose los solapamientos de las bandas de las moléculas de caucho y estireno indicadas por medio de flechas que corresponden a los picos de $752\text{-}773\text{ cm}^{-1}$, 1026 cm^{-1} , 1082 cm^{-1} , 1448 cm^{-1} , 1629 cm^{-1} . Los resultados se pueden corroborar con los anexos A, B, C y D.

Figura 21. Espectro IR (1), de la comparación Caucho estireno, en 1) Dispersión y 2) Caucho-S (1:2) Polimerizado



6.2.2 Comparación de los espectros IR, del Estireno monómero y PS-S Polimerizado. El IR (2) pone de manifiesto la regla en la cual se ha basado la comprensión de los cambios en los espectros vibracionales de las moléculas, que menciona que “cuanto mas fuertes son los enlaces químicos, mayores son las frecuencias observadas”. Se muestra que el estireno monómero tiene fuertes dobles enlaces presentes en su estructura molecular, que no han desaparecido debido a que no se ha polimerizado, representado en el espectro intenso de color azul del IR (2), pero luego de su polimerización, (espectro de color rosado) con la presencia del poliestireno postconsumo en una relación de 1:2 (PS:S), la presencia del catalizador y del acelerante, más el proceso de curado, hacen que desaparezcan los dobles enlaces, demostrándose su buena polimerización. Se debe considerar que lo mismo ocurre con las demás polimerizaciones 1:1 y 1:3.

Figura 22. Espectro IR (2), de la comparación del Estireno monómero y PS-S polimerizado



6.2.3 Comparación de los espectros IR del PS-S (1:2) y PS-S (1:3). En el espectro IR (3) para las muestras 4 y 5, PS-S (1:2) y PS-S (1:3) respectivamente se aprecia la similitud en que aparecen los picos y también las diferencias; una de las diferencias puede ser las bandas de 989 y 1625 cm⁻¹ propias del monómero solvente estireno (anexo A, C, D y E), apreciándose en el espectro de color rojo, de la relación (1:3) muestra 5, pero no en el espectro de color azul para la relación (1:2) muestra 4. La otra diferencia es la intensidad de sus bandas.

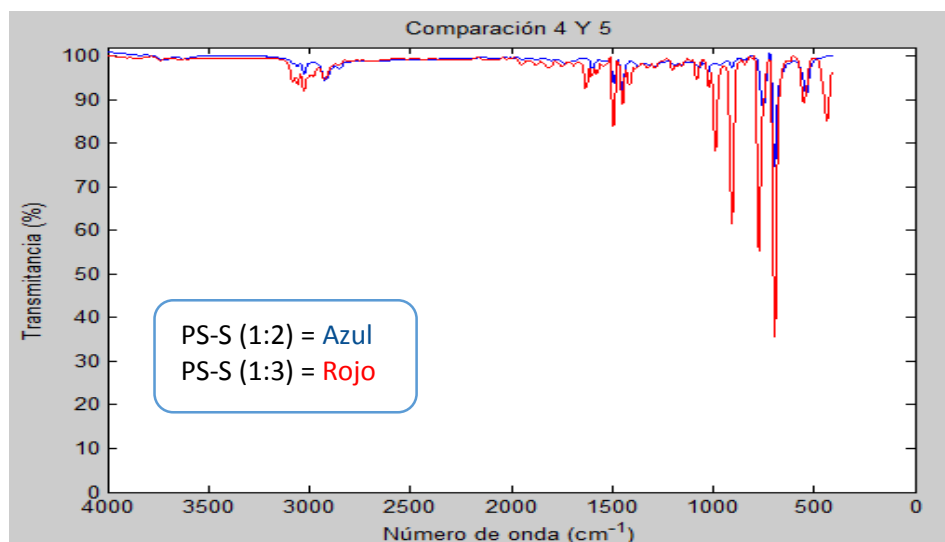
La existencia del estireno incluso luego de la polimerización y del proceso de curado en la muestra 5, de PS-S (1:3) verificado en el espectro IR (3) demuestra que no hubo una buena polimerización, debido a que pudo haberse adicionado más del estireno necesario para la polimerización.

Para solucionar el problema anterior se tendría que llevar a calentamiento por un periodo mayor de tiempo en el proceso de curado con una mayor cantidad de acelerante y catalizador.

Es importante mencionar que las relaciones (1:1), (1:2), y (1:3) se realizaron con la variación de la cantidad del monómero solvente estireno, ya que no fue posible modificar las proporciones respecto al poliestireno postconsumo, debido a que quedaba muy viscoso y no se podía realizar las polimerizaciones.

La muestra 4, PS-S (1:2) de color azul se ve en el espectro IR (3) claramente en donde se desaparecen las bandas de estireno monómero, ahora apareciendo solo las bandas en las que hay enlaces sencillos, de la molécula de poliestireno. Indicando que la muestras PS-S (1:2) tiene una proporción estimable para la polimerización.

Figura 23. Espectro IR (3) Comparación de PS-S (1:2) y PS-S (1:3)



6.2.4 Comparación de los espectros IR de PS-S (1:1), PS-S (1:2), PS-S (1:3), [Caucho-(PS-S 1:2)] y [Caucho-(PS-S 1:3)]. En el espectro (Figura 24), se aprecian los espectros de las muestras 3), 4), 5), 7) y 8) correspondientes a:

PS-S (1:1) **Azul**, PS-S (1:2) **Celeste**, PS-S (1:3) **Amarilla**, [Caucho-(S-PS 1:2)] **Negra** y [Caucho-(S-PS 1:3)] **Morado**.

De acuerdo a los datos mostrados en la Tabla 1, se realiza el análisis para cada una de bandas, observando la presencia de similitudes de las absorciones. Las absorciones de las bandas pueden corroborarse con el anexo A.

Los picos $752-773\text{ cm}^{-1}$ son asociados a la vibración de flexión del enlace C-H fuera del plano para el benceno monosustituído que corresponde al poliestireno; pero a la vez pudo haberse solapado con el pico 742 cm^{-1} del caucho (Pico también para los alquenos C=C, siendo el caucho un *cis*-1,4 poliisopreno) para las muestras que contienen caucho (7 y 8), este pico todas las muestras lo contienen pero unas más intensas que otras se ve claramente que son la azul y la amarilla.

De manera adicional aparecen picos en 906 y 695 cm^{-1} proporcionados por las vibraciones fuera del plano del enlace C-H del anillo aromático que contiene la molécula de poliestireno. Lo contienen todas las muestras a excepción de la muestra 8 de [Caucho-(PS- Estireno 1:3)] que no lo contiene (anexo F).

Aparece también la absorción del pico en 1026 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones del enlace C-H perteneciente a la molécula de poliestireno mostrado

en el anexo A, que además se pudo haber solapado con la banda del caucho de 1037 cm^{-1} .

Se presenta un pico en 1019 cm^{-1} para las muestras 4, 6, 7 del enlace C-H. La aparición del pico en 1370 cm^{-1} se da por la vibración de flexión en el plano del enlace C-H del grupo metilo banda de la molécula de caucho, se puede rectificar en el anexo A.

Además se puede ver la señal de la banda en 1448 cm^{-1} de la vibración del enlace C-H de la molécula de poliestireno que se pudo haber solapado con la señal de absorción del caucho en 1446 cm^{-1} . En las bandas de 1492 y 1600 cm^{-1} se presentan vibraciones del enlace C=C del anillo aromático del benceno que contiene el poliestireno, y como consecuencia de la conjugación del mismo.

A 2850 cm^{-1} presenta un pico de absorción del enlace C-H del grupo metilo presente en la molécula de caucho mostrado en los anexos A y D.

Se observan las vibraciones de tensión de los enlaces C-H de los CH_2 de la molécula de poliestireno en un pico de absorción en 2921 cm^{-1} , que pudo haberse solapado con el pico de 2918 cm^{-1} de la molécula de caucho.

Finalmente se presenta la banda en 3026 cm^{-1} como consecuencia de la vibración de tensión del enlace C-H de la molécula de poliestireno, pico presente en todas las muestras excepto la 6 [Caucho-(S-PS 1:1)] que no aparece en el espectro IR (4). Esto evidencia que no hay enlaces dobles conjugados con el anillo de benceno y

otros grupos insaturados; no está presente porque quiere decir que el Estireno si polimerizó bien a Poliestireno, unido al caucho. Presente en todas las bandas excepto la 6. Anexo G.

Figura 24. Espectro IR (4) de la comparación PS-S (1:1), PS-S (1:2), PS-S (1:3), [Caucho-(PS-S 1:2)] y [Caucho-(PS-S 1:3)]

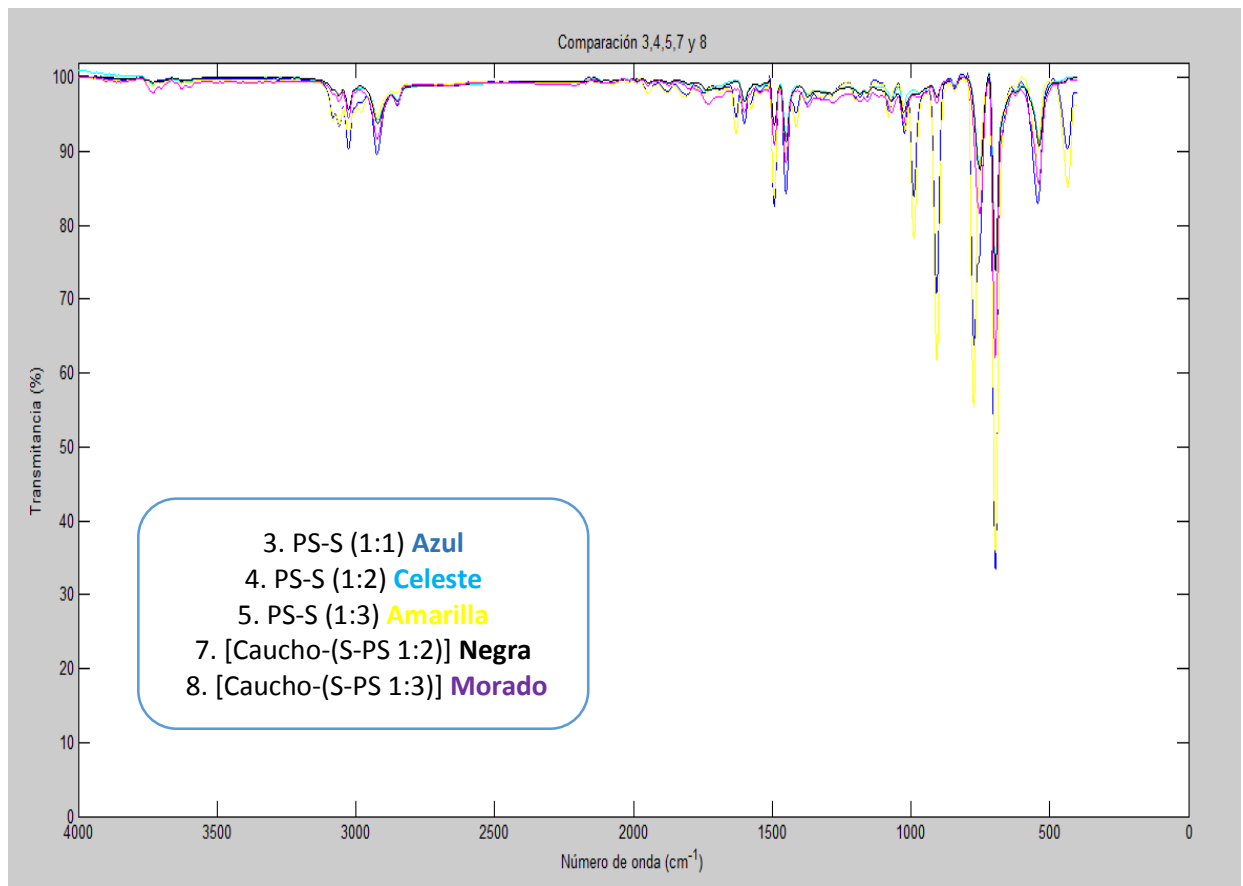


Tabla 1. Bandas de absorción del IR con las vibraciones de las Muestras de Caucho-S, PS-S (1:1), (1:2), (1:3), Caucho (PS-S 1:1) y (1:2), (1:3).

