

**COPOLIMEROS DE INJERTO, EFECTOS DE LA ADICIÓN DE PVC POST-
CONSUMO SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL
SISTEMA CAUCHO-ESTIRENO**



VANESSA RODRIGUEZ FRANCO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
Bucaramanga / Santander / Junio 2004**

**COPOLIMEROS DE INJERTO, EFECTOS DE LA ADICIÓN DE PVC POST-
CONSUMO SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL
SISTEMA CAUCHO-ESTIRENO**

VANESSA RODRIGUEZ FRANCO

DIRECTOR DE PROYECTO

Ph. D. EDGAR FERNANDO CASTILLO MONRROY

Profesor Titular: Escuela de Ingeniería Química

CODIRECTOR DE PROYECTO

JOSE CARLOS GUTIERREZ

Profesor Asociado: Escuela de Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
Bucaramanga / Santander / Junio 2004**

A Dios por ser mi guía en cada momento de mi vida.

A mi padre porque se que desde el cielo me ilumina y me da la fortaleza para vencer los obstáculos y salir adelante.

A mi madre por creer en mí y apoyarme en los momentos que los requería.

A mi tía Ana porque sin su ayuda, consejos y apoyo no sería quien soy.

A mi tío Félix por ayudarme y confiar en mí.

A mi prima Emi por darme ánimos cuando me sentía que no podía más.

A Alí, Diana Milena, Diana Marcela, Ina y el club de las Demos, porque sin su ayuda y apoyo continuos esté proyecto no se hubiera terminado a tiempo.

A ti amor porque siempre confiaste en mi, y estuviste conmigo en los momentos que más te necesite. Gracias por todos los momentos que hemos compartido. AHOM.

A José Carlos Gutiérrez por ser mi guía, mi amigo, mi apoyo y la persona con la que siempre he podido contar. GRACIAS POR SUS CONSEJOS PROFE.

En general a mi abuelo, mis hermanos, tíos, primos y amigos que creyeron en mi durante mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Por su colaboración en el presente estudio, la autora expresa su agradecimiento a:

Qco. José Carlos Gutiérrez.

Ing. Edgar Fernando Castillo.

Ing. Crisóstomo Barajas.

Tec. Eduardo Carreño.

Tec. Wilson Carreño.

Laboratorio SOOR.

CEIAM

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCION	1
1. MARCO TEORICO	2
1.1. Procesos de polimerización	2
1.1.1. Polimerización por condensación.	2
1.1.2. Polimerización por adición.	3
1.2. Técnicas De Polimerización Radical	5
1.2.1. Polimerización en masa	5
1.2.2. Polimerización en suspensión	6
1.2.3. Polimerización en solución	7
1.2.4. Polimerización en emulsión	7
1.2.5. Polimerización en cadena	9
1.3. COPOLIMERIZACIÓN	9
1.4. Síntesis del copolímero de injerto caucho- estireno	12
1.5. Usos y aplicaciones de los copolímeros de injerto	14
1.6. ENSAYOS MECÁNICOS PARA COPOLÍMEROS DE INJERTO	15
1.6.1 Resistencia a la tracción	16
1.6.2 Dureza	17
1.7 ENSAYOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA COPOLÍMEROS DE INJERTO	18
1.7.1 Resistencia a productos químicos	18
1.7.2. Densidad	18
1.7.3. Absorción de agua	19
1.7.4. Análisis Termogravimétrico (TGA)	19

1.7.5.	Inflamabilidad	20
1.7.6.	Solubilidad	20
2.	DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL	22
2.1.	Descripción del procedimiento experimental	22
2.2.	Reactivos	27
2.2.1	Estireno	27
2.2.2.	Caucho natural	28
2.2.3.	Peroxido de metil etil cetona (MEKP)	30
2.2.4	Naftenato de cobalto	31
2.2.5	Cloruro de polivinilo (PVC)	32
2.3.	SÍNTESIS DEL COPOLÍMERO DE INJERTO CAUCHO-ESTIRENO	33
2.3.1.	Descripción del equipo	34
2.3.2.	Preparación de la dispersión Caucho natural – Estireno.	35
2.3.3.	Copolimerización caucho natural – estireno	35
2.3.4.	Acondicionamiento de PVC	36
2.3.5.	Incorporación del PVC al copolímero	38
2.3.6.	Determinación de las propiedades físico-químicas de los polímeros obtenidos.	38
2.3.7.	Determinación de las propiedades físico-mecánicas de los polímeros	39
3.	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE RESULTADOS	40
3.1.	Ensayos preliminares	40
3.2.	Resultado de los experimentos	41
3.2.1.	Influencia de la relación de caucho/estireno sobre las propiedades del copolímero	49
3.2.2.	Incorporación del PVC a los copolímeros caucho-estireno	50
3.3.	Síntesis y formulación de los copolímeros caucho-estireno	52
3.3.1.	Formulación y obtención de los copolímeros de injerto	52

caucho- estireno.	
3.4. Propiedades físico-químicas	53
3.4.1. Solubilidad	53
3.4.2. Resistencia al ataque de solventes	55
3.4.3. Densidad aparente.	57
3.4.4. Densidad absoluta	59
3.4.5. absorción de agua	60
3.4.6. Velocidad de llama	62
3.4.7. punto de reblandecimiento	63
3.4.8. análisis Termogravimétrico	65
3.5. Propiedades físico-mecánicas	66
3.5.1. Dureza	66
3.5.2. Ensayo de tensión	68
4. Conclusiones	70
5. Recomendaciones	72
Bibliografía	74

LISTA DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Propiedades físico-químicas del estireno.	28
Cuadro 2. Propiedades físico-químicas del caucho natural disuelto en tolueno.	29
Cuadro 3. Propiedades físico-químicas del MEK peróxido.	31
Cuadro 4. Propiedades físico-químicas del Naftenato de Cobalto	31
Cuadro 5. Condiciones de operación del proceso de polimerización.	46
Cuadro 6. Temperatura de descomposición de Polímeros y copolímeros.	66

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =25°C.	23
Tabla 2. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =60°C.	24
Tabla 3. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =40°C	25
Tabla 4. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =50°C.	25
Tabla 5. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =70°C.	26
Tabla 6. Programación experimental para una relación caucho/acelerante 2:10, caucho/ catalizador 5:10 y Temperatura =60°C	26
Tabla 7. Programación experimental para una relación caucho/acelerante 2:10, caucho/ catalizador 5:10 y Temperatura =60°C	27
Tabla 8. Resultados de las pruebas de polimerización a una relación RUB/EST de 6:100 a temperatura ambiente.	41

Tabla 9	Resultados de las pruebas de polimerización a una relación RUB/EST de 6:100 y una temperatura de 60° C.	43
Tabla 10	Resultados de las pruebas de polimerización a diferentes temperaturas de la muestra T214, con una relación RUB/EST de 6:100, una relación RUB/AC de 2:10 y Una relación RUB/CAT de 4:10.	45
Tabla 11	Resultados de las pruebas de polimerización a diferentes temperaturas de la muestra T215, con una relación RUB/EST de 6:100, una relación RUB/AC de 2:10 y Una relación RUB/CAT de 5:10.	46
Tabla 12	Efecto de la variación de la relación Caucho/PVC en la polimerización caucho-estireno, a una relación RUB/AC de 2:10, relación RUB/CAT de 5:10 y Temperatura de 60° C.	51
Tabla 13	Solubilidad de los copolímeros caucho- estireno en solventes orgánicos e inorgánicos.	53
Tabla 14	Solubilidad de los copolímeros caucho-estireno-PVC en solventes orgánicos e inorgánicos.	54
Tabla 15	Efecto físico de los solventes sobre copolímeros de injerto caucho- estireno.	57
Tabla 16	Efecto físico de los solventes sobre copolímeros de injerto caucho- estireno con adición de PVC.	57

LISTA DE GRÁFICAS

	Pag.
Gráfica 1. .Resistencia al ataque de químicos de polímeros caucho-estireno.	55
Gráfica 2. Efecto de la adición de PVC sobre la resistencia al ataque de químicos de polímeros caucho-estireno.	56
Gráfica 3. Densidad aparente de los polímeros obtenidos.	58
Gráfica 4. Densidad absoluta de los polímeros.	59
Gráfica 5. Porcentaje de agua absorbida por el polímero.	61
Gráfica 6. Velocidad de llama del polímero.	62
Gráfica 7. Temperatura de reblandecimiento.	64
Gráfica 8. Dureza de los copolímeros de injerto caucho-estireno	67
Gráfica 9. Esfuerzo Vs deformación unitaria de los copolímeros caucho-estireno sintetizados.	69

LISTA DE FIGURAS

		Pag.
Figura 1.	Mecanismo de reacción para la polimerización caucho-estireno	12
Figura 2.	Esquema de obtención de copolímeros de injerto caucho-estireno	22
Figura 3.	Caucho natural utilizado para la experimentación.	29
Figura 4.	Procedimiento de síntesis de copolímeros de injerto caucho-estireno y caucho-estireno-PVC.	33
Figura 5	Montaje para dispersar el PVC en ciclohexanona.	37
Figura 6.	PVC limpio.	38
Figura 7.	Montaje de homogenización para el caucho-estireno.	40
Figura 8.	Ensayos para obtención de condiciones de operación	47
Figura 9.	Ensayos eliminados por polimerización no homogénea.	48
Figura 10.	Ensayos de fase homogénea.	48

Figura 11.	Copolímero con una relación caucho-estireno 6:100.	49
Figura 12.	Copolímero con una relación caucho-estireno 8:100	50
Figura 13.	Copolímero caucho estireno en vidrio pirex.	50
Figura 14.	Copolímero con una relación caucho/estireno 8:100 y una relación caucho/PVC 1:4	52
Figura 15.	Probetas para ensayos de tensión-deformación	68

LISTA DE ANEXOS

		Pag.
Anexo A	Formulación y observaciones de los polímeros sintetizados	78
Anexo B	Densidad aparente	79
Anexo C	Densidad absoluta	80
Anexo D	Absorción de agua	81
Anexo E	Velocidad de llama	82
Anexo F	Temperatura de reblandecimiento	83
Anexo G	Graficos de TGA	84
Anexo H	Dureza	90
Anexo J	Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción	91

TITULO*: COPOLIMEROS DE INJERTO, EFECTOS DE LA ADICIÓN DE PVC POST-CONSUMO SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL SISTEMA CAUCHO-ESTIRENO

AUTOR

VANESSA RODRIGUEZ FRANCO**

PALABRAS CLAVES

Propiedades, Copolímero, PVC, Caucho-Estireno.

DESCRIPCIÓN

Se realizó un estudio con el fin de determinar la variación de algunas propiedades físico-químicas y físico-mecánicas de los copolímeros caucho-estireno, al adicionarle PVC post-consumo.

El estudio se dividió en cuatro etapas experimentales, las cuales se iniciaron con la dispersión de caucho en estireno; seguido con la determinación de las condiciones de operación (relaciones caucho-acelerante, caucho-catalizador y temperatura) a las cuales se llevaría a cabo la síntesis de los copolímeros; posteriormente se llevo a cabo la síntesis de los copolímeros caucho-estireno y a condiciones iguales se llevo a cabo la obtención de los copolímeros utilizando como aditivo PVC post-consumo. Luego se evaluaron las propiedades físico-mecánicas y físico-químicas de los copolímeros sintetizados y a determinar el efecto de la adición de PVC sobre dichas propiedades.

En términos generales se pudo establecer que el PVC post-consumo actúa como plastificante, lubricante y retardante de llama, disminuyendo la temperatura de reblandecimiento, disminuyendo el consumo de energía y facilitando el flujo del material fundido. Se logró incorporar a la matriz del copolímero caucho-estireno, PVC post-consumo en una relación caucho-PVC 1:4 en peso, encontrándose que no hay cambios negativos

* Proyecto de grado.

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Edgar Fernando Castillo

significativos en las propiedades físico-mecánicas, mejorando algunas de ellas como la capacidad de absorción al impacto.

TITLE*: COPOLYMER OF IMPLANT. EFFECTS OF THE ADDITION OF PVC POST-CONSUMPTION ON SOME PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF THE SYSTEM RUBBER-STYRENE

AUTHOR

VANESSA RODRÍGUEZ FRANCO.**

KEY WORDS

Properties, Copolymer, PVC, Rubber-Styrene.

SUMMARY

A research it was carried out in order to determine the variation of some physical-chemical and physical-mechanical properties of a copolymer rubber-styrene, when adding PVC post-consumption.

Four experimental stages were carried out. The first stage was the rubber dispersion in styrene; A second stage was to determine the optimal operation conditions (temperature and the rubber(accelerate) to rubber(catalyst) ratio) for the copolymers synthesis; A third stage consisted in to synthesize, at the same conditions, both the rubber-styrene copolymer and the PVC post-consumption copolymer. The final stage was the evaluation of the physical-mechanical and physical-chemical properties of the synthesized copolymer and to determine the effect of the addition of PVC on these properties.

It was established that the PVC post-consumption can act as a plasticizer, lubricant and flame retardant. Besides, it can diminishing the temperature profiles and the energy requirements, and the flow conditions of the melted copolymers. It was possible to incorporate to the matrix of the copolymer rubber-styrene, PVC post-consumption in a ratio rubber-PVC 1:4 in weight, finding that the additive does not produce significant changes in the principal

* Degree Project.

** Industrial University of Santander. Physic-chemical Engineerings Faculty. Chemical Engineering Department. Director: Edgar Fernando Castillo.

physical-mechanical properties, improving some of them as the capacity of absorption to the impact.

INTRODUCCION

Los polímeros se consideran como el material que revolucionó la industria en el siglo XX, es por ello que anualmente se invierten miles de millones de dólares en investigación para desarrollar nuevos materiales. Paralelamente, el sector industrial dedicado a la producción de los mismos, ha tomado un especial interés en disminuir los riesgos medioambientales que puedan producir materiales poliméricos, por lo que se hace necesario encontrar los mecanismos más apropiados para el tratamiento de los mismos una vez terminada su vida útil.

La polimerización de estireno produce un termoplástico transparente, incoloro, duro y rígido. Para algunas aplicaciones se le adiciona caucho con el objetivo de impartirle tenacidad, extensibilidad y resistencia al impacto.

Este estudio desarrolla la posibilidad de fabricar copolímeros de injerto caucho-estireno utilizando la técnica de polimerización en solución. Con el fin de contribuir con los esfuerzos que se están realizando actualmente en reciclar PVC y darle un nuevo uso acorde con las necesidades actuales de nuestra sociedad, en el presente proyecto se hará el estudio de un posible nuevo método de reciclaje químico de PVC al utilizarlo como aditivo en los copolímeros caucho-estireno.

En este trabajo se desarrolla un primer capítulo, en el cual se presenta los fundamentos teóricos del estudio realizado. Un segundo capítulo en el cual se muestra el desarrollo experimental, seguido a lo largo de la investigación. Un tercer capítulo con los resultados obtenidos y el análisis de los resultados. Un cuarto capítulo con las conclusiones del trabajo y un quinto y último con las recomendaciones que surgen a través del mismo.

1.MARCO TEORICO

En este capítulo se desarrolla la fundamentación teórica tenida en cuenta para llevar a cabo el presente proyecto.

1.1. PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN

Existen diversos procesos para unir moléculas pequeñas con otras para formar moléculas grandes. Su clasificación se basa en si la unidad de repetición del polímero contiene los mismos átomos que el monómero o no. Según esté criterio, Carothers [1] clasificó a los procesos de polimerización en *polimerización de adición*, si el polímero tiene los mismos átomos en la unidad de repetición y en el monómero; y *polimerización por condensación*, si contiene menos átomos en su unidad de repetición que en sus reactivos.

1.1.1. *Polimerización por condensación.*

En la polimerización por condensación tiene lugar el enlace entre unidades monómeras, que han de tener al menos dos grupos funcionales. Durante el proceso de polimerización se forman productos secundarios que generalmente son agua o alcohol, razón por la cual, los polímeros de condensación contienen menos átomos en su unidad de repetición que en los reactivos, y el esqueleto del mismo contiene normalmente átomos de más de una clase de elementos, [2].

Se dice que la polimerización por condensación es escalonada, porque el peso molecular del polímero aumenta de manera lenta y escalonada a

medida que aumenta el tiempo de reacción. Mientras que los polímeros de condensación sólo constituyen un pequeño porcentaje de los polímeros sintéticos, la mayoría de los polímeros naturales son de este tipo.

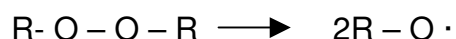
1.1.2. Polimerización por adición.

En el método de adición para elaborar polímeros se utiliza el monómero como materia prima. Monómero es una sustancia de moléculas pequeñas que finalmente forman el polímero al unirse en largas cadenas moleculares. La característica que comparten todas las moléculas pequeñas capaces de formar polímeros por adición es que son químicamente insaturadas. Esto significa que poseen un doble enlace entre dos de sus átomos de carbono; un ejemplo de esto es el doble enlace presentado por el estireno.

Un enlace doble en una molécula es un punto vulnerable para el ataque químico. Esto es lo que sucede cuando un monómero insaturado se convierte en un polímero. El mecanismo de ataque puede ser una escisión hemolítica del doble enlace para formar *radicales libres*, o sea, se separa el par de electrones que conforma el doble enlace. El efecto total es que el doble enlace se substituye por uno simple y la molécula aumenta de tamaño para formar con el tiempo un polímero. En la reacción básica de formación de polímeros, los enlaces dobles (o sitios de instauración) son lugares donde se lleva a cabo la reacción en una molécula, lo cual sugiere que los polímeros que los contienen deben ser químicamente reactivos. En los copolímeros se usan dos (u ocasionalmente tres) tipos diferentes de monómeros en un polímero simple, para obtener propiedades especiales [3].

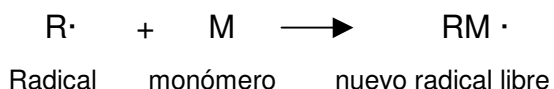
La polimerización por adición puede tener lugar según un mecanismo de polimerización por radicales libre o según un mecanismo iónico.

N *Polimerización por radicales libre*: esta polimerización se lleva a cabo por etapas, la primera de ellas es la de *iniciación*, esta puede ser comenzada por acción de la luz, del calor, de ondas ultrasónicas o de formadores de radicales. Como formadores de radicales o iniciadores se designan aquellas sustancias que por el calor se descomponen fácilmente en radicales [4]. La descomposición de estas sustancias en radicales puede presentarse así:



La activación por formadores de radicales constituye el tipo más corriente de polimerización radical, ya que los otros tipos de iniciación quedan limitados a unos pocos casos de interés teórico, pero escasa aplicación técnica.

La segunda etapa es conocida como de propagación o crecimiento del polímero en la cual el radical libre (un ión o sustancia con un electrón desapareado), es capaz de reaccionar para abrir el doble enlace de un monómero y adicionarse a él, reproduciendo el centro activo (un electrón desapareado) en un extremo de la molécula ahora activa, el cual reacciona con otro monómero formando un nuevo radical mayor, que a su vez adiciona otro monómero y así sucesivamente. Estas reacciones son muy rápidas, ya que intervienen radicales en procesos que implican energías de activación muy bajas. El crecimiento de la molécula de polímero se lleva a cabo así:



La tercera etapa es la de terminación que puede ocurrir por *recombinación*, es decir por acoplamiento de dos macrorradicales por medio de un enlace covalente, o por *desproporción*, este proceso de

terminación incluye la transferencia de un átomo de Hidrogeno del extremo de una cadena al radical libre del extremo de otra cadena en crecimiento resultando una macromolécula saturada y otra no saturada.

N *Polimerización iónica*: la diferencia esencial entre la polimerización iónica y la de radicales libres estriba en el distinto mecanismo de reacción seguido en el proceso, como consecuencia de la distinta naturaleza de los iniciadores implicados en el mismo. La polimerización iónica no es influida por los inhibidores, en cambio, es muy influida por la polaridad del medio, aumentando la velocidad de polimerización al aumentar la constante dieléctrica [5].

La polimerización iónica, como la radical, se desarrolla en tres etapas: iniciación, crecimiento y ruptura. El mecanismo seguido en el proceso puede ser catiónico o aniónico. La *polimerización catiónica* es activada por ácidos como H_2SO_4 , H_3PO_4 , $HClO_4$, etc., o por catalizadores de Friedle-Crafts, como $SnCl_4$, $TiCl_4$, etc., en presencia de un cocatalizador como agua, ácidos o alcoholes, mientras que la *polimerización aniónica* es inducida por bases como hidróxidos alcalinos OH^- , metilato sódico CH_3ONa , sodoamina NH_2Na , compuestos organometálicos como RNA , R_3AL , etc. [4]. El que un compuesto monómero polimeriza catiónica o aniónicamente depende de la naturaleza de los sustituyentes del doble enlace.

1.2. TÉCNICAS DE POLIMERIZACIÓN RADICAL

1.2.1. Polimerización en masa. En esta reacción de polimerización la mezcla contiene solo el monómero y el iniciador, en ella ocurre una autoaceleración y los polímeros obtenidos poseen una alta pureza óptica, altos pesos moleculares a altas velocidades de polimerización y son libre de

contaminantes. Sin embargo, estas propiedades son opacadas por desventajas como son, la insolubilidad del polímero en ciertos casos, la transferencia del calor de polimerización, y la formación de reacciones alternas en sistemas altamente viscosos que por lo general afectan las propiedades del polímero que se está formando.

Debido a que el peso molecular y la viscosidad de la reacción se incrementan a medida que transcurre la reacción, la evaporación de los productos volátiles de la reacción de policondensación (agua o alcohol) es más difícil aún bajo condiciones de presión reducida, por lo que se requiere que la temperatura de reacción se incremente constantemente [6].

1.2.2. Polimerización en suspensión. El proceso de polimerización en suspensión es esencialmente un proceso de polimerización a granel, en el cual, se produce una suspensión de un monómero suspendido por agitación en forma de gotitas de agua, que actúa como fase inerte y permite regular y eliminar mejor el calor de reacción.

Para evitar la sedimentación de las gotas suspendidas de monómeros, y el apelmazamiento de los gránulos viscosos en que se convierte el polímero durante la polimerización, se le adiciona al agua pequeñas cantidades de un coloide protector (0.1-0.5 por 100), como son almidón, alcohol polivinílico etc.

La polimerización por suspensión utiliza iniciadores solubles en el monómero. El polimerizado se obtiene en forma de pequeños gránulos muy puros, que pueden separarse del agua por filtración o centrifugación [4].

1.2.3. Polimerización en solución. El proceso de polimerización en solución se presenta si un monómero y su polímero resultante son solubles en el solvente en el que está trabajando. Cuando la polimerización se lleva a cabo en solventes inertes, la velocidad de reacción y el grado de polimerización disminuyen a medida que la concentración del monómero disminuye con una concentración constante de iniciador.

En muchos casos, el solvente participa en la reacción, por ejemplo en polimerizaciones por radicales, la presencia de solvente facilita la transferencia de calor, reduce la viscosidad del medio y las moléculas del solvente pueden participar en reacciones de transferencia con los macrorradicales que crecen, lo que resulta en una disminución del grado de polimerización (la velocidad de polimerización permanece constante). De este proceso, resulta una solución altamente viscosa del polímero en el disolvente, que se emplea como tal, ya que la separación total del disolvente es difícil y antieconómica.

El proceso de polimerización en solución se usa para producir resinas altamente especializadas que sirven para revestimiento de metales, fabricación de discos, polvos para revestimientos, y acabados superficiales que requieren alta resistencia. Se tienen que pagar mayores precios por estas resinas de alta calidad. [7].

1.2.4. Polimerización en emulsión. La polimerización en emulsión es un método de uso generalizado para obtener polímeros por reacción en cadena utilizando radicales libres como mecanismo iniciador.

El proceso de polimerización por emulsión, involucra la polimerización de un

monómero en un medio acuoso que contiene al surfactante y un iniciador soluble en agua. Las partículas que se forman son de alrededor de 0.05 a 5 μ m de diámetro. El medio dispersante es un líquido donde varios componentes están dispersos en un estado de emulsión gracias al agente emulsificante; este medio es por lo general agua. El agente emulsificante es un surfactante cuya acción se debe a los segmentos hidrofílicos e hidrofóbicos presentes en la estructura. El sistema emulsificante se mantiene generalmente en un estado de buena agitación durante la reacción.

En el sistema emulsificante, una pequeña fracción del agente emulsificante está disuelto en agua, las moléculas emulsificadas se juntan para formar las miscelas. Cuando un monómero parcial o totalmente soluble en agua es agregado, una pequeña fracción se disuelve y otra va a la solución.

El iniciador está presente en la fase acuosa y es aquí donde se producen los radicales iniciadores; la polimerización del monómero se lleva a cabo pero no es apreciable debido a la baja concentración del monómero en solución. La polimerización ocurre exclusivamente dentro de las miscelas, las cuales, actúan como punto de encuentro para el monómero orgánico y el iniciador soluble en agua. A medida que la polimerización se lleva a cabo, las miscelas crecen inicialmente por la adición del monómero de la fase acuosa en solución y subsecuentemente de las gotículas del monómero. El sistema contiene miscelas activas donde ocurre la polimerización y miscelas inactivas donde no hay polimerización.[8].

La polimerización sigue homogéneamente en las partículas del polímero mientras la concentración del monómero se mantenga constante por la difusión del monómero que se encuentra en las gotículas. A un 50 – 80% de conversión, desaparecen las gotículas de monómero y las partículas poliméricas contienen todo el monómero sin reaccionar. La polimerización sigue a una velocidad decreciente constante mientras que la concentración del monómero en las partículas poliméricas decrece [9].

La polimerización por emulsión difiere de la de suspensión en el tamaño más pequeño de partícula y en el tipo de partículas donde ocurre la polimerización.

1.2.5. Polimerización en cadena. Las polimerizaciones en cadena se pueden llevar a cabo con mezclas de dos monómeros para formar un producto polimérico con dos estructuras diferentes en su cadena. Existen cuatro tipos de copolímeros en cuanto a su estructura se refiere: aleatorio, alternante, de bloque y de injerto. El copolímero alternante contiene las dos unidades de monómeros en cantidades equimolares en una distribución regular alternante. Los copolímeros de bloque e injerto difieren de los dos anteriores porque existen en sus cadenas largas secuencias de cada monómero. Un copolímero de bloque es un copolímero lineal con una o más secuencias largas ininterrumpidas de cada especie polimérica, mientras que un copolímero de injerto es un copolímero ramificado con la columna vertebral de un monómero al que se unen una o más cadenas del otro monómero. El mecanismo de polimerización en cadena es iniciado por radicales libres o por iones, en el caso presente, se aplicará la iniciación por radicales libres.

1.3. COPOLIMERIZACIÓN

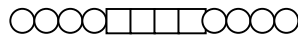
Un copolímero es una sustancia formada por macromoléculas que contienen meros de diferentes monómeros, unidos entre sí por enlaces químicos primarios. El proceso de producción de estos materiales es llamado copolimerización [8].

Los copolímeros pueden resultar de reacciones en cadena, ya sea por el mecanismo de radicales libres, o el mecanismo iónico; o también pueden resultar de reacciones por etapas.

La importancia básica de los copolímeros consiste en que presentan propiedades físicas y mecánicas mucho más útiles en determinados casos que las encontradas en los homopolímeros (polímeros compuestos por un solo monómero) por separado o en mezclas mecánicas de los mismos.

Estos copolímeros se forman como secuencias largas de monómeros ordenadas de dos posibles maneras:

N *copolímeros de bloque*: contienen repetidamente las secuencias, en un arreglo lineal, de un monómero seguido de otra secuencia del segundo monómero. Se obtienen a partir de una reacción de polimerización controlada.



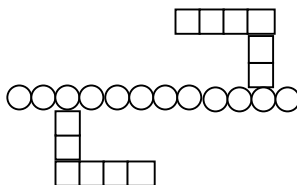
Mientras que los copolímeros de bloque no se encuentran en la naturaleza, se han sintetizado copolímeros de bloques utilizando todas las técnicas de polimerización conocidas. Los copolímeros de bloque que constan de secuencias de monómeros largas se producen accidentalmente cuando se funden mezclas de poliésteres distintos o mezclas de poliésteres y poliamidas.

Los copolímeros de bloque producidos por reacción en cadena cuyo uso se halla más extendido son los que se obtienen añadiendo un monómero nuevo a un macroanión. Estos últimos han sido llamados "polímeros vivos" por Szwarc.[8]. La adición de un segundo monómero al polímero todavía activo conduce a un copolímero de bloque no contaminado con el homopolímero y con bloques de longitud conocida y controlada con exactitud. El proceso puede repetirse cuidadosamente para producir polímero multibloque.

Los copolímeros de bloque se pueden sintetizar por varios métodos, pero el más frecuente y el que se utiliza para llegar a un copolímero

100% tipo bloque, es el método iónico ya que este método garantiza la secuencia ordenada de los monómeros a reaccionar.

N *Copolímeros de injerto*: es cuando el monómero forma una cadena ramificada; se une en un sitio activo con la cadena principal de polímero.



La copolimerización de injerto resulta de la formación de un lugar activo en un punto de una molécula de polímero distinto de su extremo, y de su exposición a un segundo monómero. La mayoría de los copolímeros de injerto se forman por polimerización radical. La reacción de activación más importante es la transferencia de cadena al polímero. En muchos casos, la reacción de transferencia implica la eliminación de un átomo de hidrógeno.

La polimerización por radicales libres de un monómero en presencia de un polímero puede resultar en un injerto debido a la formación de radicales en la columna vertebral del polímero por la transferencia en cadena del monómero que se propaga. El método REDOX puede ser el más eficiente para llevar a cabo la reacción de polimerización por injerto [1].

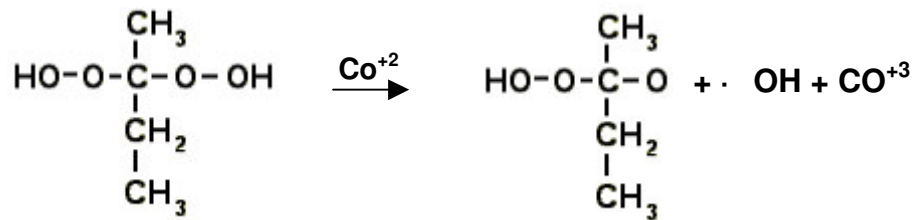
1.4. SÍNTESIS DE LOS COPOLÍMEROS CAUCHO-ESTIRENO.