Número de Onda cm-1	Tipo de vibración	Muestra que lo contiene
3026.83	Vibración de Tensión del C-H (3100-2750)	1,2,3,4,5,7,8
2921.97	Vibración de Tensión del C-H (3100-2750)	2,3,4,6,7,8
2850.35	Vibración de Tensión del C-H (3100-2750)	2,7
1600.10	Vibración de Tensión del C=C para los aromáticos (1600-1475)	2,3,4,7, 8
1491.79	Vibración de Tensión del C=C para los aromáticos (1600-1475)	1,2,3,4,5,6,7
1448.96	Vibración del enlace C-H	1,2,3,4,5,6,7,8
1370.61	Vibración de Flexión del C-H para los alquenos (1450-1375)	2,7
1082.33	Vibración de Flexión en el plano del C-H	1
1026.70	Vibración de Flexión en el plano	2,4,7,8
1019.67	Vibración del C-H	1
989.59	Vibración de Flexión en el plano	1,3,5
906.60	Vibración de Flexión fuera del plano del C=C	1,2,3,4,5,7
762.50	Vibración del enlace C-H	1,2,3,4,5,6,7
695.23	Vibración de Flexión fuera del plano	1,2,3,4,5,6,7,8

6.2.5 Análisis de las muestras [Caucho-(MMA-PS 1:1)], PS-MMA, [Caucho-(PS-MMA 1:3)]. De acuerdo a los datos mostrados en la Tabla 2, se observó que presentan bandas características del grupo éster correspondiente al metil metacrilato, como lo son: tensión del C=O, las tensiones simétricas asimétricas del C-O-C, comparados con el espectro teórico del Metil metacrilato (Anexo H). Además se notan algunas bandas pertenecientes a los grupos aromáticos como lo son, la tensión –C=C en 1600 cm⁻¹, así como la flexión del=C-H fuera del plano en 900-690 cm⁻¹, las bandas debidas a la mono sustitución del anillo presente en el poliestireno. También se notan bandas pertenecientes a los metilos, como la deformación

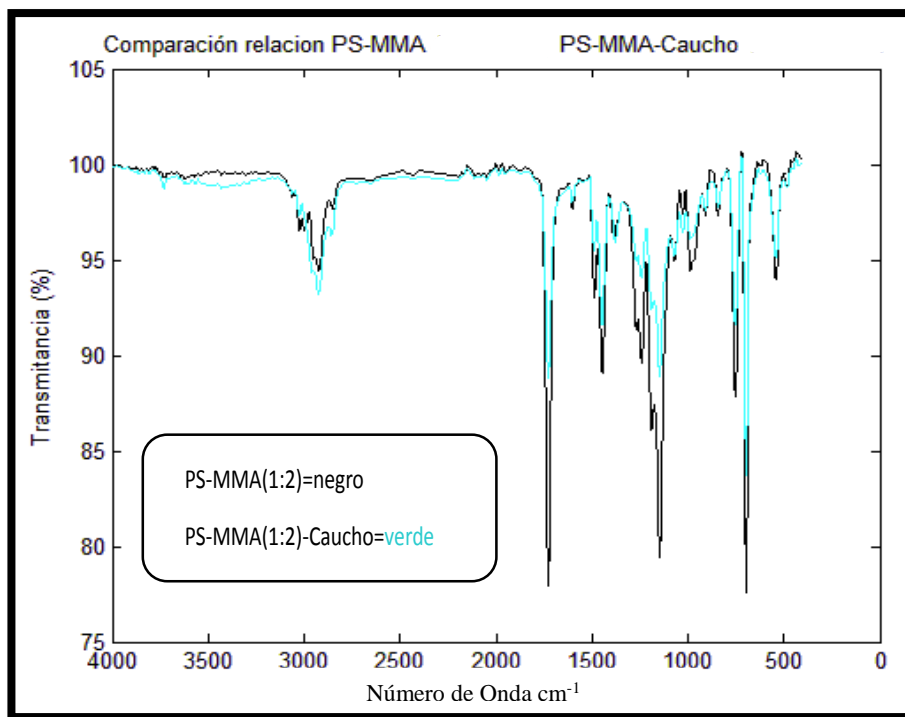
simétrica del C-H, flexión del C-H. Obteniendo en los resultados, que si se trata de los polímeros que se deseaban obtener.

Tabla 2. Bandas de absorción del IR con las vibraciones de las muestras de metilmetacrilato.

PS-MMA- Caucho, sólida	Caucho- MMA- PS(1:1), Sólida	PS-MMA, Sólida	Caucho-PS- MMA(1:3), Sólida	Tipo de Vibración
Número de onda cm^{-1}	Número de onda cm^{-1}	Número de onda cm^{-1}	Número de onda cm^{-1}	
3025.84	3026.12	3024.4		
2924.40	2922.81	2923.62	2924.13	Vibración asimétrica del átomo de H.
1727.62	1728.03	1727.60	1726.60	Vibración de Tensión del -C=O.
1601.89	1601.08	1601.14		Vibraciones del esqueleto del anillo aromático,-C=C
1489.21	1490.39	1487.64	1486.54	Vibraciones de Flexión del C-H
1448.47	1448.38	1446.76	1446.18	Deformación asimétrica del C-H.
1377.93	1380.12	1385.38	1385.80	Deformación simétrica del C-H
1242.23	1241.66	1241.46	1240.87	Torsión del C-H
1189.34	1189.34	1189.70	1189.35	Tensión asimétrica del C-O-C
1147.49	1147.27	1147.06	1146.15	Tensión simétrica del C-O-C
1069.52	1068.47	1069.03	1067.51	Tensión simétrica del C-O-C
1026.77	1026.97	1026.93	1025.26	Vibración de flexión del C.-H
986.73	986.12	987.08	986.97	Balanceo del C-H
842.33	842.65	843.00	842.20	Deformación del C-H
752.76	753.09	752.65	752.69	Monosustitución, flexión del C-H
696.76	697.26	696.92	697.34	Flexión o aleteo de C-H fuera del plano

Además se realizaron las siguientes comparaciones de los espectros de las soluciones y dispersiones del MMA: PS-MMA(1:2) con el PS-MMA(1:2)-Caucho (Figura 25); PS-MMA(1:2) con el PS-MMA(1:3) (Figura 26) y PS-MMA (1:1) con el PS-MMA(1:3) (Figura 27).

Figura 25. Comparación del PS-MMA, PS-MMA(1:2)-Caucho



En los espectros anteriores los cuales se observó las bandas características de los dobles enlaces C=C, como son 1601 cm⁻¹, y 986-752 cm⁻¹. La (Figura 25) se observa que estas bandas mencionadas anteriormente para el PS-MMA(1:2)-Caucho de color verde, presentan una menor intensidad, resultado de una menor cantidad de dobles enlaces residuales, es decir hubo una mejor polimerización en comparación con la del PS-MMA (1:2), bandas que mostraron esa mayor intensidad debido a que no interaccionaron los dobles enlaces con los radicales libres del MEK.

Figura 26.Comparación del PS-MMA(1:2), PS-MMA(1:3)

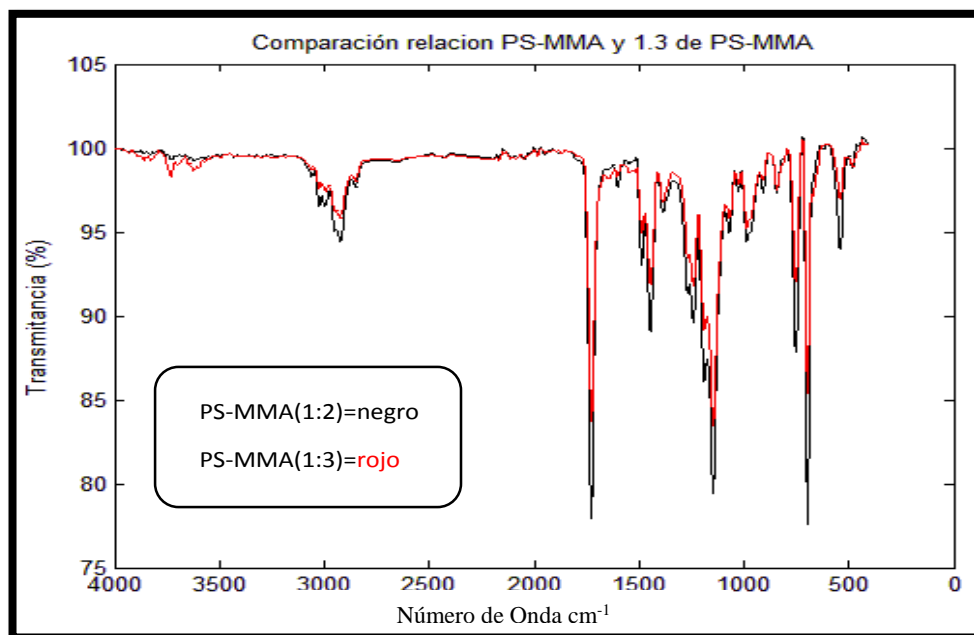
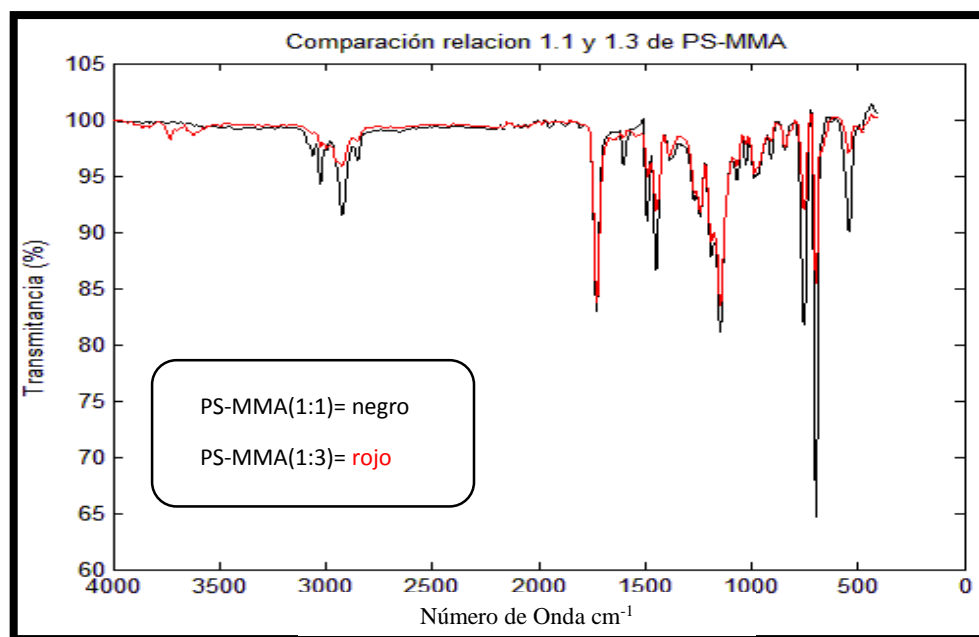


Figura 27.Comparación del PS-MMA(1:1), PS-MMA(1:3)



Con respecto a los espectros de las (Figuras 26 y 27) de color rojo de ambos, corresponde al de PS-MMA(1:3), el cual presenta una mejor polimerización, debido que las bandas de absorción características de los dobles enlaces, mencionadas anteriormente Tabla 2, son menos intensas ya que interaccionaron en una mayor cantidad los dobles enlaces con los radicales libres del MEK, generando menos enlaces dobles del C=C residuales.

6.3 TEMOGRAVIMETRÍA (TGA)

El análisis termogravimétrico para las muestras de Caucho-S (1:17), Caucho-(Estireno-Poliestireno 1:1)], Caucho-MMA (1:16) y Caucho-(MMA-Poliestireno 1:1)] es mostrado en las gráficas 1, 2, 3,4. En los cuatro termogramas se aprecian las pérdidas de masa con el aumento de la temperatura de cada muestra, describiendo la temperatura de descomposición.

La mayoría de los termogramas, en general describen tres regiones distintas en que se determinan los rangos de temperatura.

En la primera región hay una pérdida en peso del material, que corresponde a pérdidas de agua, volatilización de componentes de menor punto de ebullición, y compuestos de menor peso molecular.

La segunda región corresponde a la degradación térmica o el rompimiento del entrecruzamiento de los enlaces.

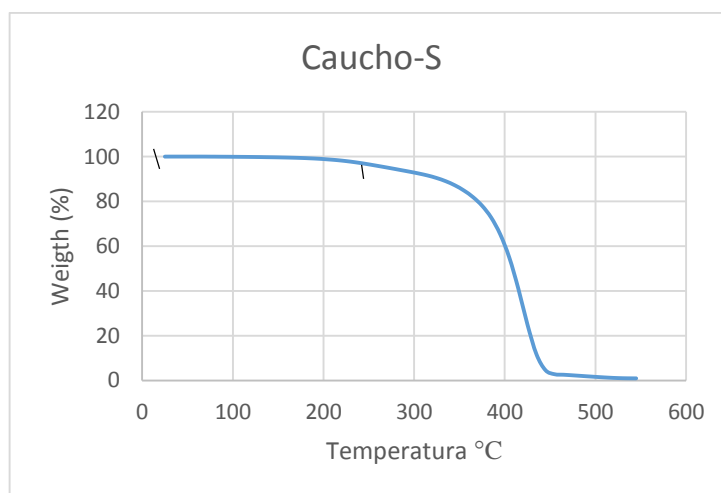
La tercera región se da la completa descomposición de las redes poliméricas que corresponden a la temperatura de degradación.

En la tabla 3, se presentan tabuladas las temperaturas en la que los materiales comienzan a termodegradarse indicando la temperatura inicial y final de la pérdida de peso. La temperatura inicial de pérdida en cada muestra se determinó por medio de la intersección de las tangentes de la curva antes y después de las pérdidas de peso.