La síntesis del copolímero de injerto caucho-estireno se realizó mediante una reacción en solución vía radical libre por transferencia de cadena, en la cual el iniciador ó catalizador (MEK peróxido), con ayuda de un acelerante (Naftenato de cobalto), activa las insaturaciones tanto del monómero estireno

como del caucho natural. Las reacciones que ocurren se presentan en la figura 1.

Figura 1. Mecanismo de reacción para la polimerización caucho-estireno.

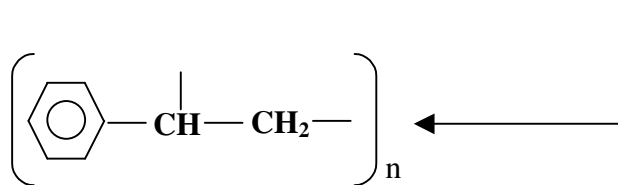
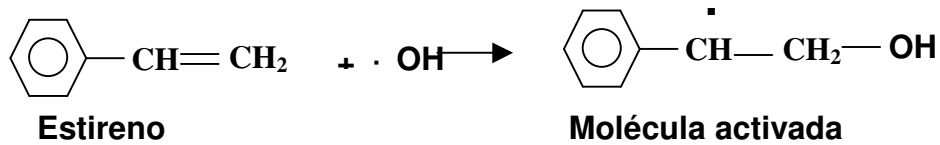
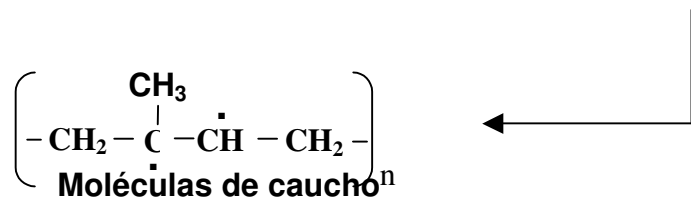
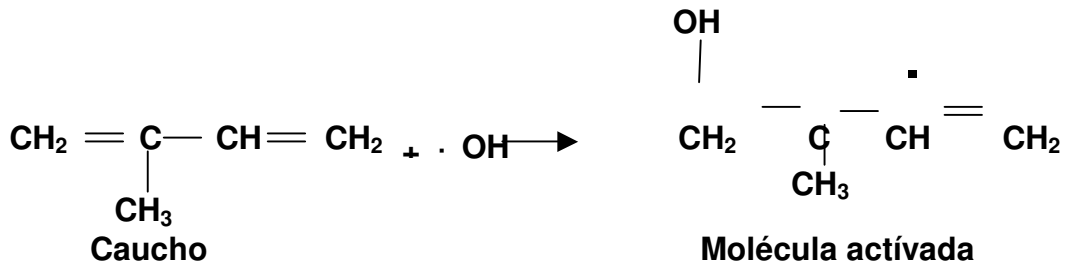
- **Iniciación**



MEK peróxido

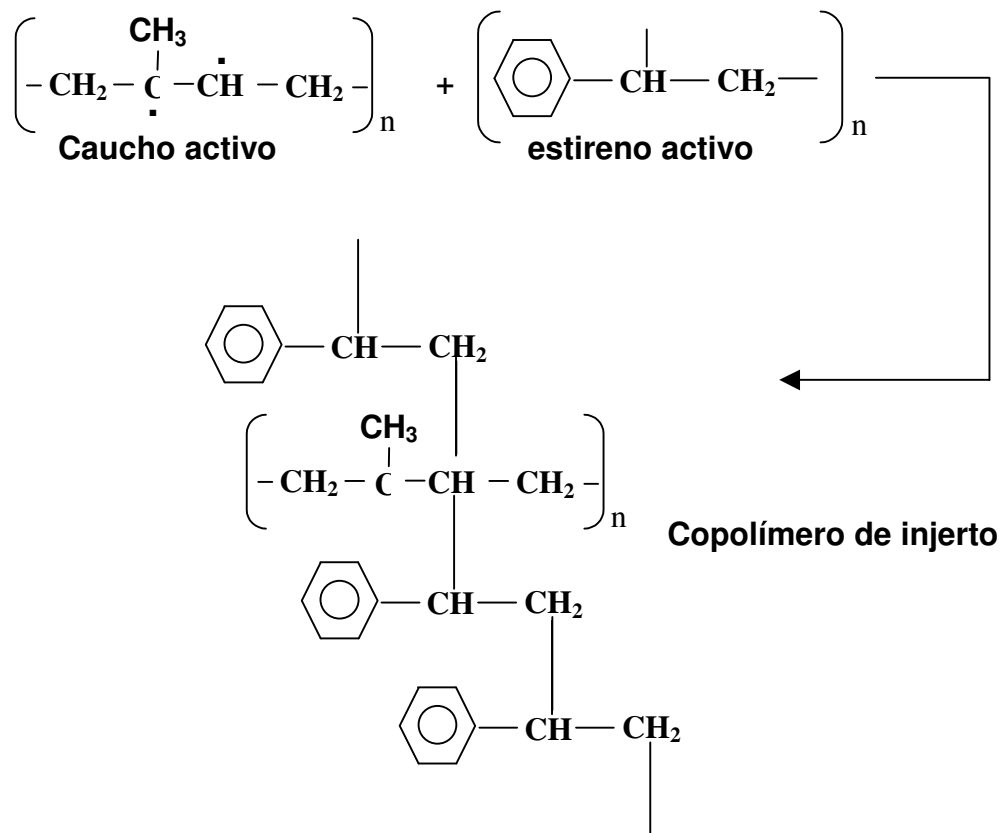
- **Propagación**

En esta sección se mecanismo de activación de las moléculas de caucho y estireno.



Molécula repetitiva

Como existen tanto moléculas de estireno como de caucho y la proporción de estireno es mucho mayor que la de caucho, entonces es posible que ocurran dos reacciones. Por una parte la polimerización estireno-estireno y por otra la polimerización caucho- estireno, la cual está favorecida por el contacto íntimo que existe entre las moléculas de caucho y estireno, al estar el caucho disperso en el mismo.



La polimerización puede producirse por entrecruzamiento, es decir, se forman cadenas de poliestireno que servirán para unir entre sí varias cadenas de caucho.

1.5. USOS Y APLICACIONES DE LOS COPOLÍMEROS DE INJERTO

Quizás una de las propiedades más sobresalientes de los copolímeros es su morfología bifásica, que es la responsable del comportamiento de elastómero termoplástico. Sin embargo, se debe reconocer que no todos los copolímeros son elastómeros termoplásticos, y viceversa.

Los elastómeros termoplásticos tienen gran variedad de aplicaciones en la industria, entre las que se destacan, la automotriz, eléctrica y electrónica, para sellantes, adhesivos y ropa deportiva. En contraste con los cauchos termoestables convencionales, químicamente intercrossados, estos materiales pueden ser fabricados de manera económica mediante procesos similares a los utilizados en termoplásticos, por ejemplo, inyección, extrusión, y formado al vacío. Su reprocesamiento se puede llevar a cabo ya que no hay necesidad de una vulcanización. Además de competir con los cauchos convencionales debido a la economía de su procesamiento, también compiten con otros termoplásticos flexibles pero no elastómeros, como en el bajo módulo de los copolímeros del etileno, y en la plasticidad de los cloruros vinílicos.

Otro aspecto para resaltar de los elastómeros termoplásticos es su fácil recuperación, su rango de temperatura de uso más amplio, y en muchos casos, sus propiedades mecánicas. Las cuales justifican en muchos casos los costos generalmente altos de los elastómeros termoplásticos.

Los copolímeros también son utilizados en membranas semi-permeables, tales como separación de gases o líquidos, desalinización, ultrafiltración y control de contaminación. Se emplean en aplicaciones biomédicas que incluyen, órganos artificiales, prótesis reconstructivas. Por ejemplo, las propiedades mecánicas y la apariencia de la piel humana, se pueden simular mediante copolímeros pigmentados de bajo módulo y alta resistencia.

En las aleaciones, los copolímeros se pueden emplear de dos formas. En la primera, el copolímero se mezcla con un homopolímero correspondiendo a uno de los segmentos. En estas mezclas, se espera que el otro segmento del copolímero imparta ciertas propiedades especiales, mientras que el segmento común provea la compatibilidad mecánica. Por ejemplo, la resistencia al impacto o la resistencia química de los polímeros rígidos puede ser mejorada con la adición de copolímeros elastómeros o de copolímeros semi-cristalinos. La segunda forma en que se pueden utilizar los copolímeros en las aleaciones es como agente compatibilizante. La compatibilidad cerámica, y por ende las propiedades mecánicas, de las mezclas de dos homopolímeros pueden mejorarse mediante la incorporación de pequeñas cantidades del correspondiente copolímero. Esto se debe a la capacidad emulsificante del copolímero en la interfase homopolímero-homopolímero, que reduce la tensión interfacial y facilita la buena dispersión de una fase dentro de la otra. [10].

1.6. ENSAYOS MECÁNICOS PARA COPOLÍMEROS DE INJERTO

Las propiedades mecánicas de los polímeros, permiten determinar el comportamiento del mismo cuando se somete a una carga axial ó cuando le es aplicada una fuerza[11].

1.6.1 Resistencia a la tracción. La resistencia a la tracción esta definida por la norma ASTM D412 como la carga por unidad de superficie de la sección transversal original, aplicada en el momento de la rotura de la probeta. Está prueba puede determinarse aplicando una fuerza al material de ensayo hasta que se rompa y consiste en someter el polímero a la acción de un esfuerzo unidireccional a velocidad controlada de deformación, generalmente en el modo de tracción.

Otra propiedad importante para los polímeros es el *alargamiento* o deformación, está se define como la extensión producida, entre las marcas de referencia, por un esfuerzo de tracción aplicado a la probeta, y viene expresado como un porcentaje de la distancia primitiva entre las señales [12]. El alargamiento a la rotura es obtenido en el momento de romperse la probeta.

El principio es el siguiente: una probeta en forma de halterio de 16 cm de longitud, es sujeta por sus dos extremos por unas mordazas que posee el aparato de ensayo. La primera está fija. La otra es arrastrada por motor y tornillo sin fin, a una velocidad constante. El esfuerzo y la fuerza aplicada se representan en función de la deformación y el alargamiento. éstas dos se pueden analizar a partir de una curva de tensión-deformación, en la cual, se pueden obtener datos como : módulo de elasticidad, resistencia a la tracción en fluencia y en rotura y los niveles de deformación citados en estos puntos.

El módulo elástico (también llamado módulo de elasticidad ó módulo de tracción) es la relación del esfuerzo aplicado y la deformación que produce en el intervalo en que la relación entre esfuerzo y deformación es lineal. La resistencia a la tracción máxima es igual al esfuerzo necesario para causar rotura dividido por en área de la sección transversal mínima de la probeta sujeta a ensayo.

Este análisis nos permite hacer una evaluación estática del compuesto ya que sin depender del tiempo sometemos el polímero a una fuerza de tracción que producirá a su vez una deformación ya sea plástica, elástica, ó una combinación de las dos, dependiendo del tipo de polímero que se está evaluando.

1.6.2. Dureza. La dureza es una medida de la resistencia de un material a la deformación (plástica) permanente. La dureza se mide deformando con un material su superficie. El elemento penetrador que es generalmente una

esfera, una pirámide o un cono, se fabrica de un material mucho más duro que el material que está siendo ensayado. Para la mayoría de los ensayos estándar se emplea una carga conocida, presionando ligeramente el penetrador 90° en la superficie del material que está siendo ensayado [13,14].

Después de que la hendidura ha sido realizada, se retira el penetrador de la superficie. Entonces, se calcula un número empírico de dureza o se hace la lectura de en un dial (o una pantalla digital), con base al área de la cuadrícula o a la profundidad de la incrustación.

En el caso de los polímeros a evaluar, utilizaremos un durómetro Shore tipo D, el cual está diseñado para polímeros duros.

Este ensayo al igual que el de tensión-deformación, nos permite analizar el grado de homogeneidad de la mezcla, así como el mejoramiento de sus propiedades.

1.7. ENSAYOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA COPOLÍMEROS DE INJERTO

1.7.1 Resistencia a productos químicos. La resistencia química es la capacidad de un material para desempeñar satisfactoriamente su función en un ambiente químico dado [12]. El ensayo típico de resistencia química (ASTM-D543-87) mide el porcentaje de variación de peso de muestras sujetas a ensayo después de la inmersión en una gran variedad de sistemas líquidos durante 7 días. En el presente trabajo se evaluará la resistencia de los polímeros a 6 productos químicos en los cuales se mostró insoluble.

Puesto que el ataque químico implica cambios de la estructura química, puede observarse fácilmente numerosos métodos instrumentales que determinan la estructura química [1].

1.7.2 Densidad. La densidad de una muestra polimérica es una de las variables primarias que se necesita conocer para la caracterización del material. La densidad absoluta se define como la masa por unidad de volumen de material. Varía inversamente con la temperatura y con la longitud de la cadena. La presencia de átomos de gran masa atómica en los polímeros usualmente incrementa la densidad.

Los valores de densidad obtenidos en este experimento no se consideran como absolutos, pues están sujetas a un gran número de errores causados por la presencia de zonas no homogéneas como son, imperfecciones de superficie, burbujas de aire atrapadas, y la presencia de monómero [13].

La densidad sirve para identificar un material y también para seguir los cambios físicos en un ensayo. Cambios en la densidad pueden deberse a cambios en la cristalinidad, pérdida de plasticidad, absorción de solvente, o por otras causas.

Siguiendo una de las normas ASTM: D792-66 para la determinación de densidad de polímeros se realizaron los ensayos sobre los polímeros sintetizados.

1.7.3 Absorción de agua. Este método consiste en determinar la velocidad relativa de absorción de agua de materiales poliméricos cuando estos son inmersos durante 96 horas. Este método sirve para determinar los efectos que tendría la exposición a agua y condiciones de humedad sobre la

uniformidad y las propiedades físicas y mecánicas del material. El método seguido para este experimento es el propuesto en la norma ASTM D570-81.

1.7.4 Análisis Termogravimétrico (TGA). El análisis TGA es una herramienta que sirve para determinar la temperatura de descomposición térmica de los materiales, con el fin de evaluar su estabilidad térmica. En este análisis se usa una balanza muy sensible para seguir la variación de peso de un polímero en función del tiempo y de la temperatura. Los tamaños de muestra normales para la instrumentación comercial se encuentran en el margen de 0.1 mg hasta 10 g con velocidades de calentamiento desde 0.1 hasta 50 °C/min. Las velocidades de calentamiento empleadas más habitualmente son 10, 15, 20, 25 y 30 °C/min [15,16].

Este análisis aporta al desarrollo de nuevos compuestos en la medida que con él podemos elaborar un control de calidad y medir los efectos que los aditivos puedan tener sobre el compuesto. Además, nos permite evaluar la estabilidad térmica en atmósfera inerte, oxidación en aire o atmósfera rica en oxígeno, degradación térmica de polímeros, estudios de la cinética de degradación y análisis de los productos obtenidos.

1.7.5. Inflamabilidad. Un polímero rígido al quemarse sufre una degradación. Un prerequisite necesario para que la combustión se mantenga es que el polímero forme combustibles volátiles. Cuando se dirige un alto flujo de calor sobre cualquier polímero, la degradación a los productos volátiles ocurrirá.