Tabla 3. Resultados de la Termodegradación para el Caucho-S

Caucho-S Peso de la muestra: 14.6330 (mg)			
Rango de Temperatura (°C)	Δ pérdida de peso %	% Pérdida de Peso	Pérdida de Peso mg
25-245	99.99-96.85	3.14	0.4594
245-545	96.85-0.9449	95.905	14.033
RESIDUO		0.1382	

Grafica 1. TG 1 Caucho-estireno



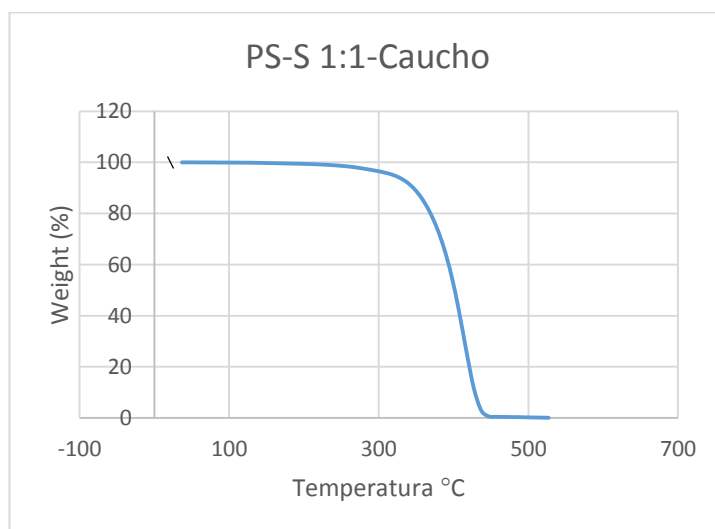
El análisis del TG 1. De la muestra Caucho-S, presenta el inicio de la pérdida de peso a una temperatura de 25 °C hasta presentar una pérdida de 0.4594 mg que puede ser por humedades y sustancias volátiles (Mek, naftenato, estireno monómero, temperatura de ebullición del S es de 145 °C). Cuando la temperatura está a 245 °C inicia una pérdida estimable en masa de 14.033 mg, en la que el caucho empieza a degradarse, manifestándose finalmente la descomposición total de la muestra a una temperatura de 545 °C.

Tabla 4. Resultados de la Termodegradación para [Caucho-(Estireno-Poliestireno 1:1)]

[Caucho-(Estireno-Poliestireno 1:1)] Peso de la muestra: 11.1550 (mg)

Rango de Temperatura (°C)	Δ pérdida de peso %	% Pérdida de Peso	Pérdida de Peso mg
37-527	100-0.0624	99.937	11.14
RESIDUO		6.96*10 ⁻³	

Grafica 2. TG 2 [Caucho-(Estireno-Poliestireno 1:1)]



Comparando los resultados anteriores de la muestra del TG 1, con los resultados del TG 2 de la muestra [Caucho-(S-poliestireno 1:1)], se observa que para esta última (TG 2) presenta el inicio de pérdida de peso a una temperatura de 37 °C, 12°C por encima de la del TG 1, revelando que la presencia del poliestireno postconsumo le proporciona a la muestra una mayor estabilidad térmica.

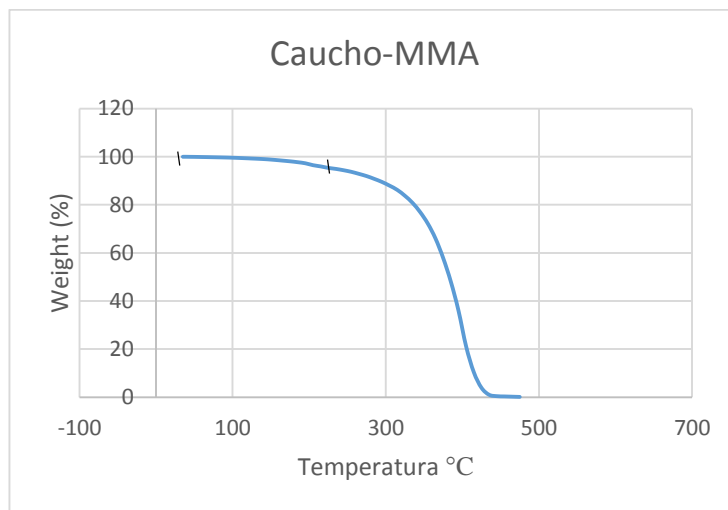
La continua descomposición de la muestra del TG 2, pone en evidencia que posiblemente no hay presencia de humedad ni de estireno, considerándose de esta forma que hubo una buena polimerización.

Por último se evidencia una degradación completa o total de la muestra a una temperatura de 527 °C menor que la anterior (TG 1) 18 grados por debajo, (lo que permite deducir que tienen una degradación similar), con una pérdida de masa de 11.14 mg que puede ser de poliestireno postconsumo y caucho natural.

Tabla 5. Resultados de la Termodegradación para Caucho-MMA

Caucho-MMA		Peso de la muestra: 18.3130 (mg)		
Rango de Temperatura (°C)	Δ% pérdida de peso	pérdida de peso	Pérdida de Peso mg	
35-235	99.97-94.91	5.06	0.926	
235-475	94.91-0.1418	94.768	17.354	
RESIDUO		0.025		

Grafica 3. TG 3 para Cucho-MMA



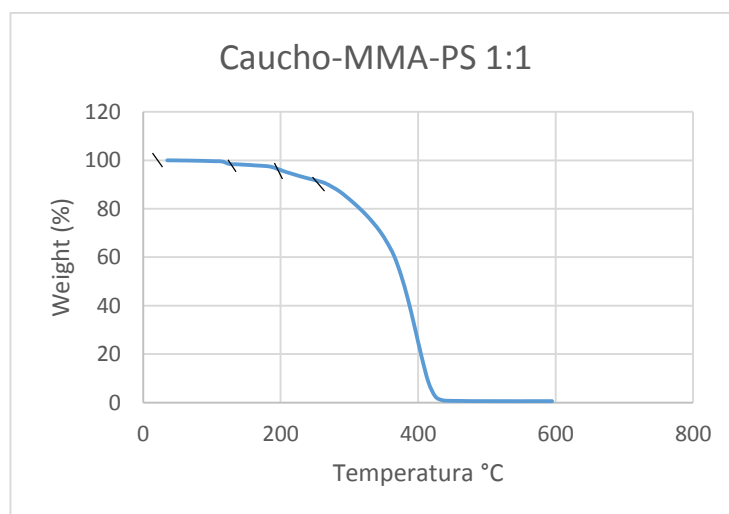
Para el análisis en el TGA 3, de la muestra de Caucho-MMA se puede apreciar que inicia la pérdida de peso a una temperatura de 35°C, hasta presentar una pérdida de masa 0.926 mg que puede ser por volatilización del H₂O, del monómero MMA (Temperatura de ebullición de MMA es de aproximadamente de 101 °C) y también del PMMA (Temperatura de ebullición del PMMA es de aproximadamente de 200 °C). Cuando la temperatura se encuentra a 235° C inicia una pérdida de 17.354 mg, en la que el caucho natural empieza a degradarse, indicando finalmente la descomposición completa de la muestra a una temperatura de 475 °C. Demostrando una menor resistencia a la degradación comparándose con los TG 1 y 2, de las muestras elaboradas con estireno monómero (anteriores) que son de temperaturas 545 y de 527 °C respectivamente.

Tabla 6. Resultados de la Termodegradación de [Caucho-(MMA-PS 1:1)]

Caucho-(MMA -Poliestireno 1:1)] **Peso de la muestra:**
10.7200 (mg)

Rango de Temperatura (°C)	Δ% pérdida de peso	pérdida de peso %	Pérdida de Peso mg
35-125	100-98.53	1.47	0.157
125-205	98.53-95.45	3.08	0.330
205-275	95.45-89	6.45	0.691
275-595	89-0.5879	88.412	9.477
RESIDUO		0.06	

Grafica 4. TG 4 [Caucho-(MMA-Poliestireno 1:1)]



El TG 4 de la muestra [Caucho-(MMA-poliestireno 1:1)] muestra cuatro pérdidas de masa. Se presenta el inicio de la pérdida de peso a una temperatura de 35 °C (una temperatura menor que la de [Caucho-(S-poliestireno 1:1)] que es de 37 °C), hasta presentar una pérdida de peso de 0.157 mg que puede ser por volatilización del

agua y del monómero MMA si todavía estuviera presente. Cuando la temperatura se encuentra a 125 °C inicia una pérdida en masa de 0.330 mg, en que empieza a degradarse el polimetilmetacrilato (Temperatura de ebullición del PMMA es de aproximadamente de 200 °C). Así mismo cuando la temperatura está a 205 °C inicia una pérdida en masa de 0.691 mg, en la que el poliestireno postconsumo empieza a degradarse; además cuando la temperatura se encuentra a 275 °C inicia una pérdida significativa en masa de 9.477 mg, en la que el caucho natural comienza a termodegradarse, presentándose finalmente la descomposición total de la muestra a una temperatura de 595 °C, esto representa una resistencia de degradación mayor que las demás muestras.

6.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Para la realización de esta técnica, para aquellas muestras que no son conductoras se han desarrollado una gran variedad de técnicas que permiten obtener imágenes SEM, las más comunes implican el recubrimiento de la superficie de la muestra con una película metálica delgada obtenida por el método conocido como “sputtering” o por evaporación a vacío.

Debido a que las muestras obtenidas no son conductoras se realizó el procedimiento mediante dos tipos de análisis a alto vacío con recubrimiento en oro y a bajo vacío con vapor de agua. La técnica SEM permitió distinguir las características estructurales interfaciales de las muestras a nivel micro.

Para las muestras de Caucho-S, PS-S, Caucho-S-PS se realizaron los análisis mediante Alto vacío (Con cobertura de oro) y para las muestras de: Caucho-MMA,

PS-MMA, PS-MMA-Caucho, Caucho-(PS-MMA1:3), se realizó mediante el análisis a Bajo vacío (Con vapor de agua, presión=90 Pa).

6.4.1 Análisis a alto vacío-Con recubrimiento en oro. Debido a que las muestras no son conductoras, se les realizó un recubrimiento con oro para hacer conductiva la superficie de la muestra y reducir el deterioro por radiación. De esta forma se obtienen las mejores condiciones de imagen, se intensifican y hay una mejor resolución y contraste.

El principio de operación es que el cañón de electrones, produce un haz de electrones en una columna al vacío, y el haz barre una pequeña área de la superficie de la muestra.

El recubrimiento en oro se hizo de 10 a 18 nm de espesor, en donde a varias de las muestras fue levantado el recubrimiento de oro que tenía al hacerse el disparo de electrones, en estas ocasiones se hacía el disparo en otro sitio de la superficie del material y se proseguía más rápido a su análisis en el equipo de registro. (Los electrones son dirigidos sobre la muestra y atraídos por el sistema detector ETD de voltaje positivo de 250 V, para intensificar la señal y neutralizar la carga de la superficie).

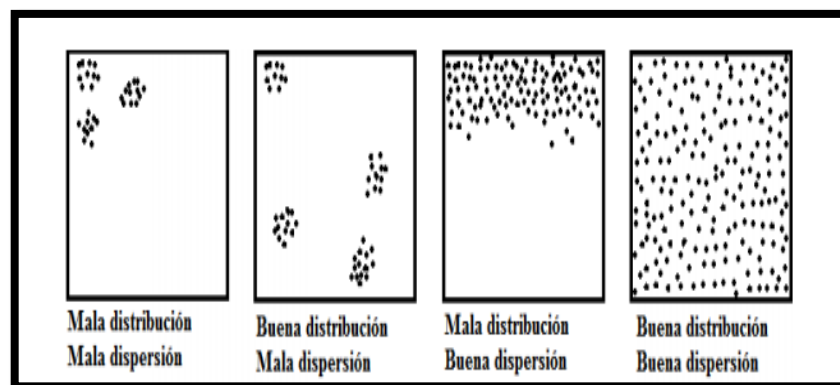
6.4.2 Análisis a bajo vacío-con vapor de agua. Las características que presentan las muestras en este análisis son las mismas, que no son conductoras y que además son sensibles al disparo de los electrones. El detector LFD se encuentra en una cabina con vapor de agua. El principio de operación es el mismo que el de alto vacío, los electrones con un ángulo pequeño interactúan con la superficie de la

muestra y generan una dispersión de electrones secundarios (SE). Detector LFD (Large Field Detector, imágenes SE). Mediante este análisis microscópico se observaron las distribuciones de las fases, distinguiéndose homogeneidades, aglomeraciones, porosidades o huecos.

Las imágenes fueron obtenidas con aumentos de 500x, 5000x y 20000x, pero solo se presentan las obtenidas a las dos últimas magnificaciones.

Para entender mejor el término de distribución y dispersión, se muestra una representación de estos dos fenómenos (Figura 28) Con el fin, de una mejor comprensión de los resultados en las imágenes microscópicas SEM.

Figura 28. Distribución y Dispersión



Fuente: RAMOS DE VALLE LF. Vulcanización y formulación de Hules. Valdez: Ciqa Limusa. México, 2009. P. 148.

La (Figura 29), imagen microscópica SEM para el Caucho-S expone un material muy fibroso debido a la presencia del caucho. Este material es uniforme siendo esto bueno, ya que cualquier porción que se tome de la muestra es representativa del material, conteniendo la misma composición, morfología y propiedades. El caucho le brinda al material propiedades elásticas haciéndolo moldeable y resistente bajo tensión.

El material Caucho-S se puede comparar con el material Caucho-MMA de la (Figura 30). Imagen microscópica SEM, observándose en la micrografía de magnificación 5000x, que hay mala dispersión y mala distribución del material, apreciándose el caucho en una sola zona de la imagen indicado por flechas de color azul.

Figura 29. Imágenes Microscópicas SEM del Caucho-S (Con recubrimiento en oro)

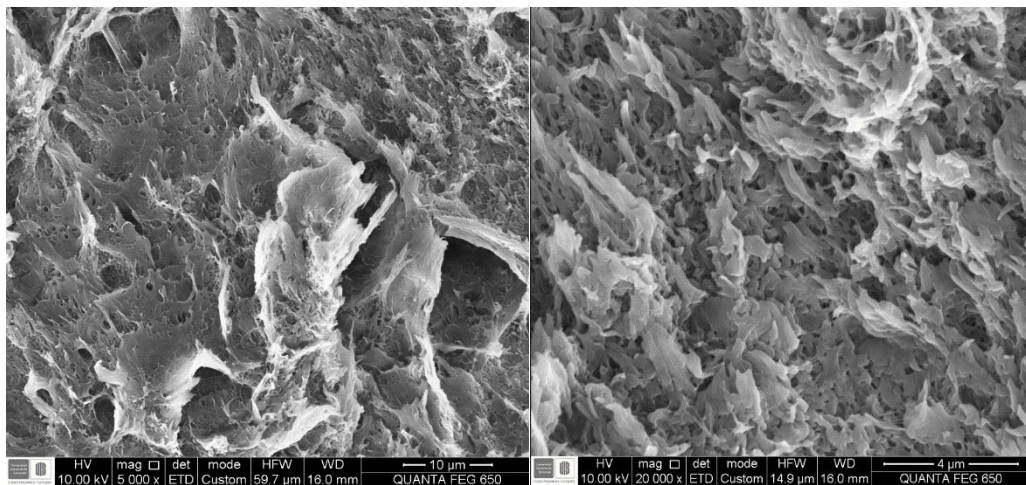
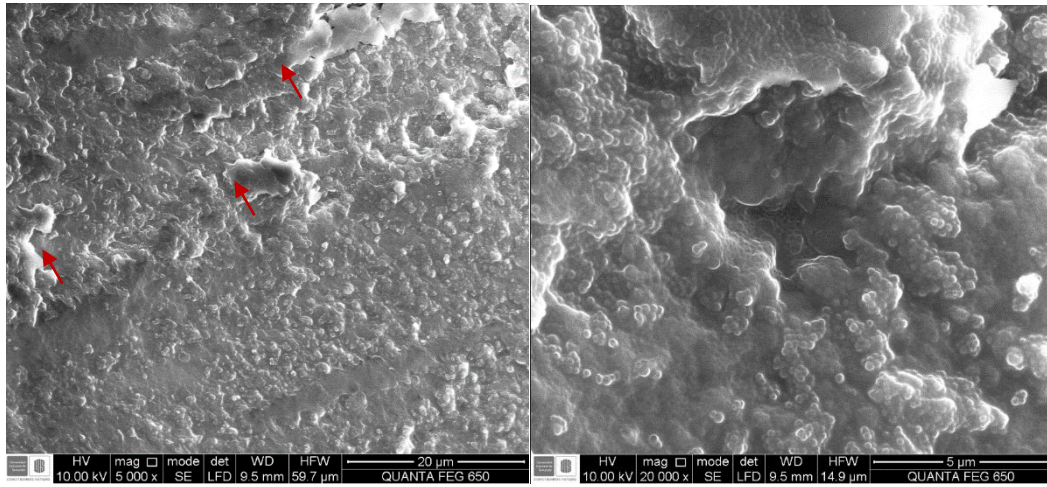
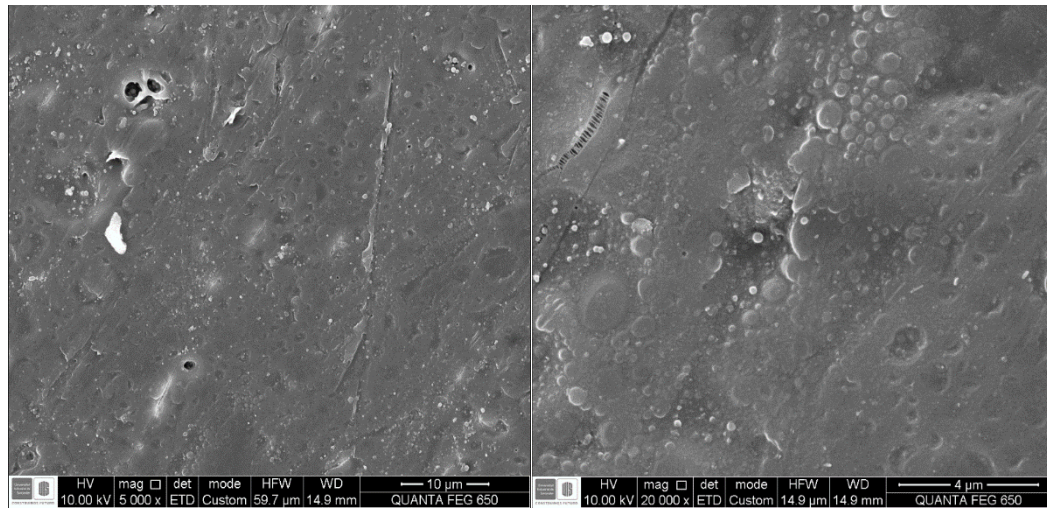


Figura 30. Imágenes Microscópicas SEM del Caucho-MMA



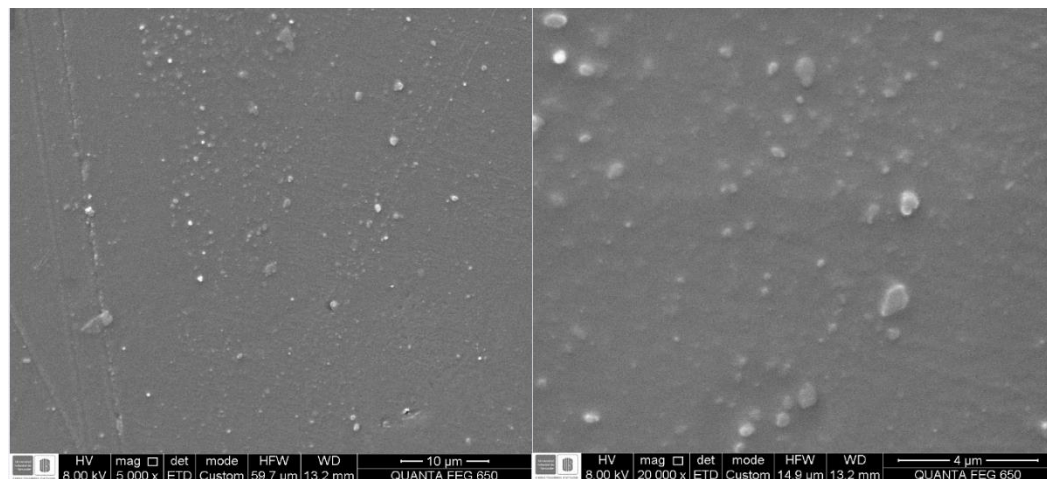
Para la muestra PS-S mostrado en la (Figura 31). Imágenes microscópicas SEM , con magnificaciones de 5000 y 20000x se aprecia la homogeneidad, aunque se alcanzan a ver pequeñas partículas de poliestireno postconsumo no disuelto en el solvente monómero estireno, debido a que las fuerzas de adhesión interfacial dependen del tamaño de partícula por lo tanto si las partículas son muy pequeñas la dispersión se incrementa, de lo contrario no. El poliestireno es quebradizo, rígido y puede romperse fácilmente como se observa en las micrografías de 5000 y 20000 x, una fractura, y huecos en donde se había disparado el haz de electrones inicialmente, se puede apreciar además la presencia de esferas de burbujas las cuales se pudieron haber formado al momento de la agitación con el catalizador y el acelerante.

Figura 31. Imágenes Microscópicas SEM del PS-S (Con recubrimiento en oro)



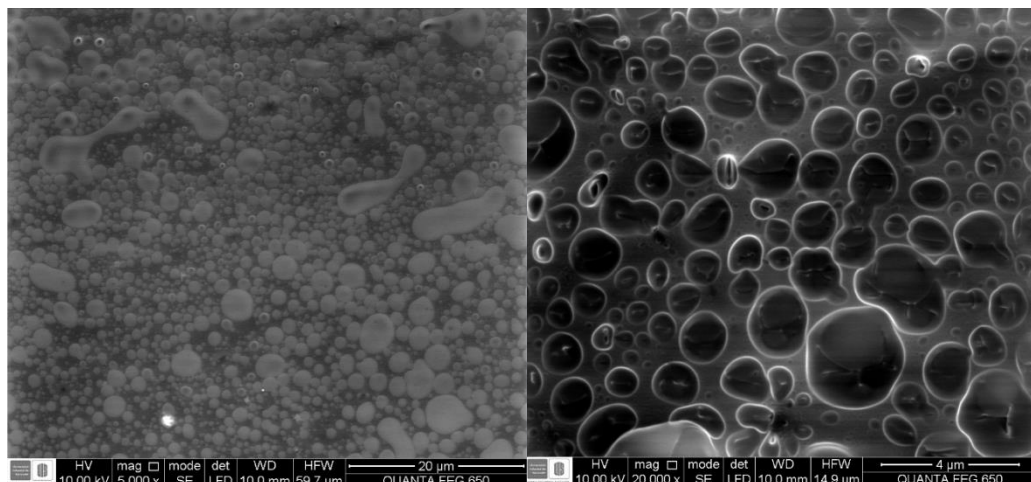
La muestra Caucho-S-PS presenta homogeneidad, pero se observan pequeñas partículas de poliestireno postconsumo y de caucho que se quedan sin dispersar. (Figura 32), imágenes SEM.

Figura 32. Imágenes Microscópicas SEM del Caucho-S-PS (Con recubrimiento en oro)



La muestra de PS-MMA expone una distribución de esferas posiblemente debidas a la presencia de burbujas, por lo que la unión interfacial es mucho más difícil, apareciendo en el contorno huecos o poros de considerable tamaño, que debilitan sus propiedades mecánicas. Respecto a las burbujas algunas se estallaban al disparo de electrones rompiendo el material debido a que es un material muy frágil o quebradizo, esto se puede corroborar en la (Figura 33). Imágenes SEM de la micrografía de magnificación de 20000x. Es importante mencionar que a ninguna de las muestras de MMA se les realizó ningún tipo de ensayo mecánico porque sus propiedades no lo permitían.

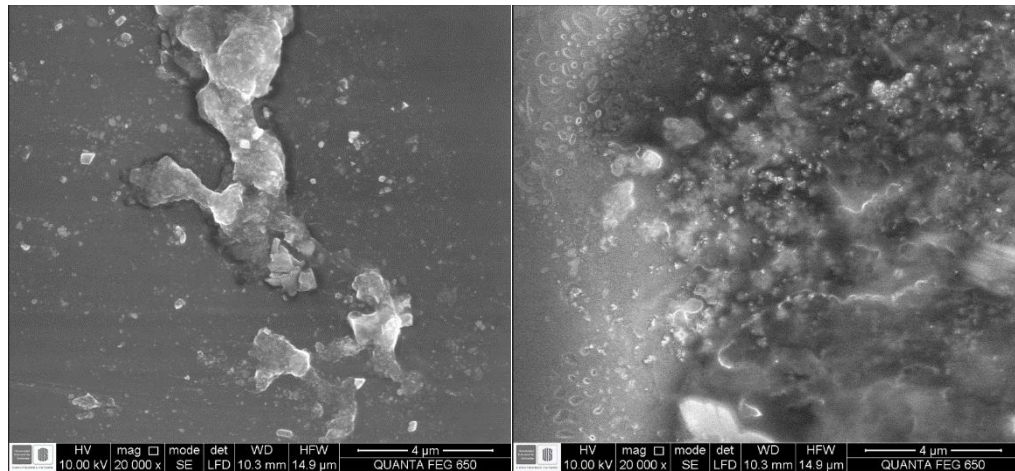
Figura 33. Imágenes Microscópicas SEM del PS-MMA



Para la muestra de [Caucho-(PS-MMA 1:2)] la distribución del tamaño de partículas no es homogénea, se logra notar la formación de aglomerados que se puede asociar a la presencia de caucho, algo parecido a la muestra de Caucho-MMA en que el metacrilato de metilo no hincha al caucho adecuadamente, además se aprecia la presencia de partículas pequeñas de PS postconsumo que no quedaron dispersas.

Presentando una mala dispersión y una mala distribución del material mostrado en la (Figura 34), imágenes SEM.

Figura 34. Imágenes Microscópicas del PS-MMA-Caucho



En el anexo I, se puede apreciar el análisis elemental de retrodispersión con el equipo EDS detector Apolox, software EDAX, de la muestra PS-MMA-Caucho, observándose la presencia de otros elementos, que pueden ser debidas a que al verificarse la polimerización del material se hacían punzadas con una varilla (de un material desconocido) que pudo haber dejado partículas en la muestra.

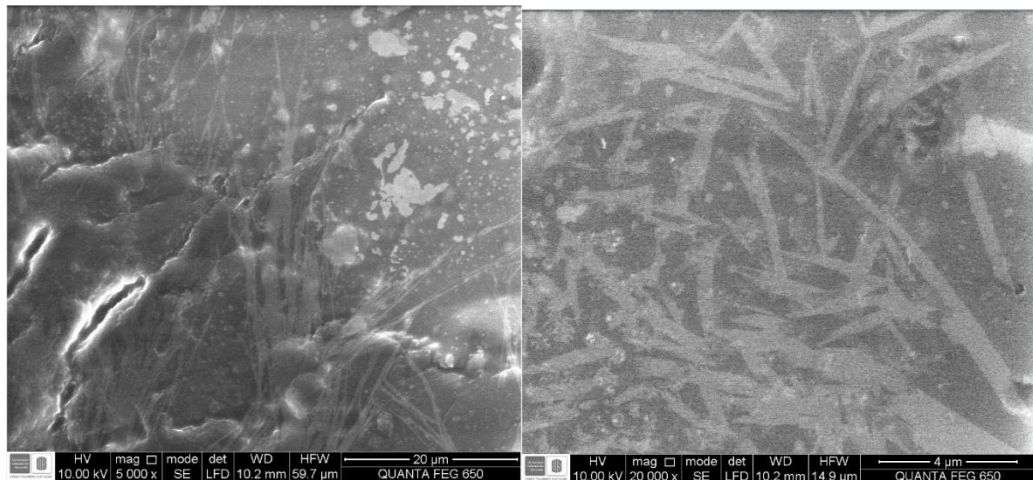
Para la retrodispersión de una imagen en general, es necesario tener en cuenta que en la imagen lo que se observa más brillante o blanco es más puro, más pesado, posee mayor número atómico; y las zonas más oscuras (negro) son más livianos.