Medir la velocidad de quemado de un material polimérico sirve para estimar el comportamiento inherente al material en el momento de ser sometido a altas temperaturas. Quemando un polímero puede proporcionar a menudo

las pistas de su identidad, pues muchos polímeros producen cantidades significantes de su monómero al ser quemados [15].

La determinación de las Características de inflamabilidad de los copolímeros obtenidos en este trabajo se hará según lo estipulado en las normas ASTM D4804-88.

1.7.6 Solubilidad. La solubilidad de un polímero, en cierto disolvente, a una determinada temperatura depende del peso molecular y de su distribución [17].

Las propiedades de los polímeros incluyendo los valores de la temperatura están relacionados con la fuerza de los enlaces covalentes, la rigidez de los segmentos de la cadena principal del polímero y la magnitud de las fuerzas intermoleculares entre las moléculas del polímero. Cuando se disuelve un polímero, el primer paso es un hinchamiento lento llamado solvatación en el que el tamaño de la molécula del polímero se multiplica por un factor que depende de la densidad de energía de cohesión. Para que se produzca la disolución es fundamental que la energía libre de Gibbs, que es la fuerza principal en el proceso de disolución, disminuya [18].

Con este análisis se pretende evaluar el comportamiento de los diferentes homopolímeros y copolímeros, utilizando diferentes solventes orgánicos e inorgánicos y así evaluar la selectividad del solvente a cada uno de los componentes de la mezcla.

2. DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

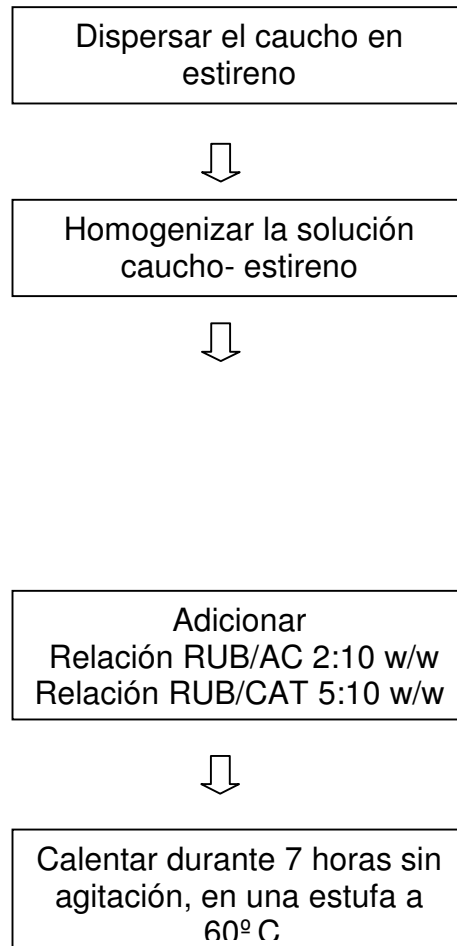
En el presente capítulo se describe el procedimiento experimental para la síntesis de los copolímeros caucho estireno y para la realización del estudio de los efectos que tiene la adición de PVC postconsumo sobre el mismo.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El copolímero de injerto caucho-estireno se sintetizó con la siguiente metodología. Inicialmente se ensayó la solubilidad del caucho en el estireno. En esta prueba, a 5 gramos de caucho se le adicionó estireno para poder hincharlo, luego se agitó constantemente hasta obtener una dispersión totalmente homogénea; la cual se logró con 45 gr de estireno, a temperatura ambiente.

En la figura 2 se muestra un esquema general para la obtención de copolímeros caucho-estireno.

Figura 2. Esquema de obtención de copolímeros de injerto caucho-estireno



Donde:

RUB: es el caucho natural.

AC: es el acelerante utilizado en la reacción. Naftenato de cobalto.

CAT: es el catalizador utilizado en la polimerización. MEK peróxido.

Seguidamente se determinaron las condiciones de operación para obtener el copolímero de injerto caucho estireno. Para determinar dichas condiciones de operación se variaron las relaciones de caucho-acelerante (RUB/AC) y

caucho-catalizador (RUB/CAT) manteniendo la relación caucho-estireno (RUB/EST) y la temperatura constantes. El acelerante y el catalizador utilizados en esta experimentación son el Naftenato de cobalto y el MEK peróxido respectivamente. La matriz experimental se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =25°C

		RUB/EST = 6/100			T = 25 °C	
RUB/CAT	RUB/AC	1:10	2:10	3:10	4:10	5:10
	1:10	T101	T111	T121	T131	T141
	2:10	T102	T112	T122	T132	T142
	3:10	T103	T113	T123	T133	T143
	4:10	T104	T114	T124	T134	T144
	5:10	T105	T115	T125	T135	T145
	6:10	T106	T116	T126	T136	T146
	7:10	T107	T117	T127	T137	T147
	8:10	T18	T118	T128	T138	T148
	9:10	T19	T119	T129	T139	T149
	10:10	T110	T120	T130	T140	T150

Luego, se realizó la misma programación experimental mostrada anteriormente, pero a una temperatura de 60° C. La matriz experimental se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =60°C

		RUB/EST = 6/100			T = 60 °C	
RUB/CAT	RUB/AC	1:10	2:10	3:10	4:10	5:10

1:10	T21	T211	T221	T231	T241
2:10	T22	T212	T222	T232	T242
3:10	T23	T213	T223	T233	T243
4:10	T24	T214	T224	T234	T244
5:10	T25	T215	T225	T235	T245
6:10	T26	T216	T226	T236	T246
7:10	T27	T217	T227	T237	T247
8:10	T28	T218	T228	T238	T248
9:10	T29	T219	T229	T239	T249
10:10	T210	T220	T230	T240	T250

Paralelamente se analizaron los resultados obtenidos en las dos matrices experimentales mostradas anteriormente, con el fin de determinar las condiciones de operación a las cuales se trabajaría el polímero. Las condiciones para la síntesis del copolímero de injerto caucho estireno estudiadas son, la relación caucho-acelerante, caucho-catalizador y la temperatura. Los parámetros de selección utilizados fueron el tiempo de polimerización y la homogeneidad del material.

Luego de analizar los resultados, se realizó una preselección de los experimentos que arrojaron los mejores resultados y se realizó la experimentación a 40, 50 y 70 °C de temperatura respectivamente. La programación de los experimentos realizados se muestran en las tabas 3,4 y 5 respectivamente.

Tabla 3. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =40°C

	RUB/EST = 6/100	T = 40 °C
RUB/AC		2:10
RUB/CAT	4:10	T214

5:10	T215
------	------

Tabla 4. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =50° C

	RUB/EST = 6/100		T = 50 ° C
RUB/AC			2:10
RUB/CAT	4:10	T214	
	5:10	T215	

Tabla 5. Programación experimental para una relación caucho/estireno 6:100 y Temperatura =70° C

	RUB/EST = 6/100		T = 70 ° C
RUB/AC			2:10
RUB/CAT	4:10	T214	
	5:10	T215	

Luego de determinadas las condiciones de operación para la síntesis del copolímero caucho-estireno, se realizaron ensayos a las condiciones determinadas variando la relación caucho/estireno de 6:100, 7:100, 8:100 y 9:100 a una relación RUB/AC de 2:10, una relación RUB/CAT de 5:10 y una temperatura de 60° C. como se muestra en la tabla 6

Tabla 6. Programación experimental para una relación caucho/acelerante 2:10, caucho/ catalizador 5:10 y Temperatura =60° C

	RUB/CAT = 5/10 RUB/AC = 2/10			
Exp.	T = 60 ° C			
RUB/EST	6:100	7:100	8:100	9:100
	E1	E2	E3	E4

Posteriormente se acondicionó el PVC postconsumo para introducirlo en la reacción de polimerización caucho-estireno. Para tal efecto se varió la relación caucho-PVC como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Programación experimental para una relación caucho/acelerante 2:10, caucho/ catalizador 5:10 y Temperatura =60° C

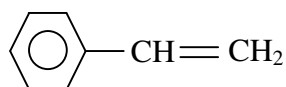
RUB/EST RUB/PVC		RUB/CAT = 5/10 RUB/AC = 2/10			
		T = 60 ° C			
		6:100	7:100	8:100	9:100
1:1		A1	A5	A9	A13
2:1		A2	A6	A10	A14
4:1		A3	A7	A11	A15
6:1		A4	A8	A12	A16

El principio utilizado para la selección de la relación caucho/ PVC fue el mismo que para la elección de las condiciones de síntesis del copolímero.

2.2. REACTIVOS UTILIZADOS

2.2.1. Estireno

Su fórmula molecular es:



Es un líquido aceitoso incoloro o amarillento, muy refractivo y de olor penetrante. Parcialmente soluble en agua, soluble en alcohol, metanol, acetona y éter. Expuesto a la luz y aire se polimeriza y oxida lentamente con formación de peróxidos [19].

El estireno empleado en esta investigación es de tipo comercial, en estado líquido y sus propiedades se muestran en el cuadro 1.

Cuadro1. Propiedades físico-químicas del estireno.

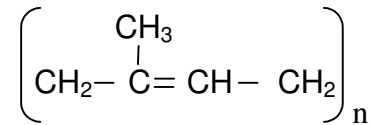
Propiedades físico-químicas	Estireno
Fórmula molecular	C8-H8
Peso molecular (g/mol)	104.14
Densidad Relativa (g/cm ³)	0.9059
Punto de ebullición (° C)	145
Punto de fusión (° C)	-31
Presión de vapor (hPa)	6

FUENTE: <http://www.inchem.org/documents/pims/chemical/pim509.htm>

- *Precauciones:* inflamable, nocivo para la salud e irritante. Presenta riesgo moderado de fuego, su límite explosivo en el aire está entre 1.1-6.1%. toxico por ingestión e inhalación. Es letal en concentraciones atmosféricas superiores a 2000 ppm.
-
- *Usos:* Poliestireno, protección catódica, poliésteres de estireno, resinas. Etc.

2.2.2. Caucho natural

Su formula molecular es:



El caucho bruto en estado natural es un hidrocarburo blanco o incoloro. El compuesto de caucho más simple es el isopreno o 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es C₅H₈. A la temperatura del aire líquido, alrededor de -195 °C, el caucho puro es un sólido duro y transparente. De 0 a 10 °C es frágil y opaco, y por encima de 20 °C se vuelve blando, flexible y translúcido. Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de 50 °C, el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso. A temperaturas de 200 °C o superiores se descompone. El caucho puro es insoluble en agua, álcalis o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos clorados y disulfuro de carbono. Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente, pero con el oxígeno de la atmósfera lo hace lentamente[18, 1].

El caucho utilizado en esta investigación proviene de las plantaciones de PROCAUCHO en playón (Santander) y se puede apreciar en la figura 3.

Figura 3. Caucho natural utilizado para la experimentación.



las propiedades físico-químicas del caucho utilizado se muestran en el cuadro 2.

Cuadro2. Propiedades físico-químicas del caucho natural disuelto en tolueno.

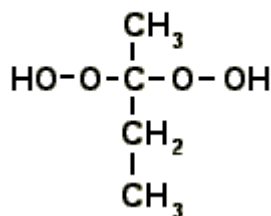
Propiedades físico-químicas	Caucho Natural
Densidad Relativa (g/cm ³)	0.95
viscosidad en tolueno (cP a 25° C)	3.97

- *Usos:* Se usa en cementos, cintas aislantes, cintas adhesivas y como aislante en mantas y zapatos.

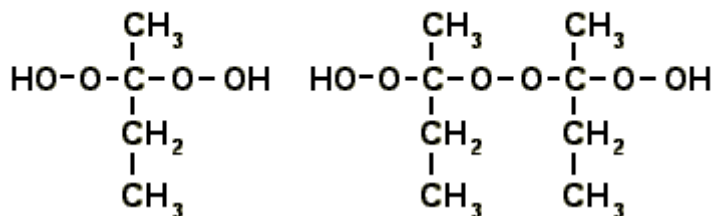
2.2.3. Peroxido de metil etil cetona (MEKP)

Es una mezcla de compuestos peroxy, que consiste básicamente en tres estructuras principales que coexisten, los porcentajes de estas estructuras cambian dependiendo de la estequiometría. Estas estructuras son:

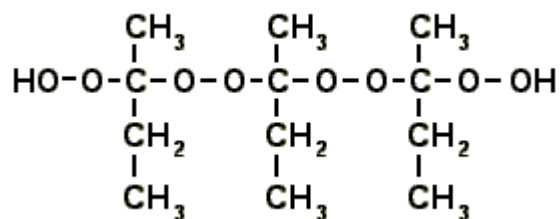
Estructura Monomérica



Estructura Dimérica



Estructura Trimérica



El MEKP es un compuesto orgánico con características fuertemente oxidantes, que no se disuelve en agua, pero es soluble en algunos

compuestos orgánicos que no promueven ninguna reacción química, tales como cetonas, alcoholes, acetatos y ftalatos.

El MEK peróxido utilizado en esta experimentación es de tipo comercial producido por UNICOR S.A. Sus propiedades físico-químicas se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Propiedades físico-químicas del MEK peróxido.

Propiedades físico-químicas	Estireno
Densidad (g/cm ³)	1.13
Temperatura de descomposición (° C)	60
Temperatura crítica (° C)	80
Flash Point copa abierta (° C)	70

FUENTE: <http://www.silaex.com.br.htm>

- *Precauciones:* Presenta un olor irritante y es corrosivo al contacto con la piel.
- *Usos:* Es un peroxido muy utilizado en el curado de resinas insaturadas de poliéster, ésteres vinílicos y furánicos por medio de anhídrido sulfuroso.

2.2.4. Naftenato de cobalto

Es un polvo marrón amorfo o sólido rojo azulado. Su formula molecular es $\text{Co}(\text{C}_{11}\text{H}_{10}\text{O}_2)_2$. Las propiedades físico-químicas del Naftenato de cobalto se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Propiedades físico-químicas del Naftenato de Cobalto.

Propiedades físico-químicas	Naftenato de cobalto
-----------------------------	----------------------

Fórmula molecular	Co C ₂₂ H ₂₀ O ₄
Peso molecular (g/mol)	407
Densidad Relativa (g/cm ³)	0.9
Punto de inflamación (° C)	49
Punto de fusión (° C)	140
Temperatura de autoignición (° C)	276

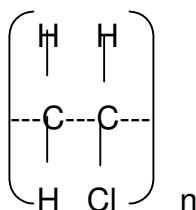
FUENTE: <http://www.mtas.es/insht/discla.htm>

El nftenato de cobalto utilizado en esta investigación es de tipo comercial y es producido por UNICOR S.A.

- *precauciones*: Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas. Es posible la explosión del polvo si se encuentra mezclado con el aire en forma pulverulenta o granular. Por calentamiento intenso se producen humos tóxicos.
- *Usos*: Se utiliza en barnices, como secador de pintura, y para unir el caucho con metales y otros polímeros.

2.2.5. Cloruro de polivinilo (PVC)

La unidad fundamental repetida del PVC es el monómero cloruro de vinilo (CVM):



Donde n varía de 700 – 1500, el PVC tiene una posición privilegiada entre los polímeros de hoy. Es relativamente económico y presenta una gama de aplicaciones por su versatilidad casi ilimitada[20].

El PVC se encuentra en dos tamaños principalmente y estos dependen del proceso usado. La suspensión y polimerizaciones de masa dan las partículas de 100-180 μm en el diámetro y el proceso de emulsión dan partículas de 0.1-3.0 μm [21].