Para la aleación polimérica de [Caucho-(PS-MMA 1:3)] presentó poca homogeneidad, pero mayor que [Caucho-(PS-MMA 1:2)], esto porque hay mayor solvente o monómero MMA que hace que el caucho se hinche más rápido y quede mejor disperso.

En la muestra [Caucho-(PS-MMA 1:3)] se ven zonas en que predomina el caucho observándose zonas fibrosas y otras zonas que se pueden asociar a partículas de PS postconsumo no solubilizado, esto se puede corroborar en la (Figura 35), imágenes SEM

Este material presentó heterogeneidad y gran cantidad de burbujas lo que no permitió realizasen ensayos mecánicos debido a que no se dejaban cortar por la presencia de huecos en todo el material. El caucho con el metilmetacrilato, y el poliestireno con el metilmetacrilato forman dispersiones pobres.

Figura 35. Imágenes Microscópicas SEM del Caucho-(PS-MMA1:3)



6.5 Interacción con solventes (SOLUBILIDAD)

Las muestras Caucho-S, PS-S, Caucho-S-PS Y Caucho-MMA, PS-MMA, Caucho-MMA-PS se trataron con solventes, ácidos, bases durante 30 días, esto se puede corroborar en las tablas 7 y 8.

Las relaciones de solubilidad en los sistemas de polímeros, son más complejas que las existentes entre compuestos de bajo peso molecular, debido a la diferencia de tamaño entre las moléculas del polímero-disolvente, la viscosidad del sistema, los efectos de la textura y el peso molecular del polímero.

El proceso de disolución para los polímeros en general ocurre lentamente y en fases, inicialmente las moléculas del disolvente se difunden dentro del polímero hinchándolo, pero sin llegar a solubilizarlo, porque las fuerzas intermoleculares polímero-polímero son muy grandes, debidas a los enlaces reticulados de las moléculas enlaces que pueden hacer cambiar las propiedades fisicoquímicas, respecto al polímero inicial.

La segunda fase de la disolución, por el contrario las fuerzas intermoleculares antes mencionadas se pueden vencer por la inclusión de interacciones intensas polímero-disolvente, el polímero hinchado se desintegra de forma progresiva formando una disolución, esto puede acelerarse por agitación, pero en ocasiones como es el caso dura varios días debido al peso molecular.

El éter de petróleo, el tolueno, el thinner y el tetracloruro de carbono son solventes con variadas características, el éter de petróleo no es una sustancia pura ni tampoco es una mezcla definida así varían sus propiedades, el tolueno es un hidrocarburo, el thinner está formado por hidrocarburos, esterés y alcoholes; y el tetracloruro de Carbono es sintetizado a partir del metano, los cuatro solventes son de característica apolar.

El material con Caucho-S en los cuatro solventes no se disuelve, únicamente solo se hincha porque hubo interacción pero no disolvió, debido a que el grado de interacción en este caso está determinado por la extensión de la reticulación; algo parecido ocurre con el solvente tolueno y el material PS-S; además el material Caucho-S-PS con los solventes Thinner, tolueno y el éter de petróleo. Ocurriendo de esta forma solo la primera fase de la disolución.

Los solventes Benceno, Xileno, y tetracloruro de carbono, son de característica apolar y además son hidrocarburos, estos si solubilizaron a las tres muestras de Caucho-S, PS-S, Caucho-S-PS, ocurriendo además la segunda fase de la disolución, a excepción de la muestra Caucho-S ya mencionado anteriormente, presenta que el solvente tetracloruro solo la hinchó.

Con el solvente metanol a las tres muestras Caucho-S, PS-S, Caucho-S-PS no les sucede nada. Algo parecido ocurre con los solventes como el éter de petróleo y el thinner para la muestra de PS-S, esto es debido a la diferencia de tamaño entre las moléculas del polímero y del disolvente.

Las tres muestras Caucho-S, PS-S, Caucho-S-PS tratadas con soda, ácido acético, ácido nítrico y detergente no hay ataque, quizás porque los hidrocarburos reaccionan solo en condiciones drásticas y con los reactivos concentrados.

Estas tienen característica iónica como el NaOH, característica polar para los ácidos, que buscan formar enlaces por puentes de hidrogeno, o interacciones electrostáticas respectivamente, que no se podrán formar debido a que las muestras solo contienen C-H para formar enlaces covalentes.

Tabla 7. Resultados de las interacciones con los solventes para las muestras con estireno:

SOLVENTE	CAUCHO-S	PS-S	CAUCHO-S-PS
Éter de Petróleo	Decoloración e hinchamiento	No le sucede nada	Decoloración e hinchamiento
Tetracloruro de carbono	Hinchamiento del material	Solubilización	Solubilización
Thinner	Hinchamiento del material	No le sucede nada	Decoloración e hinchamiento
Tolueno	Dispersión	Dispersión	Hinchamiento del material
Metanol	No le sucede nada	No le sucede nada	No le sucede nada
Benceno	Solubilización	Solubilización	Solubilización
Xileno	Solubilización	Solubilización	Solubilización
Ácido Nítrico	Coloración pero no hay ataque	Coloración pero no hay ataque	Coloración pero no hay ataque
Hidróxido de Sodio	No hay ataque	No hay ataque	No hay ataque
Ácido Acético	No hay ataque	No hay ataque	No hay ataque
Detergente	No hay ataque	No hay ataque	No hay ataque

Tabla 8. Resultados de las interacciones con los solventes para las muestras con MMA:

SOLVENTE	CAUCHO -MMA	PS-MMA-CAUCHO	PS-MMA
Tetracloruro de Carbono	Hinchamiento	Hinchamiento	Hinchamiento
Tolueno	Solubilización	Hinchamiento	Solubilización
Xileno	Solubilización	Solubilización	Solubilización
Benceno	Solubilización	Solubilización	Solubilización
Thinner	No le sucede nada	Decoloración e hinchamiento	No le sucede nada
Éter de Petróleo	No le sucede nada	No le sucede nada	No le sucede nada
Metanol	No le sucede nada	No le sucede nada	No le sucede nada
HNO3 al 5%	Coloración pero no hay ataque	Coloración pero no hay ataque	Coloración pero no hay ataque
NaOH al 5%	No hay ataque	No hay ataque	No hay ataque
Detergente	No hay ataque	No hay ataque	No hay ataque
Ácido acético	No hay ataque	No hay ataque	No hay ataque

Comparando los resultados anteriores de las muestras de estireno con las de MMA se puede determinar que el solvente éter de petróleo disolvente apolar, no le hizo nada a ninguna de las muestras de MMA, mientras a las de Caucho-S y Caucho-S-PS si interaccionó debido a que los cauchos ligeramente reticulados se hinchan ampliamente en los disolventes, excepto a PS-S; haciendo a las muestras de MMA más resistente a este solvente.

De igual forma se presenta que el tetracloruro de carbono disolvente apolar solo hincha a las muestras de PS-MMA-Caucho y PS-MMA, mientras que a las de Caucho-S-PS y PS-S si las solubiliza, teniendo lugar a la segunda fase de solubilización, haciendo de esta forma más resistente a las muestras de MMA que a las de S a este solvente.

Seguidamente para los solventes benceno y xileno solubilizaron a las muestras de MMA como a las de S. Finalmente para los ácidos nítrico y acético, soda y el detergente, no hubo ataque a las muestras de Metilmetacrilato como ocurrió con las de Estireno, mostrado anteriormente.

6.6 ENSAYOS MECÁNICOS

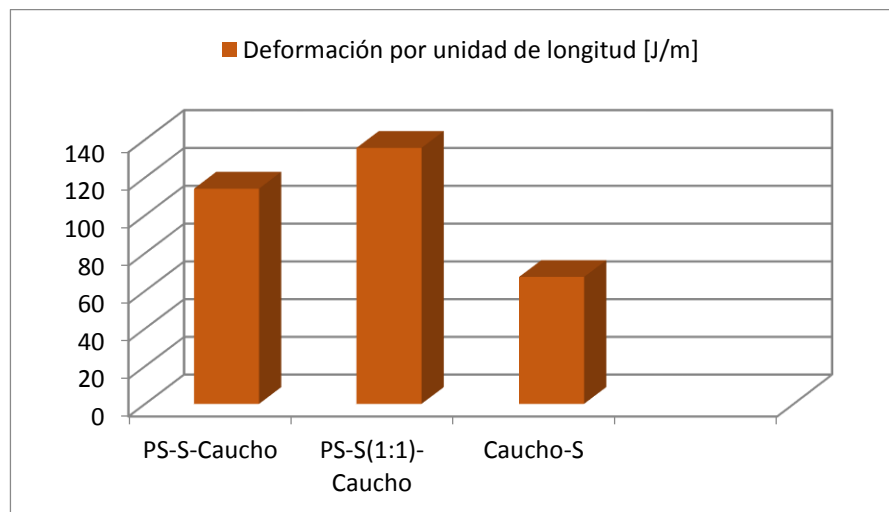
6.6.1 Ensayo de Impacto. Se requirió para esta prueba emplear probetas, cuyas dimensiones y diseño se describen en la norma ASTM D 256. Este ensayo de Impacto se realizó para las muestras de PS-S-Caucho, PS-S (1:1)-Caucho, Caucho-S, los resultados son mostrados en la Tabla 9. Por medio de este ensayo se obtuvo una energía de resistencia al impacto, a la cual se le restó la energía de pérdidas totales, debido a la fricción en los rodamientos, resistencia al aire, y al arrastre del

indicador móvil. Según el ángulo medido por el impacto de cada una de las probetas, se obtuvo este valor de energía de pérdidas totales, generando al final una Energía resultante, y partir de esta Energía resultante conseguir la deformación por unidad de longitud de cada muestra.

Tabla 9. Resultados de Ensayos de Impacto

<i>Muestra</i>	<i>Ángulo</i>	<i>Energía absorbida por la probeta [J]</i>	<i>Energía de pérdidas totales[J]</i>	<i>Energía de la resistencia real del material [J]</i>	<i>Deformación por unidad de longitud [J/m]</i>	<i>Tipo de Ruptura.</i>
PS-S-Caucho	109	1.4914	0.88127	0.61011	114.04	C
PS-S(1:1)-Caucho	111	1.22022	0.89483	0.32539	135.58	C
Caucho-S	111	1.22022	0.89483	0.32539	67.37	C

Figura 36. Resultados obtenidos del ensayo de la Resistencia al Impacto



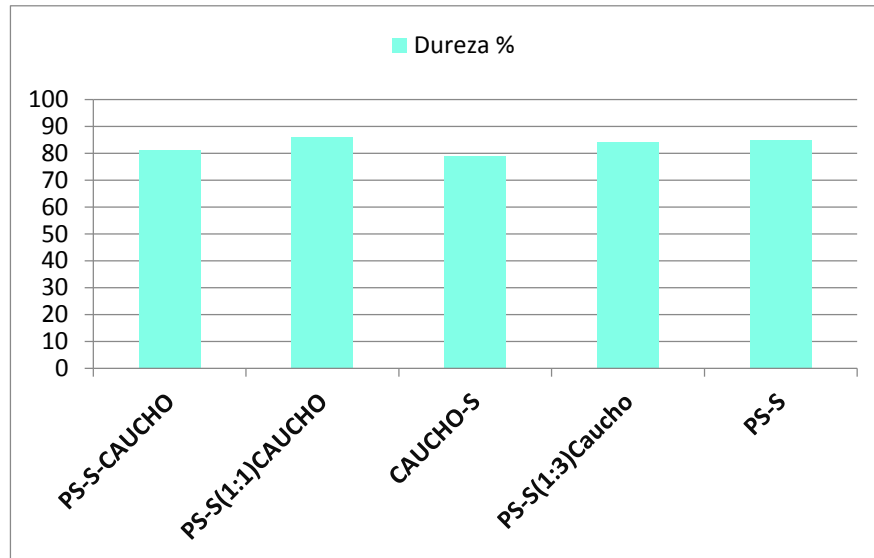
Las tres muestras presentaron una ruptura completa según la norma, en donde estas probetas se partieron en dos piezas, se observó en la (Figura 36,) que la muestra de PS-S(1:1)-Caucho, absorbió más energía en el impacto que las correspondientes a PS-S-Caucho, y Caucho-S. Así que el material de PS-S (1:1)-Caucho se considera más resistente debido a la adición del caucho, el cual le confiere flexibilidad al PS, al ser más flexible es más resistente al impacto, en comparación con los otros, le sigue con respecto a la resistencia al impacto es PS-S-Caucho, y finalmente Caucho-S. Aunque se observa que a todos los materiales se adicionó caucho en la misma concentración, por la dispersión utilizada, así que se tuvo en cuenta la relación de las soluciones de PS-S empleadas. Se observó que aquellas muestras que contienen menor cantidad de estireno, en la relación del PS-S son más resistentes a este ensayo. La disminución de la resistencia al impacto puede estar dada por puntos de inclusión débiles que producen concentraciones de esfuerzo generando que las muestras no resistan tanto.