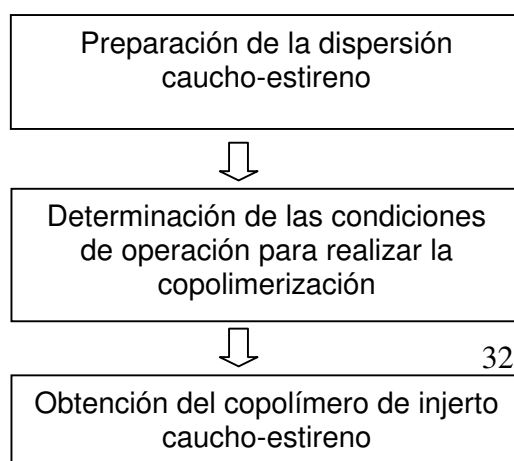
El cloruro de polivinilo es un nombre genérico. Cada productor hace un rango de polímeros de PVC que varían en la morfología y en la masa molecular, dependiendo del uso del fin intencional. En la industria, se usan el valor K y valor de viscosidad para representar la masa molecular, y los productores reflejan a menudo estos parámetros en los códigos de calidad [22].

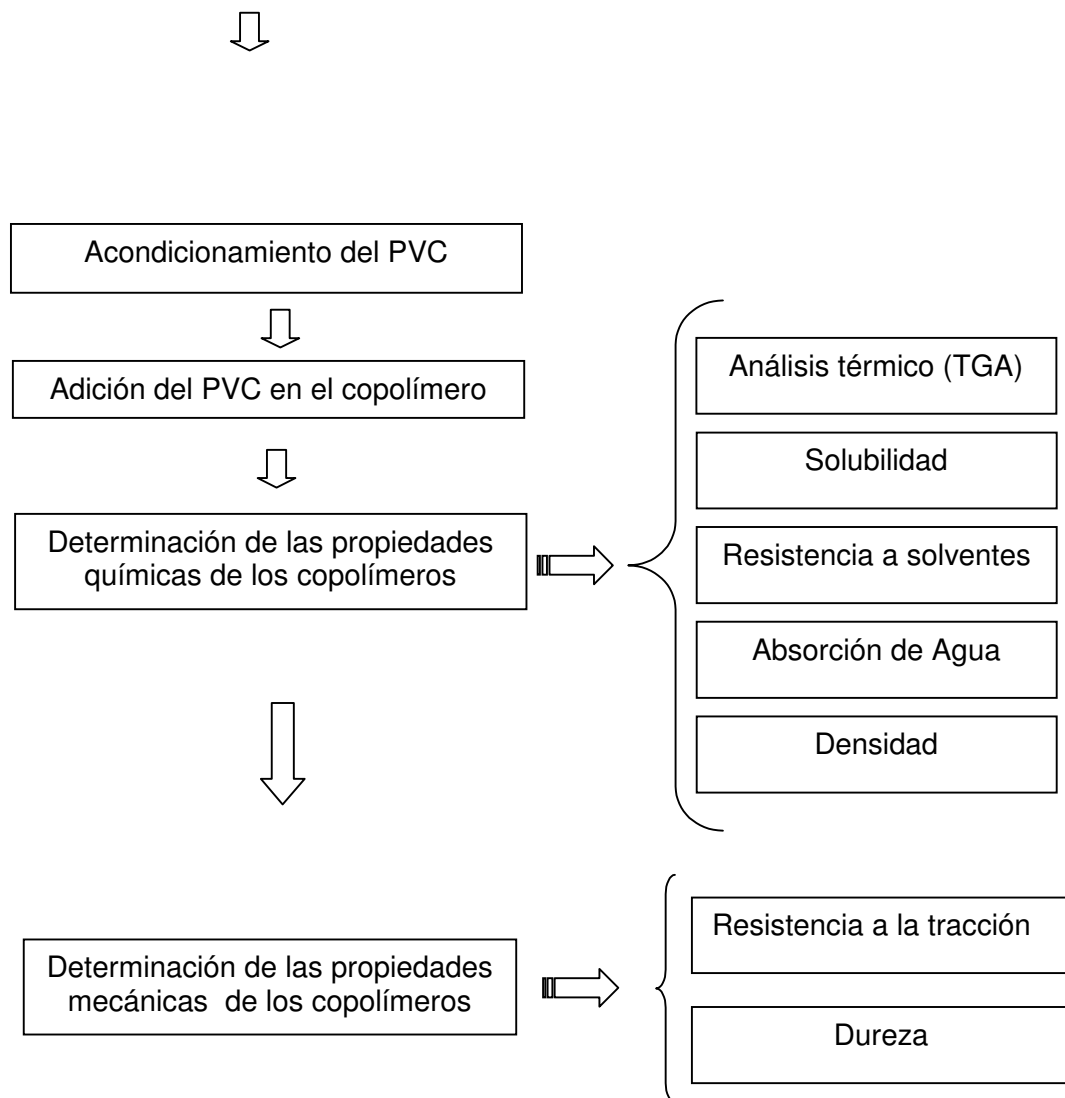
El PVC utilizado en esta investigación se obtuvo de un centro de reciclaje de polímeros de la ciudad de Bucaramanga, y se utilizó PVC flexible a partir de la cara de muñecas.

2.3. SÍNTESIS DEL COPOLÍMERO DE INJERTO CAUCHO- ESTIRENO

La síntesis de los copolímeros caucho-estireno se realizó como se describe en el diagrama de bloques mostrado en la figura 4.

Figura 4. Procedimiento de síntesis de copolímeros de injerto caucho-estireno y caucho-estireno-PVC.





2.3.1 Descripción del equipo. El equipo utilizado esta conformado por:

- Reactor de polimerización de 500 mL.
- Agitador de 2100 rpm.

- Horno eléctrico.
- Fusiometro Fisher Scientific de 300° C.
- Balanza analítica Ainsworth Tipo 24n serial 56870
- Estufa Binder ED53-UL#00-05510
- Balanza electrónica PRECISA XB 620C CH-DRETIKON

2.3.2. Preparación de la dispersión Caucho natural – Estireno. El caucho natural se dispersó en estireno hasta que la mezcla quedó homogénea, lo cual se logro resolviendo 5 g de caucho natural en 45 g de estireno, lo que equivale a una relación en peso caucho-estireno 10:100, y se hicieron dispersiones en relaciones 6:100, 7:100, 8:100 y 9:100, las cuales se mantuvieron estables durante todo el periodo de experimentación.

2.3.3. Copolimerización caucho natural – estireno. Para determinar las condiciones de operación en las cuales el polímero se presentaba en una sola fase y se obtenía el menor tiempo de polimerización, se desarrolló el procedimiento descrito en la sección 2.1 en el cual a partir de las dispersiones preparadas de caucho-estireno, se varió la relación caucho/acelerante entre 1:10 y 5:10 y la relación caucho/catalizador desde 1:10 hasta 10:10 con un paso de 1:10. Luego de la preparación de la solución caucho-estireno, acelerante y catalizador, se observó su comportamiento durante el tiempo de polimerización, verificando continuamente sus propiedades. Como resultado de este análisis se pudo concluir que las relaciones de caucho/catalizador y caucho/acelerante que mejores resultados arrojaron fueron de 5:10 y 2:10 respectivamente. El criterio de selección manejado fue un polímero con las siguientes propiedades, que presentara una sola fase, y un mínimo tiempo de polimerización.

Otro parámetro de operación tenido en cuenta es la temperatura de polimerización, cuya determinación se hizo de forma conjunta a la determinación de las relaciones caucho/catalizador y caucho/acelerante. El procedimiento consistió en variar la temperatura de polimerización de las soluciones preparadas desde la temperatura ambiente, hasta la temperatura más cercana por debajo del punto de ebullición del estireno (79°C), aumentando su valor en intervalos de 10°C, teniendo como parámetro de selección el mismo descrito anteriormente. Se obtuvo como resultado una temperatura de 60°C para la polimerización.

2.3.4. Acondicionamiento de PVC

- ? *Selección del tipo PVC a utilizar:* En la industria se trabaja principalmente con dos tipos de PVC, el PVC rígido y el flexible. El rígido presenta en su composición un alto contenido de aditivos, lo que significa que contiene una baja concentración de PVC, y además tiene un tiempo de vida útil mayor o igual a 100 años [24], lo que no lo hace muy atractivo para el reciclaje. EL PVC flexible, en cambio, contiene una menor cantidad de aditivos en su composición, lo que significa que tiene una mayor cantidad de PVC, su tiempo de vida util es menor y actualmente no se han desarrollado métodos de reciclaje químico apropiados para su aprovechamiento [23]. Por estas razones se eligió éste último para desarrollar el presente proyecto de investigación.

- ? *Disolución del PVC:* Después de una revisión bibliográfica se encontró que los principales solventes para el PVC son, el nitrobenceno, el tetrahidrofurano, la Metil Etil Cetona, y la ciclohexanona. Al analizar de forma separada cada uno de esos solventes encontramos que el nitrobenceno es un solvente difícil de conseguir, tóxico e inestable al tratar de manejarlo a condiciones normales; el tetrahidrofurano, es un

material altamente tóxico; la Metil Etil Cetona (MEK) es un material de uso restringido principalmente por su utilización en el proceso de extracción de cocaína, y por ende, es muy costosa en nuestro medio; finalmente la ciclohexanona, es el solvente utilizado para la realización del presente trabajo pues es el menos costoso, de fácil manejo y adquisición. Una vez escogido el solvente, se determinó la relación necesaria para disolver el PVC flexible. Este procedimiento arrojó como resultado una relación de 1:10 de PVC/ ciclohexanona tomando 1 g de PVC flexible y 10 g de ciclohexanona. El montaje para dispersar el PVC en ciclohexanona se muestra en la figura 5.

? *Limpieza del PVC:* partiendo de la disolución preparada de PVC en ciclohexanona, se le adicionó etanol industrial en una relación de 1:3 en peso, es decir, a 1 g de solución de PVC en ciclohexanona se le adiciona 3 gr de etanol, con el fin de permitir que precipite el PVC limpio, pues las impurezas quedan disueltas en la ciclohexanona, la cual queda en solución con el etanol. Este PVC limpio es disuelto en ciclohexanona para poder introducirlo en el copolímero caucho-estireno, ya que este no se dispersa en estireno. El PVC limpio obtenido se muestra en la figura 6.

Figura 5. Montaje para dispersar el PVC en ciclohexanona.



Figura 6. PVC limpio.



2.3.5. Incorporación del PVC al copolímero. Partiendo de las dispersiones caucho-estireno preparadas en relaciones 6/100, 7/100, y 8/100 manteniendo constante las relaciones de caucho/catalizador (5:10) y caucho/acelerante (2:10) se variaron las relaciones de caucho/PVC en proporciones 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, a partir de las soluciones de PVC en ciclohexanona. El criterio de selección para la relación a utilizar fue la que presentara el menor tiempo de polimerización, una sola fase, y una temperatura de reblandecimiento mayor a la temperatura ambiente. El resultado que cumplió con estos requisitos fue el de la relación RUB/PVC de 1:4.

2.3.6 Determinación de las propiedades físico-químicas de los copolímeros obtenidos. Se realizaron las pruebas de densidad, resistencia a los solventes, solubilidad, absorción de agua, análisis Termogravimétrico (TGA) e inflamabilidad, según lo expuesto en el marco teórico. Las muestras a las que se les realizaron estas pruebas fueron las siguientes: E1, E2, E3, E4, A4, A8, A12 y A16.

2.3.7 Determinación de las propiedades físico-mecánicas de los copolímeros. Se realizaron las pruebas de dureza y resistencia a la tracción según lo expuesto en marco teórico. Las pruebas se le realizaron a las mismas muestras que en las propiedades físico-químicas.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 ENSAYOS PRELIMINARES

Inicialmente se dispersó el caucho en el estireno hasta que la dispersión permaneciera estable y homogénea; esto se logró dispersando 5 g de caucho en 45 g de estireno, lo que corresponde a una relación RUB/EST de 10:100. En la figura 7 se muestra el montaje utilizado para la homogenización del caucho en estireno.

Figura 7. Montaje de homogenización para el caucho-estireno.



3.2 RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

Luego de determinada la relación caucho-estireno para trabajar, se procedió a determinar las condiciones de operación para la síntesis caucho estireno. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados de las pruebas de polimerización a una relación RUB/EST de 6:100 a temperatura ambiente.

MUESTRA Nº	FASES	POLIMERIZA	TIEMPO DE POLIMERIZACIÓN (H)
T101	1	No	> 96 Horas
T102	1	Parcialmente	92 Horas
T103	1	Si	92 Horas

T104	1	Si	92 Horas
T105	1	Si	92< t <94 Horas
T106	2	Si	92< t <94 Horas
T107	2	Si	92< t <94 Horas
T108	2	Si	92< t <94 Horas
T109	3	Si	94 Horas
T110	2	Si	92 Horas
T111	1	No	> 96 Horas
T112	1	Si	94 Horas
T113	1	Si	90< t <92 Horas
T114	1	Si	90< t <92 Horas
T115	1	Si	90< t <92 Horas
T116	1	Si	90< t <92 Horas
T117	2	Si	90 Horas
T118	2	Si	88 Horas
T119	2	Si	88 Horas
T120	3	Si	94 Horas
T121	2	Si	> 96 Horas
T122	1	Si	90< t <92 Horas
T123	3	Si	90< t <92 Horas
T124	1	Si	90< t <92 Horas
T125	2	Si	88 Horas
T126	2	Si	88Horas
T127	2	Si	88 Horas
T128	2	Si	90 Horas
T129	3	Si	92 Horas
T130	2	Si	96 Horas
T131	2	Si	94 Horas
T132	1	Si	92 Horas
T133	2	Si	88 Horas
T134	2	Si	88 Horas

T135	3	Si	80 Horas
T136	2	Si	72 Horas
T137	2	Si	72 Horas
T138	3	Si	74 Horas
T139	3	Si	76 Horas
T140	4	Si	96 Horas
T141	2	Si	92 Horas
T142	2	Si	92 Horas
T143	3	Si	94 Horas
T144	2	Si	94 Horas
T145	3	Si	94 Horas
T146	3	Si	> 96 Horas
T147	2	Si	> 96 Horas
T148	2	Si	> 96 Horas
T149	3	Si	> 96 Horas
T150	4	No	> 96 Horas

Paralelamente a está se hicieron los mismos experimentos pero a una temperatura de 60° C. Los resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de las pruebas de polimerización a una relación RUB/EST de 6:100 y una temperatura de 60° C.

MUESTRA Nº	FASES	POLIMERIZA	TIEMPO DE POLIMERIZACIÓN (H)
T201	1	Si	> 8 Horas
T202	1	Si	> 8 Horas
T203	1	Si	> 8 Horas
T204	1	Si	>8 Horas
T205	1	Si	>8 Horas
T206	1	Si	>8 Horas
T207	2	Si	8 Horas
T208	2	Si	8 Horas

T209	2	Si	8 Horas
T210	2	Si	8 Horas
T211	1	No	> 8 Horas
T212	1	Si	8 Horas
T213	1	Si	8 Horas
T214	1	Si	7 Horas
T215	1	Si	6 Horas
T216	2	Si	7 Horas
T217	2	Si	6 Horas
T218	2	Si	7 Horas
T219	2	Si	8 Horas
T220	2	Si	> 8 Horas
T221	1	Si	> 8 Horas
T222	1	Si	> 8 Horas
T223	1	Si	8 Horas
T224	2	Si	7 Horas
T225	2	Si	7 Horas
T226	2	Si	7 Horas
T227	2	Si	6 Horas
T228	2	Si	6 Horas
T229	2	Si	7 Horas
T230	3	Si	7 Horas
T231	2	Si	>8 Horas
T232	2	Si	7 Horas
T233	2	Si	8 Horas
T234	2	Si	8 Horas
T235	2	Si	8 Horas
T236	4	Si	8 Horas
T237	4	Si	8 Horas

T238	3	Si	7 Horas
T239	3	Si	6 Horas
T240	4	Si	6 Horas
T241	2	Si	>8 Horas
T242	2	Si	8 Horas
T243	3	Si	7 Horas
T244	2	Si	6 Horas
T245	4	Si	6 Horas
T246	3	Si	6 Horas
T247	2	Si	7 Horas
T248	3	Si	6 Horas
T249	3	Si	6 Horas
T250	4	No	6 Horas

Según los resultados mostrados anteriormente se escogieron los experimentos que presentaban una sola fase de polimerización, que polimerizaran y que su tiempo de polimerización fuera el menor.

A partir de esto se realizó una preselección en la cual se escogieron los experimentos T202, T203, T204, T212, T213, T214, T222, T223, T224 y T225; por presentar una sola fase homogénea, tanto a temperatura ambiente como a 60 °C. Luego, se observó el tiempo de polimerización y se pudo ver que las que menor tiempo de polimerización presentaban eran T214 y T215. A cada uno de estos experimentos como criterio último de selección se les analizó textura, dureza, acabado y homogeneidad.

Posteriormente los experimentos T214 y T215, que corresponden a una relación RUB/AC 2:10 y relaciones RUB/CAT 4:10 y 5:10 respectivamente, se polimerizaron a diferentes temperatura, 40, 50 y 70 °C, con el fin de observar cual presentaba el menor tiempo de polimerización. Los resultados de dichos experimentos se muestran en las tablas 10 y 11 respectivamente.

Tabla 10. Resultados de las pruebas de polimerización a diferentes temperaturas de la muestra T214, con una relación RUB/EST de 6:100, una relación RUB/AC de 2:10 y Una relación RUB/CAT de 4:10.

RUB/EST = 6/100			RUB/AC = 2/10			RUB/CAT = 4/10		
Parámetros		Tiempo de polimerización			Fases			
T °C		(Horas)						
25		90 < t < 92 Horas			1			
40		70 Horas			1			
50		24 Horas			1			
60		8 Horas			1			
70		5 Horas			2			

Tabla 11. Resultados de las pruebas de polimerización a diferentes temperaturas de la muestra T215, con una relación RUB/EST de 6:100, una relación RUB/AC de 2:10 y Una relación RUB/CAT de 5:10.

RUB/EST = 6/100			RUB/AC = 2/10			RUB/CAT = 5/10		
Parametros		Tiempo de polimerización			Fases			
T °C		(Horas)						
25		90 < t < 92 Horas			1			
40		65 Horas			1			
50		18 Horas			1			
60		7 Horas			1			
70		5 Horas			2			

Según los resultados observados en las tablas 10 y 11 podemos concluir que la temperatura de polimerización que más se ajusta a nuestros

requerimientos es 60° C, y según las características analizadas de tiempo de polimerización, acabado, y fase homogénea el experimento que más se ajusto a nuestros requerimientos es T215. Por lo cual se concluye que las mejores condiciones de operación para los experimentos realizados en las condiciones antes señaladas son una relación caucho/catalizador de 5:10 y una relación caucho/Acelerante de 2:10. Las condiciones de operación se encuentran tabuladas en el cuadro 5.

Cuadro 5. Condiciones de operación del proceso de polimerización.

PARAMETROS	VALOR
Relación Caucho/Acelerante	2:10
Relación Caucho/Catalizador	5:10
Temperatura (° C)	60

En la Figura 8 se muestran los reactores en los que se realizaron las pruebas anteriormente mencionadas.

Figura 8. Ensayos para obtención de condiciones de operación.



En la ilustración anterior aparecen los recipientes en los que fueron realizadas las pruebas para la determinación de las condiciones de operación de la reacción de polimerización caucho-estireno. En ella se pueden apreciar las diferentes fases en que se llevó a cabo la polimerización a Temperatura de 60° C. En la figura 9 se pueden apreciar algunos de los experimentos que fueron descartados porque su polimerización no fue homogénea.

Figura 9. Ensayos eliminados por polimerización no homogénea.



En la figura 10 se ilustran los ensayos en los cuales la polimerización fue homogénea, es decir, se presenta una sola fase. Fue a partir de estos ensayos que se eligieron las condiciones de operación para la síntesis del copolímero caucho- estireno.

Figura 10. Ensayos de fase homogénea.



Para determinar estas condiciones se realizaron los experimentos descritos en el capítulo 2. A continuación se ilustra el desarrollo de los ensayos en varios reactores.

3.2.1 Influencia de la relación de caucho/estireno sobre las propiedades del copolímero. Luego de haber determinado las condiciones de operación para la polimerización caucho-estireno, se procedió a variar la relación caucho estireno de 6:100, 7:100, 8:100 y 9:100. Dicha relación será medida con las propiedades mecánicas y químicas de los materiales. En las figuras 11 y 12 se puede apreciar los copolímeros obtenidos a una relación RUB/EST 6:100 y 8:100.

Figura 11. Copolímero con una relación caucho-estireno 6:100.



Figura 12. Copolímero con una relación caucho-estireno 8:100.



Una propiedad que vale la pena resaltar en este trabajo, es la capacidad del copolímero caucho-estireno para adherirse al vidrio Pirex, el cual es un borosilicato. Esto puede observarse en la figura 13.

Figura 13. Copolímero caucho estireno en vidrio pirex.



3.2.2. Incorporación del PVC a los copolímeros caucho-estireno. Una vez determinada las relaciones caucho/estireno, caucho/acelerante, caucho/catalizador y temperaturas de operación, se realizaron pruebas utilizando una solución de PVC en ciclohexanona en relación 1:10 , variando las relación de caucho/PVC en 1:1, 1:2, 1:3 y 1:4. Se realizaron pruebas a temperatura ambiente y a 60° C.

El criterio de selección para la relación caucho/PVC fue el mismo utilizado para la selección de las condiciones de operación y el punto de reblandecimiento del material. Se decidió tomar el punto de reblandecimiento como una variable ya que la solución PVC en ciclohexanona actúa como plastificante y el material se comporta como un elastómero. El resultado de los experimentos se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Efecto de la variación de la relación Caucho/PVC en la polimerización caucho-estireno, a una relación RUB/AC de 2:10, relación RUB/CAT de 5:10 y Temperatura de 60° C.

MUESTRA Nº	FASES	POLIMERIZA	TIEMPO DE POLIMERIZACIÓN (H)	Temperatura de reblandecimiento (° C)
A1	2	No	> 72 Horas	< 25
A2	3	No	> 72 Horas	< 25
A3	1	Si	48 Horas	38
A4	1	Si	24 Horas	55
A5	2	No	> 72 Horas	< 25
A6	1	Si	63 Horas	< 25
A7	2	Si	40 Horas	40
A8	1	Si	22 Horas	55
A9	2	No	> 72 Horas	30
A10	2	No	63 Horas	30
A11	2	Si	40 Horas	42
A12	1	Si	22 Horas	70
A13	1	No	> 72 horas	34
A14	2	Si	60 horas	33
A15	1	Si	42 Horas	45
A16	1	Si	20 Horas	75

A partir de los datos reportados en la tabla 12, se decidió trabajar con los experimentos A4, A8, A12 y A16 que corresponden a una relación de caucho/ PVC de 1:4, puesto que presentaba una sola fase, el menor tiempo de polimerización y la mayor temperatura de reblandecimiento.

En la figura 14 se muestra un copolímero con una relación caucho/estireno 8:100 y una relación caucho/PVC 1:4.

Figura 14. Copolímero con una relación caucho/estireno 8:100 y una relación caucho/PVC 1:4.



3.3. FORMULACIÓN DE LOS COPOLÍMEROS CAUCHO-ESTIRENO.

3.3.1. Formulación y obtención de los copolímeros de injerto caucho-estireno. Para formular los copolímeros caucho-estireno inicialmente se estudiaron las proporciones de acelerante, catalizador y la temperatura de operación de la reacción, variando cada uno mientras los otros permanecían constantes, observando sus características estructurales (homogeneidad, tiempo de polimerización, textura). A partir de esos datos se variaron las concentraciones de caucho y se analizaron las propiedades físico-químicas y físico-mecánicas.

Los datos de la formulación se pueden consultar en el anexo A.

3.4 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos para los copolímeros caucho-estireno. Las propiedades físico-químicas consideradas para los copolímeros sintetizados fueron: densidad, absorción de agua, punto de reblandecimiento, análisis Termogravimétrico (TGA), velocidad de llama, solubilidad y resistencia a los reactivos químicos.

3.4.1. Solubilidad.

Los ensayos de solubilidad se basaron en la resistencia química de los polímeros a los diferentes solventes. Los ensayos se realizaron según el procedimiento expuesto en el capítulo 1. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 13 y 14. Los resultados que se muestran en la tabla 15 corresponden a las muestras E1 y E3. Y los resultados que se muestran en la tabla 16 corresponden a las muestras A4 y A12.

Tabla 13. Solubilidad de los copolímeros caucho- estireno en solventes orgánicos e inorgánicos.

SOLVENTES	Soluble	Parcialmente soluble	Insoluble
Acetona		X	
Tolueno	X		
Xileno	X		
CCl ₄	X		
Gasolina		X	
Kerosene			X

NaOH 2N			X
HNO3 65%w/w		X	
H2SO4 4,75 M			X
Ácido acético			X
n-pentano			X
Estireno	X		
Alcohol bencílico		X	
Ciclohexanona	X		
Thinner	X		

Tabla 14. Solubilidad de los copolímeros caucho-estireno-PVC en solventes orgánicos e inorgánicos.

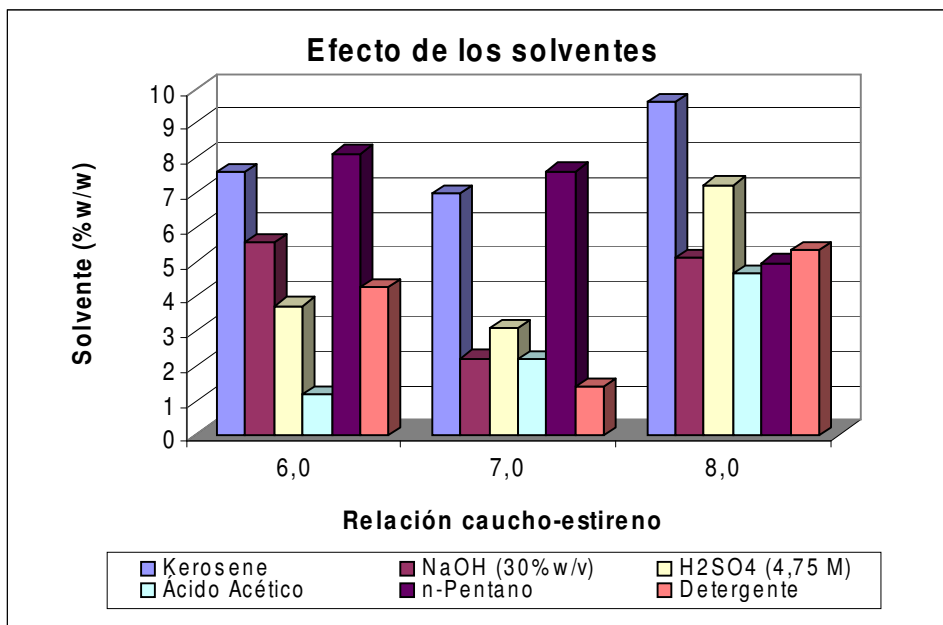
SOLVENTES	Soluble	Parcialmente soluble	Insoluble
Acetona			X
Tolueno	X		
Xileno	X		
CCl4	X		
Gasolina		X	
Kerosene			X
NaOH 2N			X
HNO3 65%w/w			X
H2SO4 4,75 M			X
Ácido acético			X
n-pentano			X
Estireno		X	
Alcohol bencílico		X	
Ciclohexanona	X		
Thinner	X		

En este ensayo se puede observar que los copolímeros caucho –estireno obtenidos son resistentes a ácidos y bases fuertes, mientras que es totalmente soluble en compuestos orgánicos aromáticos. Al adicionarle PVC está los hace resistente a la acetona y al ácido nítrico, y disminuye la solubilidad en estireno.

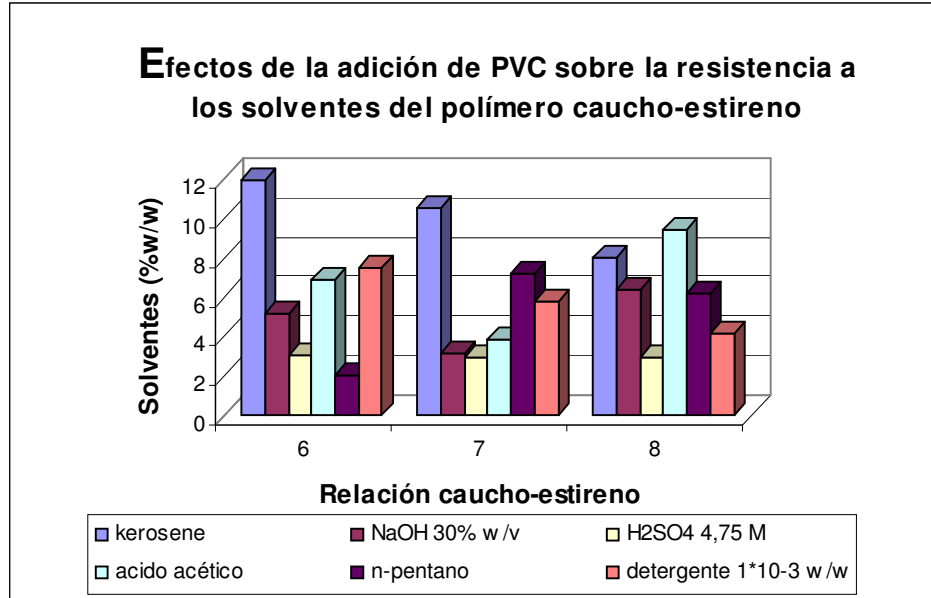
3.4.2. Resistencia al ataque de solventes

Luego de realizada la prueba de solubilidad, se procedió a evaluar la resistencia al ataque con solventes que aparentemente no solubilizaron los polímeros. El análisis se realizó según las normas ASTM D 543-87. Los resultados se muestran en la gráfica 1.

Gráfica 1. Resistencia al ataque de químicos de polímeros caucho-estireno.



Gráfica 2. Efecto de la adición de PVC sobre la resistencia al ataque de químicos de polímeros caucho-estireno.



Según lo observado en la gráfica 1, podemos notar que el kerosene y el n-pentano son los solventes que más variación de peso producen en el polímero. En cambio el ácido acético presentó la menor variación. También podemos notar que el polímero E2 es el que mejor se comporta ante el ataque de los solventes, ya que este presenta en promedio la menor variación de peso en todos los solventes.