6.6.2 Ensayo de Dureza. No es una propiedad fundamental la dureza de un material, aunque por medio de esta se puede conseguir información de las características mecánicas del mismo, relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. Se utilizó un Durómetro tipo Shore D, el cual proporciona valores de 0-100%, con el cual se logró medir la resistencia que oponía los polímeros al ser penetrados por otro material. En la tabla 10 se muestran los resultados.

Tabla 10. Resultados de Dureza

MUESTRA	DUREZA % SHORE D
PS-S-CAUCHO	81
PS-S(1:1)CAUCHO	86
CAUCHO-S	79
PS-S(1:3)CAUCHO	84
PS-S	85

Figura 37. Resultados debidos a la prueba de Dureza



Se observa en la (Figura 37), que las muestras Caucho-S-PS y PS-S presentan una dureza bastante alta, que es proporcionada por el poliestireno postconsumo. Además se puede observar una diferencia considerable con la muestra de Caucho-S con una dureza baja por el caucho que le brinda propiedades elastómeras al material.

De acuerdo a los resultados de esta prueba se puede notar que los polímeros a los cuales se les adicionó PS presentan una mayor Dureza que aquellos que no se les agregó de esta manera, se puede decir que en parte el PS mejora esta propiedad en comparación con el copolímero de Caucho-estireno, ya que permite que este nuevo material presente una mayor dureza, o resistencia a penetración por otro material. Logrando un buen resultado y progreso en la búsqueda de nuevos materiales.

6.6.3 Ensayo de Resistencia a la Flexión. Los ensayos realizados a las probetas (Figura 38), en el DMA Q800, dieron resultados en los que se observa que al disminuir al variar la cantidad de PS cambian las características del material, es decir el material incrementa su resistencia a la flexión.

Tabla 11. Dimensiones de las probetas para el ensayo de Flexión

Muestras	Largo [mm]	Ancho[mm]	Espesor[mm]
PS-S(1:1)-Caucho.B	60.87	13.49	4.05
PS-S-Caucho.A	61.89	9.46	3.80
Caucho-S. C	67.66	8.14	4.54
PS-S(1:3)-Caucho.B	62.20	8.67	2.02

Figura 38. Probetas usadas para el ensayo de Flexión

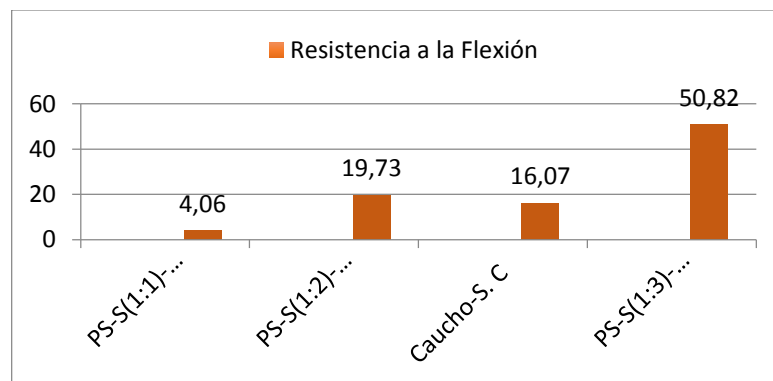


Los ensayos de flexión se emplean principalmente como medida de la rigidez, esta prueba es casi tan habitual en materiales poliméricos duros como el ensayo de tracción, y tiene las ventajas de simplificar el mecanizado de las probetas y evitar los problemas asociados al empleo de mordazas. El parámetro más importante que se produce de un ensayo de flexión es el módulo de elasticidad, también llamado módulo de flexión. De acuerdo con la ecuación de la resistencia a la máxima flexión se reemplazan los valores tanto de las dimensiones del ancho, el espesor, la fuerza, y el desplazamiento, logrando obtener los datos mostrados en la Tabla 12. Los valores de la fuerza y el desplazamiento se tomaron de las gráficas que se encuentran en los anexos J, K, L y M.

Tabla 12. Resultados obtenidos de la resistencia máxima a la flexión.

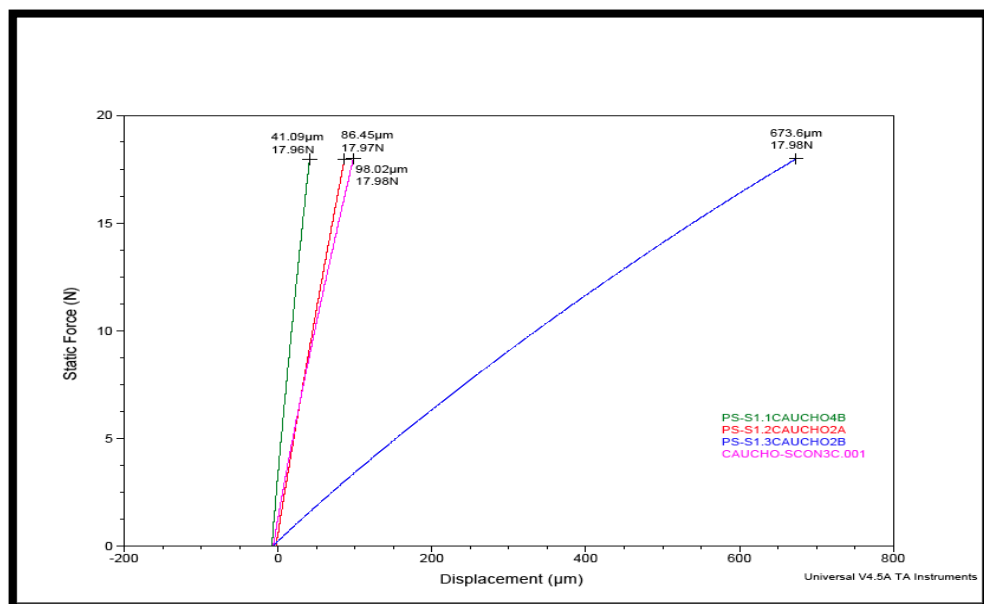
Muestras	Resistencia a la máxima flexión: σ [N/mm ²]
PS-S(1:1)- Caucho. B	4.06
PS-S(1:2)- Caucho. A	19.73
Caucho-S. C	16.07
PS-S(1:3)- Caucho.B	50.82

Figura 39. Resultados del Ensayo de Resistencia de la Flexión



De acuerdo con los datos mostrados en la (Figura 39), se observó que la muestra que presenta mayor resistencia a la flexión es PS-S (1:3)-Caucho, en comparación con los polímeros Caucho-S y PS-S(1:2)-Caucho. Las muestras a las que se adicionó el poliestireno post-consumo, presentan mayor resistencia a esta propiedad aunque en este caso, para el polímero de PS-S(1:1)-Caucho no produjo el mismo resultado, debido a que esta muestra contenía menor cantidad de estireno en presencia de PS post-consumo en la estructura de la molécula, generando que sea más flexible, y más resistente al impacto. Además esta dispersión de PS-S(1:1)-Caucho presentó más viscosidad, de esta manera un material flexible. Por el contrario para el polímero de PS-S(1:3)-Caucho, la cantidad de estireno que contenía la solución de PS-S, brindó características de fragilidad y resistencia a esta prueba. El diagrama perteneciente a la (Figura 40), muestra la comparación de las cuatro probetas, notándose un mayor desplazamiento con respecto a la fuerza estática, del polímero de PS-S(1:3)-Caucho, de esta forma mayor resistencia a la flexión.

Figura 40. Comparación de la resistencia a la flexión de las cuatro muestras pasadas por el equipo DMA



7. CONCLUSIONES

La polimerización vía radical libre, es un proceso adecuado para la obtención de los Copolímeros de una forma sencilla, efectiva y de bajo costo debida a la adición del poliestireno postconsumo.

Es importante utilizar el acelerante y el catalizador para que ocurran las polimerizaciones en un periodo más corto y sin tantas pérdidas por evaporación; se puede considerar además que los usados en este trabajo, el Naftenato de cobalto y el mek peróxido fueron adecuados.

En este estudio se discutieron las propiedades mecánicas de los materiales plásticos con la presencia del PS postconsumo, los resultados presentan la eficiencia mecánica de los materiales Caucho-S-PS, Caucho-S y PS-S, a diferencia de las muestras elaboradas con MMA, que no se realizaron debido a que el material era muy poroso y también muy frágil.

Los ensayos de interacción con solventes, con ácidos y bases para las muestras de S y MMA, muestran que los materiales elaborados con el MMA, el caucho y la presencia de poliestireno presentaban una resistencia química mayor, que para las muestras con estireno, el caucho y el poliestireno. Permitiendo poder obtenerse materiales livianos con propiedades resistentes a solventes de baja polaridad, no polares, polares e iónicos. Esta es una propiedad característica del polimetilmetacrilato la resistencia química y fue comprobada en este trabajo.

Las muestras pasadas en el TGA muestran que son materiales que tienen una alta resistencia a ser degradados concluyendo que es debido a que la capacidad de las moléculas para resistir los movimientos de las cadenas es alta, considerándose que se producen cuando las vibraciones atómicas se regulan al incrementarse la temperatura.

De acuerdo con el ensayo de dureza se llegó a la conclusión, que aquellos materiales de Caucho-S, a los que posteriormente se adicionó el poliestireno postconsumo, permitieron obtener copolímeros, con buenas propiedades de resistencia a la dureza, a diferencia de cuando no lo contenía.

En el ensayo realizado para la Resistencia a la flexión, se observó que aquellas muestras que poseían una proporción en la que presentaba mayor cantidad de estireno en la relación de PS-S, eran más resistentes a la deformación en esta prueba.

Para la prueba de Resistencia al impacto se concluyó que las moléculas que poseían menor cantidad de estireno, es decir, la relación de la solución de PS-S de (1:1), con la presencia del caucho, los hacía más resistentes a esta propiedad.

Se pudo determinar que las muestras que contenían Caucho-S, mostraban características de adhesión a las paredes de los frascos empleados para la polimerización, que aquellos que no contenían el caucho natural, como el PS-S y el estireno mismo. Brindándole propiedades al material de adhesión al vidrio.

Con la microscopia SEM se pudo determinar la compatibilización de las soluciones PS-S, y de las dispersiones Caucho-S y Caucho-S-PS, pero no para las muestras que contenían de MMA.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda que las muestras con MMA sean elaboradas con un montaje o atmósfera al vacío y con agitación para poder tener un material más homogéneo, sin porosidades (por las burbujas) y sin tanta fragilidad luego de la polimerización, además se recomienda de esta forma agregar cargas para ayudar que el material sea menos frágil.

Es recomendable que para el corte de los materiales para la obtención de las probetas a las dimensiones exigidas por los equipos de ensayos mecánicos, a las muestras se le haga un recubrimiento de aceite de silicona el cual facilitará el manejo y corte de las mismas.

Se recomienda siempre eliminar los inhibidores presentes en los monómeros de la polimerización para que se pueda dar una buena dispersión, si no se hace de esta forma hay una separación de las fases de las mezclas, sin permitir una adecuada polimerización

Se recomienda caracterizar el material por otras técnicas por ejemplo ensayos de compresión, tensión, ensayos de expansión térmica para confrontar con los valores requeridos para cumplir con su aplicación como juntas de dilatación.

Se recomienda el estudio a una escala mayor para determinar la rentabilidad y aplicación del material PS postconsumo.

CITAS

- [1] OZDEMIR, A., ULUER, O., GULDAS, A. Flow front advancement of molten thermoplastic materials during filling stage of mold cavity, *Polymer Testing*: 23, 957-966, 2004.
- [2] HIDALGO BARRIO, Dolores., MARROQUÍN, Jesús M., GÓMEZ RINCON, Martha., AGUADO, Alicia., y GIRALDO, Gregorio A. Sistema integral y sostenible para el reciclado y valorización de residuos múltiples - proyecto REVAWASTE. Mayo-Junio, 2014. Vol. 89 n°3.
- [3] ARANDES, José M., BILBAO, Javier., LÓPEZ Danilo. Reciclado de Residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Marzo, 2004. Vol. 5 (1).
- [4] FUENTES, Edwin G., GONZALES., Marcos, LÓPEZ FONSECA, Rubén., Gutierrez, José. Mecanismos de degradación térmica y catalítica de Poliestireno, bajo condiciones de hidrocraqueo. En: *Avances en Ciencias e Ingeniería*. Julio-Septiembre, 2012. Vol. 3, núm. 3.
- [5] SIDDIQUE, Rafat. INDERPREET, Kaur. JAMAL, Khatib. Use of recycled plastic in concrete. En: *waste management*. Elsevier. January, 2008. Vol. 28. P 1835-1852
- [6] COSTA DEL POZO, Antonella. Estudio de Hormigones y Morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Máster en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña, 2012. P 39-29
- [7] BARETA, Roberto., COSTA, Carlos Alberto. Influência de materiais alternativos nas propriedades de peças tubulares no contexto de moldes protótipos de injeção. En: *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008. Vol. 4(3). P 37-42.
- [8] SUAREZ PÉREZ, Sandra. Principales procesos básicos de transformación de la Industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de los residuos

plásticos postconsumo. Guías ambientales. Colombia: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible. Dirección de desarrollo sectorial sostenible República de Colombia. Julio, 2004.

[9] ESPINA, Sonia Melendi. Reciclado de residuos sólidos y aceites residuales en la producción de coque. Tesis doctoral Ingeniería de procesos y ambiental. España: Universidad de Oviedo, presentada en el departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. 2011. P 3-4.

[10] SMITH, William F. Ciencia e Ingeniería de materiales. Madrid: Universidad de Barcelona, 2004. Tercera edición. Mac Graw Hill. P 196-197

[11] SHACKELFORD, James F. Ciencia de los materiales para ingenieros. Prentice Hall Hispano América, S.A. Tercera edición. 1992

[12] LÓPEZ CARRASQUERO, Francisco. Fundamentos de los Polímeros. Venezuela: Universidad de los Andes, 2004. VI Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química. Facultad de ciencias. Departamento de Química.

[13] SHACKELFORD, James F. Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros. Pearson Prentice Hall. Pearson educación S.A. Sexta edición. 2005

[14] MC MURRY, John. Química Orgánica. Octava edición. México, 2012. P 291

[15] CASTELLAN, Gilbert W. Physical Chemistry. Third edition. Addison Wesley Wesley Longman de México. 1998. P 462-463

[16] DAUB, William. SEESE, William S. Química. Séptima Edición. Pearson Educación. Prentice Hall. 2005

[17] XU Jie, XUE Bing, LIU Yong Mei. Mesostructured Ni-doped ceria as an efficient catalyst for styrene by oxidative dehydrogenation of ethylbenzene. Elsevier. En: Applied Catalysis A. Julio, 2012. Vol. 405. P 142-148

- [18] V, Santiago., LA FUENTE, Luis., BURGUETE, María Isabel., ALTAVA, Belén. Introducción a la química orgánica. Castelló de la Plana: Universitat Jame I, 1997. P 211-213.
- [19] SEYMOUR, Raimond B. Introducción a la química de los polímeros. Hattiesburg: University of Southern Mississippi, 2002. Editorial Reverté S. A.
- [20] ADKINS, peter. Química moléculas, materia, cambio. 3 ed. España: Universidad de Barcelona, 1998.
- Ediciones Akal, S.A, 2007. P 80-81- 82
- [21] LIESA, Francisco., ALTER, Luis. Adhesivos Industriales. Productica. Editorial MARCOMBO S.A. España, Barcelona. 1990. Vol 39. P 21-22.
- [22] Composite Polymers. Guía para la fabricación de compuestos con resinas de hetron y aropol. Editorial ashland. Estados Unidos, 2006. P 4-5.
- [23] COACKLEY, Ned. BRYAN Y. GONWY, Glan. Construcción de embarcaciones pesqueras en fibra de vidrio. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación FAO. En: Deposito de documentos de la FAO.1991
- [24] WEISSERMEL, K. ARPE, H.J. Química Orgánica Industrial. Productos de partida e intermedios más importantes. Barcelona: Universidad de Salamanca, 2000. P 192.
- [25] BILLMEYER, Fred W. Ciencia de los polímeros. España: Universidad Politécnica de Barcelona, 1975. P 23-24.
- [26] S, Philip. A, Christina. Química Orgánica: Conceptos y Aplicaciones. Editorial PEARSON Educación. 2003. P 426.
- [27] VILAPLANA ORTEGO, E., MARTÍNEZ, Mira., J, Juan. SUCH BASAÑEZ I, CAZORLA AMOROS D. Nueva Aplicación Potencial de dos Técnicas

Instrumentales para la caracterización de materiales de construcción prehistóricos. España: Universidad de Alicante, 2012.

[28] SIERRA, Isabel. PÉREZ QUINTANILLA, Damián. GÓMEZ RUIZ, Santiago. MORANTE ZARCERO, Sonia. Análisis Instrumental. Editorial Gesbiblo, S.L. Impreso en España, 2010. P 207-210.

[29] CLIMENT OLMEDO, María J, GARCÍA GÓMEZ, Hermenegildo, IBARRA CHORNET, Sara. MORENA BERTOMEU, Isabel. Experimentación en Química Orgánica: Química Orgánica, Ingeniería Química. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2005. P 95.

[30] MANCHADO LÓPEZ, Miguel Ángel. Morfología y propiedades de termoplásticos reforzados con fibras orgánicas cortas. Efecto de la modificación de la interface. Editada por la Universidad Complutense de Madrid, 2005. Madrid. P 97-107.

[31] GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna, materiales, proceso y sistemas. Primera edición. Editorial PEARSON. México: Universidad la Salle, 2007. P 56.

[32] DIETSCHKE, Karl-Heinz. KLINGEBIEL, María. Manual de la técnica del automovilismo. Cuarta edición. 2005. P 396.

BIBLIOGRAFIA

ADKINS, peter. Química moléculas, materia, cambio. 3 ed. España: Universidad de Barcelona, 1998.

ARANDES, José M. BILBAO, Javier. LÓPEZ V Danilo. Reciclado de Residuos plásticos. Revista Iberoamericana de Polímeros. Marzo, 2004. Vol. 5 (1).

BILLMEYER, Fred W. Ciencia de los polímeros. España: Universidad Politécnica de Barcelona, 1975. P 23-24.

COSTA DEL POZO, Antonella. Estudio de Hormigones y Morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. Máster en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña, 2012. P 39-29

ESPINA, Sonia Melendi. Reciclado de residuos sólidos y aceites residuales en la producción de coque. Tesis doctoral Ingeniería de procesos y ambiental. España: Universidad de Oviedo, presentada en el departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. 2011. P 3-4.

HIDALGO BARRIO, Dolores., MARROQUÍN, Jesús M., GÓMEZ RINCON, Martha., AGUADO, Alicia., y GIRALDO, Gregorio A. Sistema integral y sostenible para el

reciclado y valorización de residuos múltiples - proyecto REVAWASTE. Mayo-Junio, 2014. Vol. 89 nº3.

SMITH, William F. Ciencia e Ingeniería de materiales. Madrid: Universidad de Barcelona, 2004. Tercera edición. Mac Graw Hill. P 196-197

VILAPLANA ORTEGO, E., MARTÍNEZ, Mira., J, Juan. SUCH BASAÑEZ I, CAZORLA AMOROS D. Nueva Aplicación Potencial de dos Técnicas Instrumentales para la caracterización de materiales de construcción prehistóricos. España: Universidad de Alicante, 2012.

ANEXOS

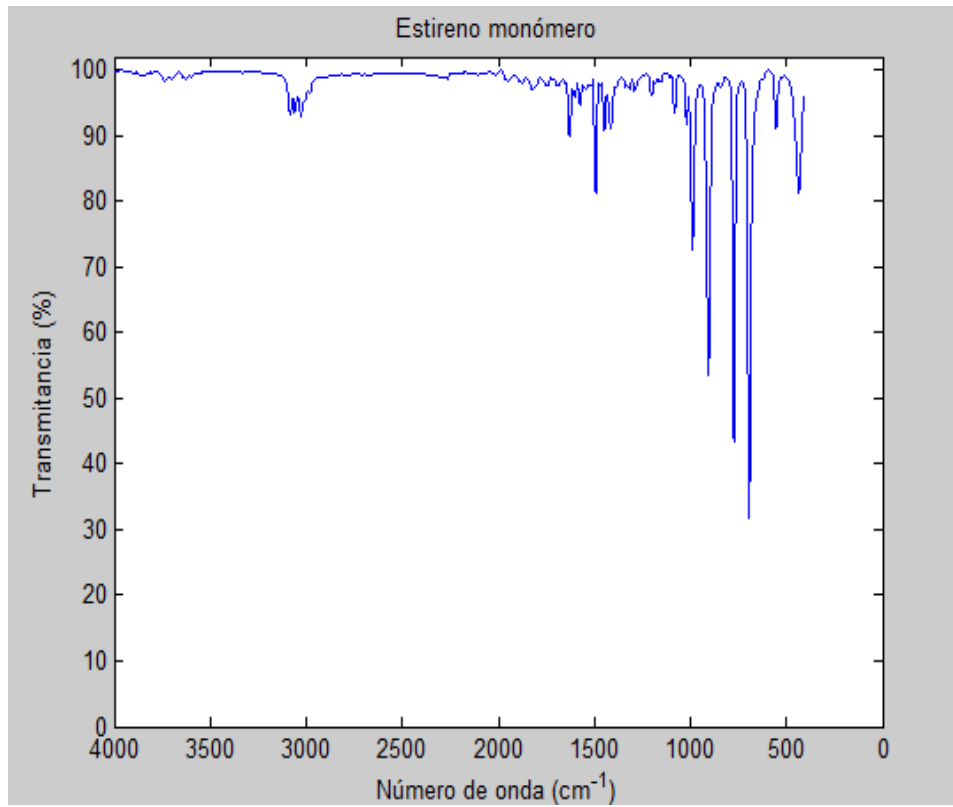
Anexo A. Absorciones de los espectros Infrarrojo para el Caucho natural, estireno monómero y poliestireno postconsumo

CAUCHO	PS	ESTIRENO
2959.98	3025.95	3027.89
2918.10	2921.30	1629.70
2853.32	1600.86	1493.75
1661.27	1492.29	1448.80
1446.24	1450.35	1414.06
1375.14	1026.76	1082.36
1313.26	906.77	1019.60
1243.65	753.47	989.60
1127.62	696.97	906.44
1088.26	539.70	773.78
1037.09		694.43
838.70		553.70
742.54		434.94
671.62		
569.98		
491.39		

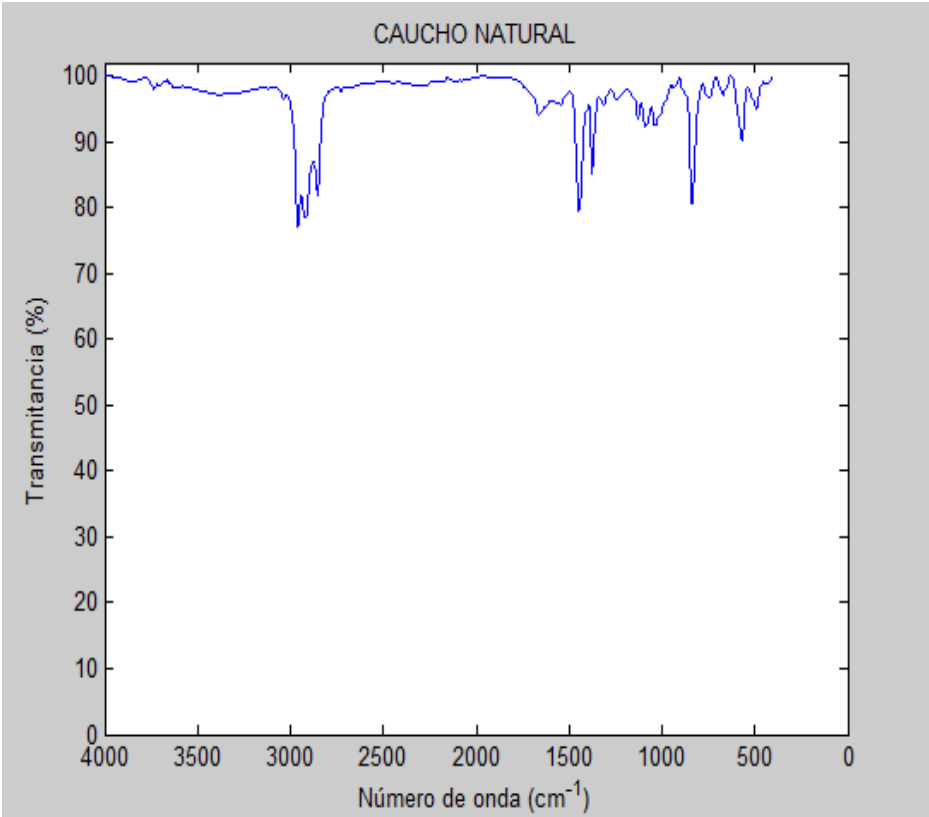
Anexo B. Bandas del Espectro Infrarrojo para el Caucho-estireno en Dispersión

Longitud de Onda cm-1	Intensidad
3027.99 E	Baja
1629.75 E	Baja
1493.81 E	Media
1448.65 E	Baja
1414.26 E	Baja
1082.33 E	Baja
1019.67 E	Baja
989.59 E	Media
906.48 E	Alta
773.87 E	Alta
694.61 E	Alta
553.94 E	Alta

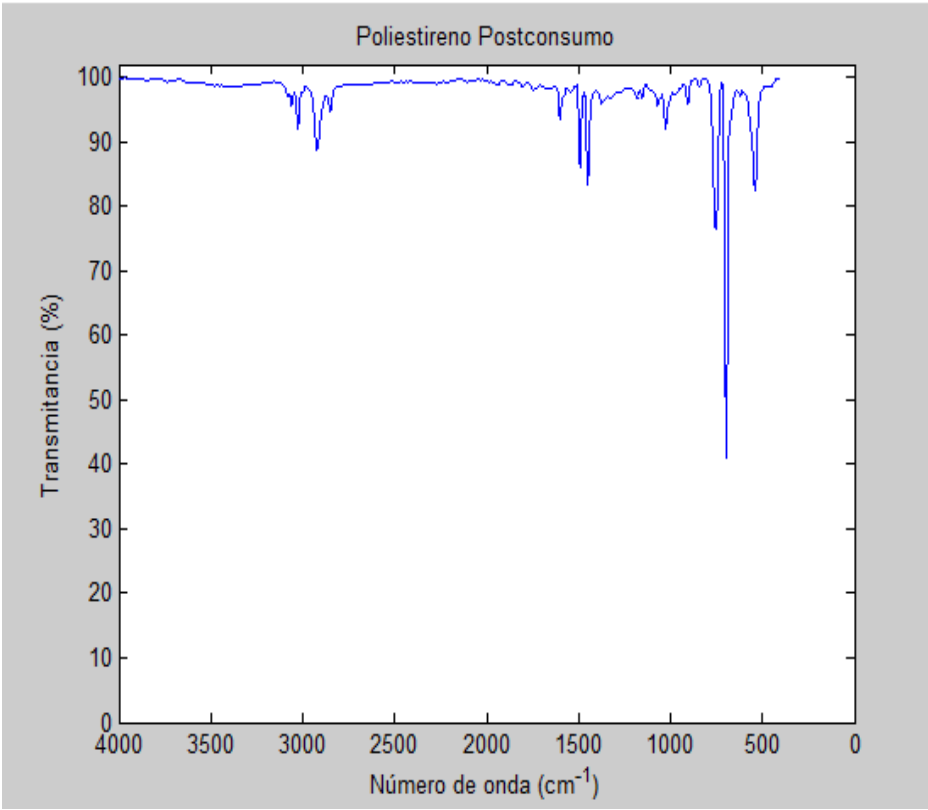
Anexo C. Espectro Infrarrojo del Estireno monómero