En la gráfica 2, podemos observar que la adición de PVC disminuye la acción de solventes como el ácido sulfúrico sobre el copolímero caucho-estireno, y en general de casi todos los solventes con los que se trabajó. En general, se puede notar que el ataque de los solventes utilizados a los polímeros es muy pequeño, ya que la mayor variación de peso no alcanza el 10%. Además, en este ensayo se hizo un análisis de los cambios en apariencia que propiciaba

cada uno de los solventes utilizados. Estos efectos se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Efecto físico de los solventes sobre copolímeros de injerto caucho-estireno.

SOLVENTES	E1	E2	E3
kerosene	N.P.C.F*	N.P.C.F	N.P.C.F
NaOH 30%w/w	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F
H ₂ SO ₄ 4.75 M	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F
Ácido acético	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F
n-pentano	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F
Detergente 1*10 ⁻³	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F

*N.P.C.F.: no presentó cambios físicos.

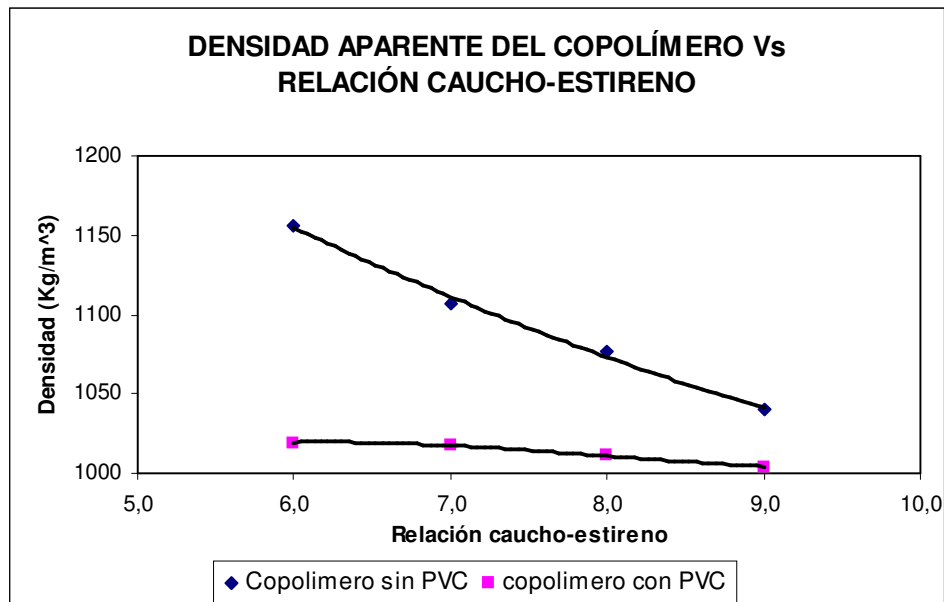
Tabla 16. Efecto físico de los solventes sobre copolímeros de injerto caucho-estireno con adición de PVC.

SOLVENTES	A4	A8	A12
kerosene	Cambia el color	Cambia el color	Cambia el color
NaOH 30%w/w	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F
H ₂ SO ₄ 4.75 M	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F
Ácido acético	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F
n-pentano	Lo ablanda	Ablanda y cambia el color	ablanda
Detergente 1*10 ⁻³	N.P.C.F	N.P.C.F	N.P.C.F

3.4.3. Densidad aparente.

En la gráfica 3 se muestra la densidad aparente de los copolímeros sintetizados. Los datos de densidad aparente para los copolímeros se pueden consultar en el anexo B.

Gráfica 3. Densidad aparente de los polímeros obtenidos.



La correlación presentada por la curva de densidad aparente para copolímero caucho estireno es:

$$y = -2,5924x^3 + 52,841x^2 - 364,42x + 1861,6$$

$$R^2 = 1$$

Y la correlación para la curva de densidad aparente para copolímero caucho estireno cuando contiene PVC es:

$$y = 0,6784x^3 - 16,456x^2 + 125,73x + 710,95$$

$$R^2 = 1$$

Donde:

x: es la relación caucho-estireno.

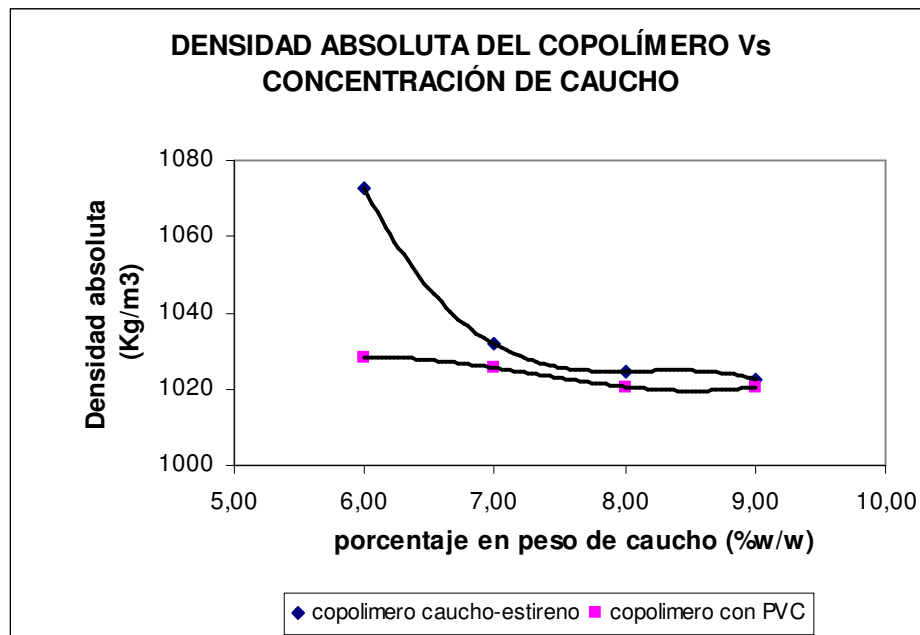
y: es la densidad aparente.

De esta gráfica podemos concluir que la densidad aparente disminuye a medida que aumenta la relación caucho-estireno. Además, se puede observar que el PVC disminuye la densidad aparente del copolímero; sin embargo, lo estabiliza, puesto que el cambio de pendiente en este caso no es tan abrupto, como en el caso cuando el polímero no tiene PVC.

3.4.4. Densidad absoluta

En la gráfica 4 se muestra la densidad absoluta de los copolímeros obtenidos. Los datos de densidad absoluta para los copolímeros se pueden consultar en el anexo C.

Gráfica 4. Densidad absoluta de los polímeros.



La correlación presentada por la curva de densidad absoluta para copolímero caucho estireno es:

$$y = -4,9075x^3 + 120,19x^2 - 980,44x + 3688,7$$

$$R^2 = 1$$

Y la correlación para la curva de densidad absoluta para copolímero caucho estireno cuando contiene PVC es:

$$y = 1,176x^3 - 25,779x^2 + 183,02x + 604,23$$

$$R^2 = 1$$

Donde:

x: es la relación caucho-estireno.

y: es la densidad absoluta.

El comportamiento presentado en esta gráfica es muy similar al de la figura de la densidad aparente. Esto nos confirma que la adición de PVC a el copolímero caucho-estireno disminuye la densidad pero se obtiene un material más estable.

3.4.5. Absorción de agua

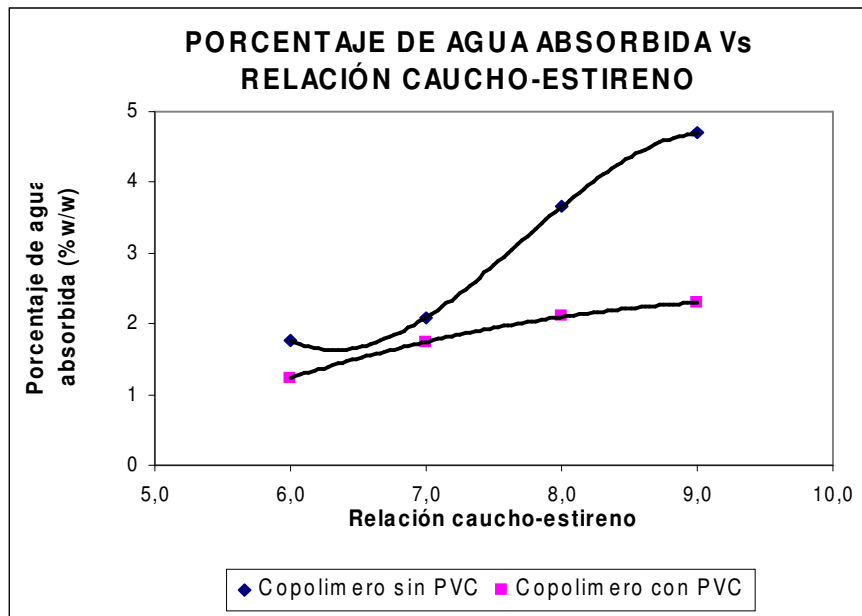
La gráfica 5 nos muestra el porcentaje de agua absorbido por es copolímero en un tiempo de 96 horas. Los datos de absorción de agua para los copolímeros se pueden consultar en el anexo D.

La correlación presentada por la curva de porcentaje de agua absorbida por el copolímero sin PVC mostrada en la figura anterior es:

$$y = 0,1177x^3 - 2,973x^2 + 25,107x - 64,732$$

$$R^2 = 1$$

Gráfica 5. Porcentaje de agua absorbida por el polímero.



Y la correlación para el copolímero con PVC es:

$$y = -0,2955x^3 + 6,83x^2 - 50,938x + 125,35$$

$$R^2 = 1$$

Donde:

x: es la relación caucho-estireno.

y: es el porcentaje de agua absorbido.

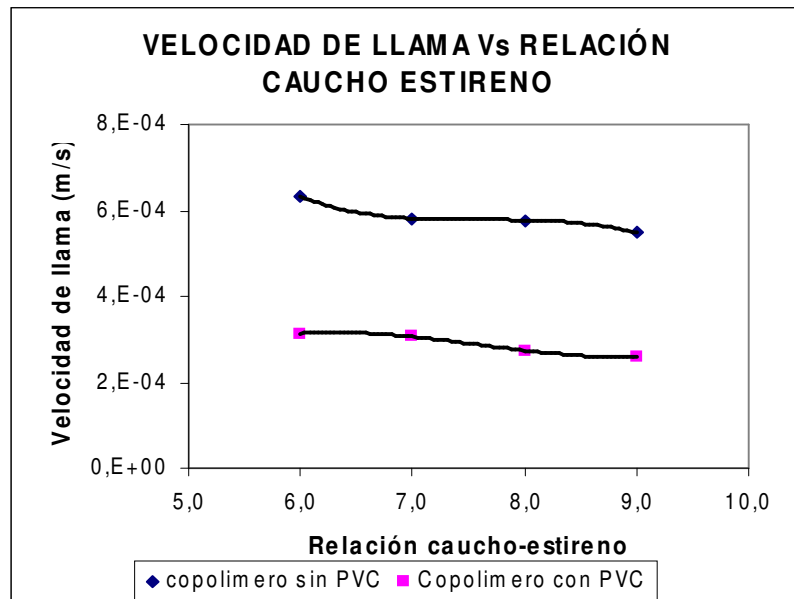
En la gráfica 5 se puede observar que el porcentaje de absorción de agua para el copolímero es bajo, pues no alcanza el 10%; sin embargo, al adicionarle PVC el porcentaje de absorción de agua disminuye. Por lo que

podemos concluir que el PVC disminuye la higroscopicidad del copolímero caucho-estireno.

3.4.6. Velocidad de llama

Teniendo en cuenta los lineamientos dados por la norma ASTM D4804-88, se evaluó la velocidad de llama de los copolímeros obtenidos. Los resultados se presentan en la gráfica 6. Los datos de velocidad de llama para los copolímeros se pueden consultar en el anexo E.

Gráfica 6. Velocidad de llama del polímero



La correlación presentada por la curva de velocidad de llama para el copolímero caucho-estireno mostrada en la gráfica anterior es:

$$y = -1E-05x^3 + 0,0003x^2 - 0,0021x + 0,006$$

$$R^2 = 1$$

Y la correlación para la velocidad de llama presentada por el copolímero en presencia de PVC es:

$$y = 6E-06x^3 - 0,0001x^2 + 0,0011x - 0,0022$$

$$R^2 = 1$$

Donde:

x: es la relación caucho-estireno.

y: es la velocidad de llama.

De lo observado durante el desarrollo de la prueba y de los resultados obtenidos se puede inferir que, para los copolímeros sintetizados, la velocidad de llama disminuye al aumentar la relación de caucho-estireno, es decir que a mayor cantidad de caucho en el polímero menor velocidad de llama. Pero que aumenta la cantidad de humo negro y la cantidad de goteo de material fundido.

Algo similar ocurre en el copolímero con PVC, lo que era de esperarse puesto que el PVC tiene la característica de ser retardante de llama.

3.4.7. Punto de reblandecimiento

Es la temperatura a la cual el polímero comienza a ablandarse. Esta prueba se realizó en un fusiómetro Fisher Scientific de 300°C. Los resultados obtenidos para esta prueba se muestran en la gráfica 7. Los datos de temperatura de reblandecimiento para los copolímeros se pueden consultar en el anexo F.

La correlación presentada por la curva de punto de reblandecimiento para el copolímero caucho-estireno mostrada en la figura anterior es:

$$y = -1,1667x^3 + 24,5x^2 - 171,33x + 487$$

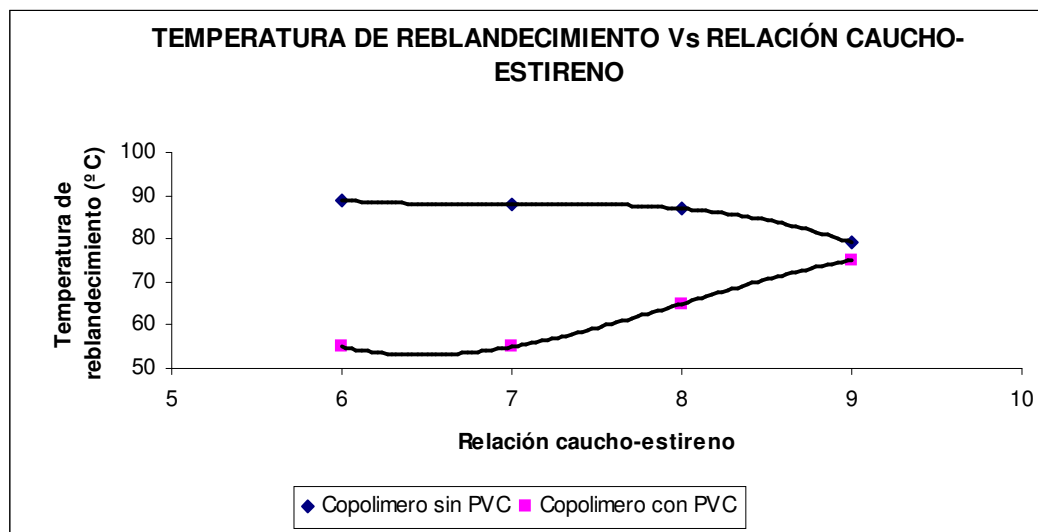
$$R^2 = 1$$

Y la correlación para la velocidad de llama presentada por el copolímero en presencia de PVC es:

$$y = -1,6667x^3 + 40x^2 - 308,33x + 825$$

$$R^2 = 1$$

Gráfica 7. Temperatura de reblandecimiento



Donde:

x: es la relación caucho-estireno.

y: es la temperatura de reblandecimiento.