Anexo D. Espectro Infrarrojo del Caucho Natural



Anexo E. Espectro Infrarrojo del Poliestireno Post-Consumo



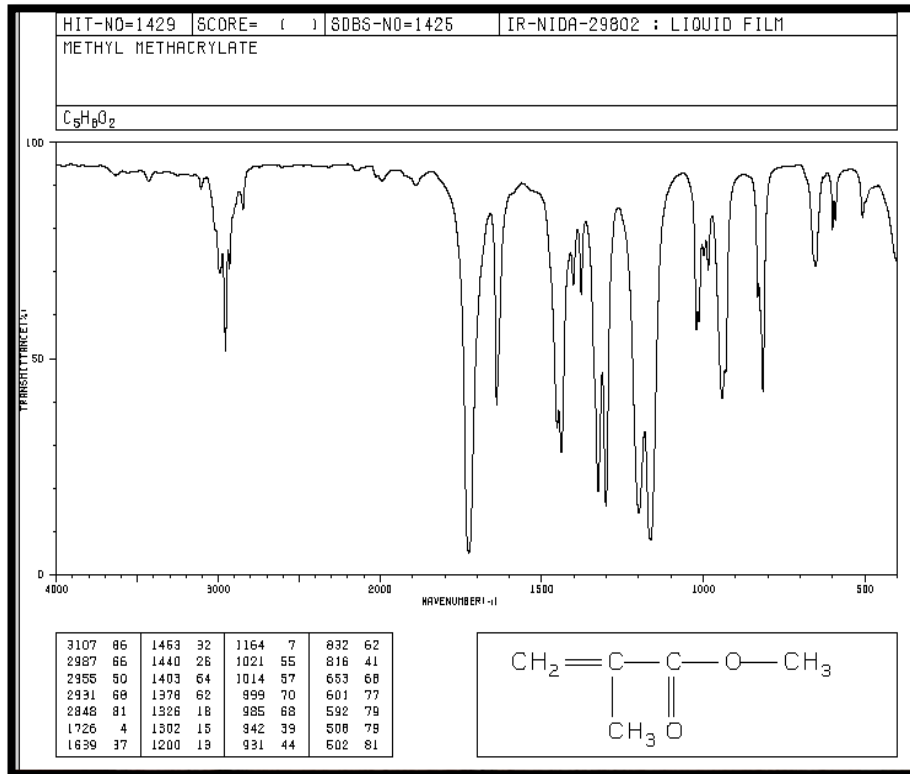
Anexo F. Bandas del espectro IR para la muestra 8 [Caucho-(PS-S 1:3)]

Longitud de Onda cm-1	
3026.59 PS E	Baja
2922.71 PS	Baja med
1601.12 PS	med baj
1449.78 E PS	med baj
1026.70 PS	baja
753.31 PS	alt med
695.75 PS	alta

Anexo G. Bandas del espectro IR para la muestra 6 [Caucho-(PS-S 1:1)]

Longitud de Onda cm-1	Intensidad
2923.50 PS	baja
1492.59 P PS	baja
1449.89 E PS	Med, ba
1070.49 C-H	Med, ba
753.83 PS	media
696.36 PS	alta

Anexo H. Espectro Infrarrojo para el Metil metacrilato Teórico.



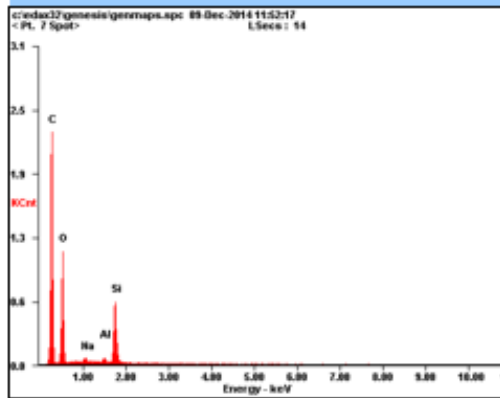
Anexo I. Retrodispersión en el EDS de la muestra PS-MMA-Caucho

Microanalysis Report

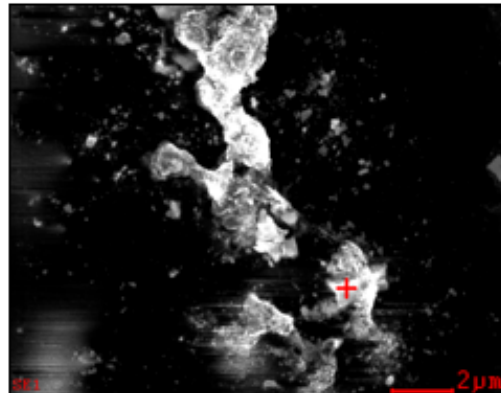
Prepared for: *Company Name Here*

Prepared by: *Your Name Here*

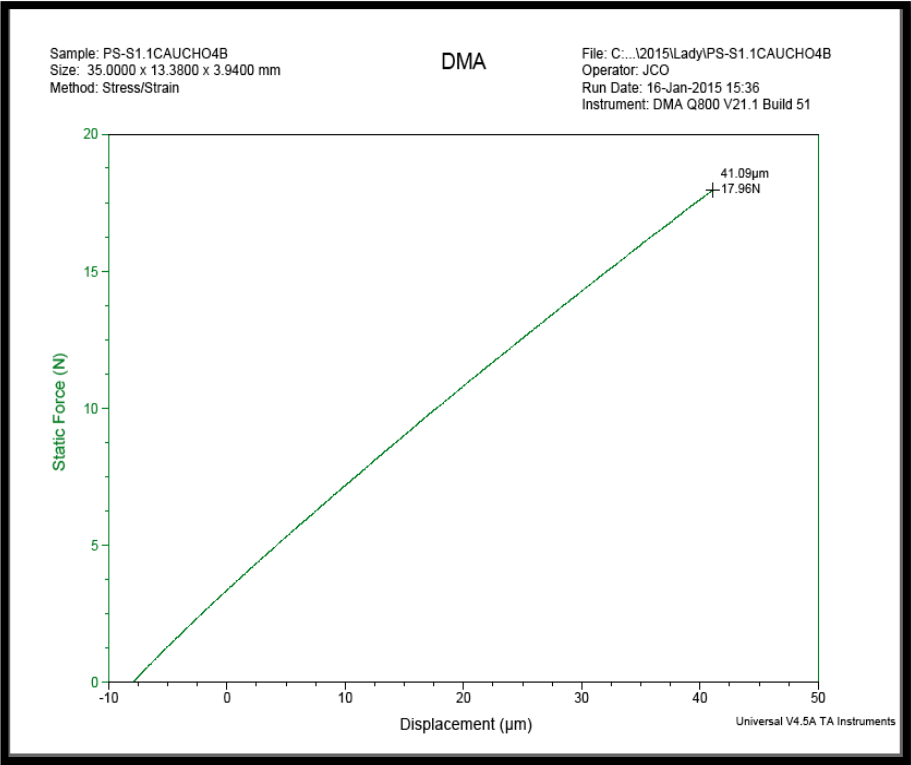
12/9/2014



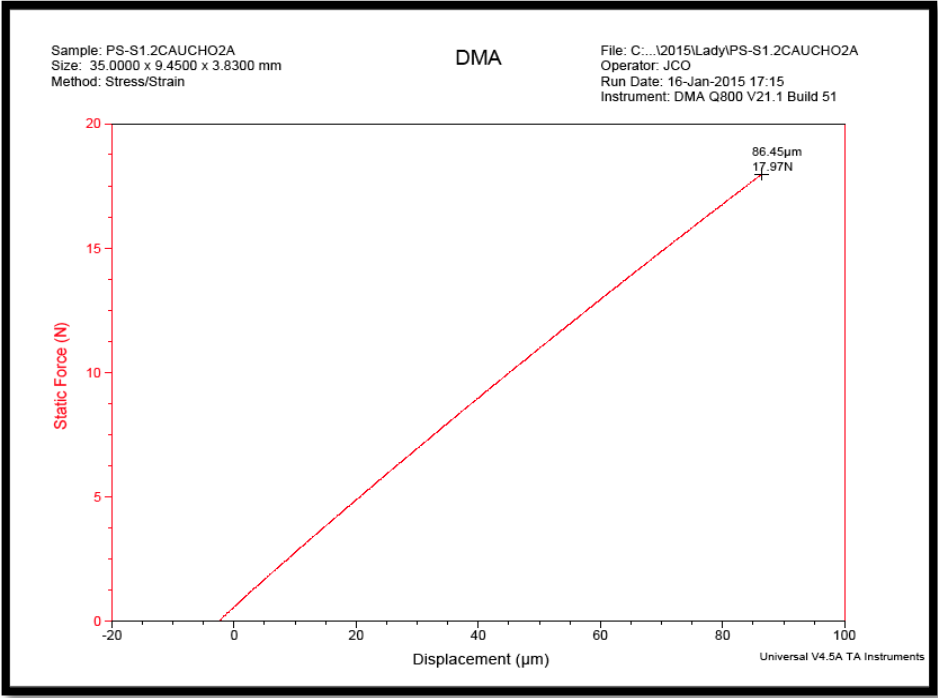
Element	Wt%	At%
CK	57.39	68.02
OK	26.81	23.85
NaK	00.84	00.52
AlK	01.09	00.57
SiK	13.87	07.03
Matrix	Correction	ZAF



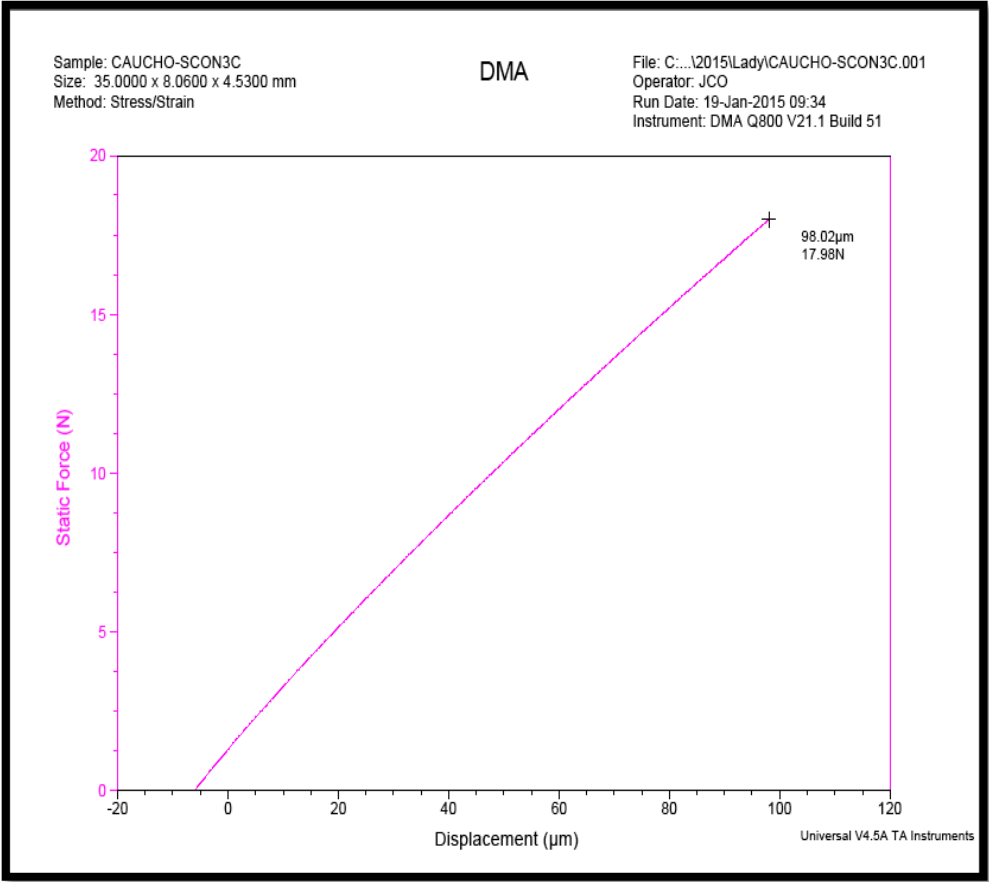
Anexo J. Gráfica de resistencia a la flexión en el equipo DMA, de la muestra PS-S(1:1)-Caucho.



Anexo K. Gráfica de resistencia a la flexión en el equipo DMA, de la muestra PS-S(1:2)-Caucho.



Anexo L. Gráfica de resistencia a la flexión en el equipo DMA, de la muestra Caucho-S



Anexo M. Gráfica de resistencia a la Flexión en el equipo DMA, de la muestra PS-S(1:3)-Caucho.