Como se puede observar en la gráfica 7, para la curva de punto de reblandecimiento de copolímero caucho-estireno, al aumentar la cantidad de caucho en el copolímero, la temperatura de reblandecimiento del material

disminuye. Sin embargo, en la curva a la que se le ha adicionado PVC, disminuye la temperatura de reblandecimiento del material en aproximadamente 40° C y esta diferencia se va haciendo cada vez menor al aumentar la cantidad de caucho en la polimerización.

3.4.8. Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis TGA se empleó para determinar la temperatura de descomposición, tanto de los homopolímeros como de los copolímeros obtenidos, con el fin de evaluar la estabilidad térmica de dichos materiales.

En la muestra del copolímero caucho estireno (m2) podemos decir que no hay estireno sin reaccionar pues su temperatura de ebullición es de 79° C y entre 0-100° C no se evidencia ningún cambio significativo en el peso. En la temperatura de 251 ° C tiene lugar el primer cambio significativo, es decir que se descompone una parte del material sin embargo la variación de peso equivale solo al 8.817% . Por lo que podemos decir que el polímero es bastante estable hasta 300° C. Sin embargo entre 325 y 453° C se degrada totalmente pues no deja ningún porcentaje de residuo.

En la muestra que contiene PVC se puede decir que no hay estireno libre porque entre 0-100° C no ocurre ningún cambio significativo en el porcentaje en peso. Entre 150 – 235° C ocurre el primer cambio significativo en el cual se pierde un 10.85% w/w de polímero, esto puede ser debido a que el material tiene ciclohexanona residual pues el punto de ebullición de la misma es de 168° C. También se puede decir que el PVC estabiliza la muestra pues el punto de descomposición de la misma aumenta, aunque en este caso se presenta una mayor cantidad de PVC residual.

Los resultados de TGA se presentan en el Anexo G.

En el cuadro 6 se muestra la temperatura de descomposición de los copolímeros y homopolímeros.

Cuadro 6. Temperatura de descomposición de Polímeros y copolímeros

MUESTRA	TEMPERATURA (° C)
PVC	313.46
Poliestireno	430.43
Caucho natural	368.57
Copolímero caucho-estireno	413.84
Copolímero caucho-estireno-PVC	418.52

3.5. Propiedades físico-mecánicas

3.5.1 Dureza.

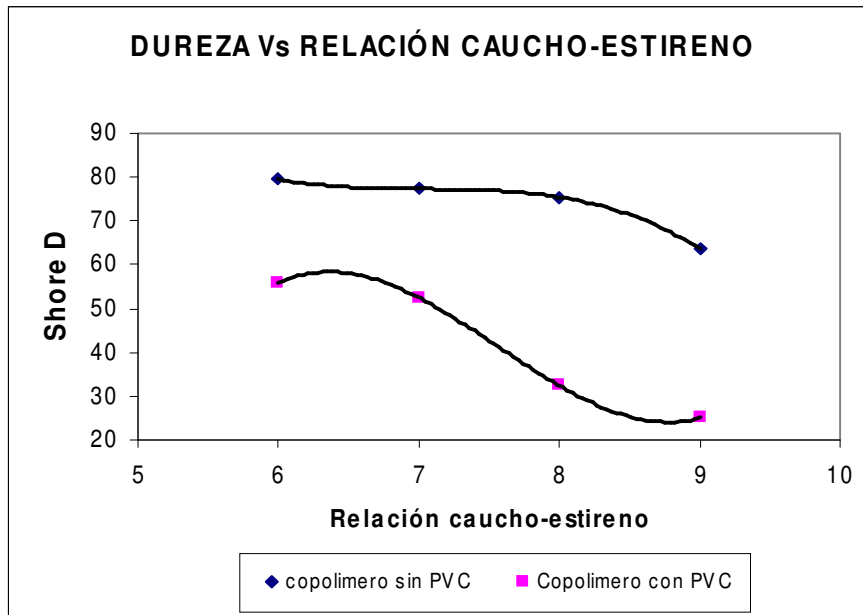
En la gráfica 8 se muestran los resultados de dureza shore tipo D para los diferentes copolímeros obtenidos. Si se comparan las durezas de las mezclas de diferentes composiciones caucho-estireno, que la dureza disminuye al aumentar la concentración de caucho. Además se puede observar que el PVC disminuye la dureza del polímero. Los datos de dureza se presentan en el anexo H.

La correlación presentada por la curva de dureza mostrada en la gráfica 8 es:

$$y = -1,7103x^3 + 36,095x^2 - 254,24x + 674,95$$

$$R^2 = 1$$

Gráfica 8. Dureza de los copolímeros de injerto caucho- estireno



Y la correlación de curva de dureza para el copolímero con PVC es:

$$y = 4,8667x^3 - 110,5x^2 + 815,03x - 1907,6$$
$$R^2 = 1$$

Donde:

x: es la relación caucho-estireno.

y: es la dureza Shore D.

3.5.1. *Ensayo de tensión*

Como se describió en el capítulo 1 se realizaron pruebas de tensión-deformación para los materiales poliméricos sintetizados.

Las probetas utilizadas para realizar estas pruebas se muestran en la figura 17.

Figura 17. Probetas para ensayos de tensión-deformación.



Las dimensiones de la probeta utilizadas se muestran en el anexo J.

En la gráfica 9 se muestra como los diferentes materiales elongan a medida que se someten a un esfuerzo determinado hasta llegar a la fractura. En el eje de las abcisas se representa el porcentaje de deformación calculado como la diferencia entre la longitud final de la probeta (longitud en el momento de rompimiento) y su longitud inicial, dividida por su longitud inicial, es decir,

$$\%d = \frac{L_f - L_i}{L_i} * 100$$

La longitud inicial de todas las probetas fue 56mm. En el eje de la ordenada se representa el esfuerzo al que es sometido la probeta el Kg-f / cm²,

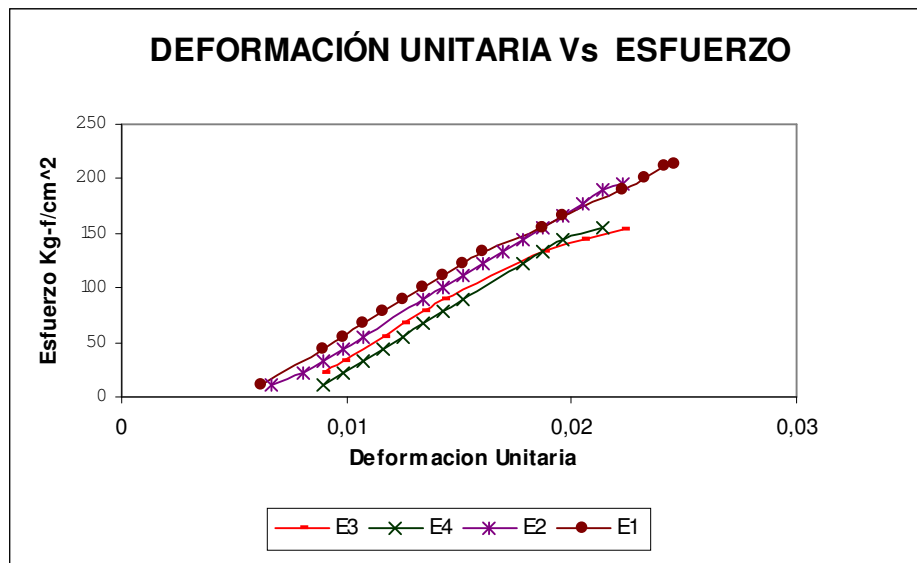
calculado como la carga colocada en Kg-f sobre el área transversal inicial, que para nuestro caso equivale a 45mm, según la siguiente fórmula:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \text{carga} / \text{área inicial}$$

En la gráfica 9 se presenta la curva esfuerzo- deformación para los copolímeros caucho-estireno.

Según lo observado en la gráfica 9, podemos concluir que el material es altamente elástico y presenta una muy baja plasticidad puesto que llega al punto de ruptura y no presenta zona de comportamiento plástico. Además, se observa que a menor cantidad de caucho en el polímero menor es la resistencia a la deformación.

Gráfica 9. Esfuerzo Vs deformación unitaria de los copolímeros caucho-estireno sintetizados.



4. CONCLUSIONES

- Se concluyó que se puede obtener copolímeros de injerto caucho-estireno mediante un proceso de polimerización en solución.
- Se concluyó que existe una ruta de síntesis química, disponible para el reciclaje químico de PVC post-consumo.
- Es posible introducir PVC post-consumo en los copolímeros caucho-estireno para mejorar sus propiedades.
- Se puede concluir que es posible la compatibilización de caucho en estireno hasta una relación 10 %w/w a temperatura ambiente.
- Se determinó que las mejores condiciones para la polimerización caucho-estireno y caucho-estireno-PVC son una relación caucho/estireno de 6:100 w/w una relación caucho/acelerante 2:10 w/w, una relación caucho/catalizador 5:10 w/w y 60° C de temperatura.
- La adición de PVC post-consumo en una relación caucho/PVC 1:4 w/w, le confiere las siguientes propiedades al copolímero caucho-estireno. Disminuye la solubilidad en estireno y acetona, disminuye la temperatura de reblandecimiento, la velocidad de llama, la capacidad de absorción de agua, la densidad absoluta y relativa, y la dureza. De acuerdo con lo anterior es evidente que la adición de PVC genera un material más plástico, de una capacidad de absorción de impacto mayor que el copolímero caucho-estireno.

- Se concluye por último que los copolímeros caucho-estireno sintetizados, basados en las propiedades físicas y químicas que presenta hacen posible su aceptación en la industria de la ablación. Su condición de material termoplástico permite que sea extruido e inyectado. Además puede ser utilizado para hacer aislamiento encapsulado. Por su adhesión en los vidrios de boro silicato, una posible aplicación es hacer sellos en vidrio pirex y cerámica.

5. RECOMENDACIONES

- la realización de un análisis de microscopía electrónica permitiría evaluar el grado de compatibilidad alcanzado en las mezclas caucho- estireno- PVC. Un estudio detallado de la estructura y el cálculo del peso molecular de los copolímeros obtenidos se podría complementar por medio de un análisis de resonancia magnética nuclear (NMR).
- Para obtener mejores resultados en la eficiencia de la copolimerización, se recomienda emplear otro tipo de solventes para el PVC, para evitar cualquier tipo de efectos negativos sobre la acción del iniciador y del catalizador y baja volatilidad , ya sea la desaceleración o la inhibición de la copolimerización, e impidiendo un mayor grado de injertamiento entre los polímeros participantes.
- Hacer pruebas con algunos aditivos como el fosfato para mejoras las propiedades de velocidad de llama.
- Se recomienda realizar un proceso de vulcanización del copolímero caucho-estireno obtenido, con el fin de transformar el material en termoestable y comparar su comportamiento con respecto al del material termoplástico.
- Realizar la copolimerización en una atmósfera inerte con el fin de disminuir la posible existencia de reacciones secundarias, por la oxidación del estireno.

- Estudiar la posible compatibilización de otros polímeros postconsumo, tomando como base este estudio para el reciclaje químico de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

1. R SEYMOUR y C CARRAHER, *Introducción a la química de los polímeros*, Ed. REVERTÉ S.A. Barcelona 1995, p 371-378.
2. L ARENAS; E. ZARATE, C.(1996) *Compatibilizantes gras de polietileno-Estireno producidos por emulsión para aplicaciones en mezclas y refuerzos en caucho SBR*. Tesis de grado UIS. p 4.
3. D.H. MORTON-JONES, *procesamiento de plásticos*, Ed LIMUSA, México 2000, p 19-23.
4. P MARTINEZ DE LAS MARIAS, *Química y física de los altos polímeros y materias plásticas*, Ed. ALHAMBRA España 1972, p 80-82, 98-99, 105-108.
5. L HOLLYDAY, *Ionic polymers*, Applied Science Publishers Ltd, London 1975.
6. NOSHAY ALLEN, MC GRATH E. JAMES, *Block Copolymers, Overview and Critical Survey*. Academic Presss. New York, 1977.
7. MICHAEL W. ALLSOPP, *Polyvinyl Chloride* ,
8. GEORGE ODIAN, *principles of polymerization*, Ed. McGrawHill, New Cork 1970.

9. J. MEZA; O. NAVARRO, C(1999) *copolímeros de injerto, síntesis y caracterización para el sistema silicona- caucho natural*. Tesis de grado UIS. p 10-12.
10. J. MANSON; L.H. SPERLING, *Polymer blends and composites*. Plenum Press. New York, 1976. p 28-30, 45-53.
11. MIGUEL A. LLORENTE U; ARTURO HORTA Z. *Técnicas de caracterización de polímeros*, Universidad Nacional de educación a distancia, Madrid 1991.
12. NORBERT M. BIKALES, *Characterization of polymers*, Wiley-Interscience 1971
13. EDWARD A. COLLINS, *experiments in polymer science*, Jhon Wiley & sons 1973.
14. EDWARD A. COLLINS, *experiments in polymer science*, Jhon Wiley & sons 1973.
15. MIGUEL A. LLORENTE U; ARTURO HORTA Z. *Técnicas de caracterización de polímeros*, Universidad Nacional de educación a distancia, Madrid 1991.
16. W.S. PENN, *PVC technology*, Wiley Interscience, New York 1971.
17. E.I. DUPONT, *el lenguaje del caucho*, Wilmington, Delaware USA 1963,
18. S. MUROI, *some challenging applications of latex technologies*, J. Colloid & Surface Sci, (1999).

19. NORBERT M. BIKALES, *Characterization of polymers*, Wiley-Interscience 1971.
20. IRVIN RUBIN, *materiales plásticos, propiedades y aplicaciones*, ed. LIMUSA ,México 1999.
21. R.P. BRADDICKS and L.I. NASS, *encyclopedia of PVC*, Marcel Dekker, New York, p. 711.
22. Birley, A.W. and Scott, M.J. *Plastics Materials. Properties and Applications*.
23. Revista Acoplásticos, 2002-2003.
24. H MARTINEZ; S. SUAREZ, C(2000) Compatibilización de mezclas de caucho de silicona y polimetilmetacrilato (PMMA) mediante copolímeros de polidimetil siloxano/ polimetilmetacrilato. Tesis de grado UIS, p 22-23.
25. PAUL J. FLORY, *Principles of polymer chemistry*, Cornell University 1971.

ANEXOS

ANEXO A

FORMULACIÓN Y OBSERVACIONES DE LOS POLÍMEROS SINTETIZADOS

Tabla A1. Efecto de la relación de caucho-estireno en el copolímero a condiciones de operación.

No	Caucho (g)	Estireno (g)	Naftenato de cobalto (g)	MEKP (g)	Observaciones
E1	6	100	30	12	Brillante, duro
E2	7	100	35	14	Resistente, brillante, menos duro que E1
E3	8	100	40	16	Más cristalino, brillante, más frágil
E4	9	100	45	18	Un poco opaco, homogéneo, buena consistencia.

Tabla A2. Efecto del PVC sobre los copolímeros caucho-estireno.

No	Caucho (g)	PVC (g)	Estireno (g)	Naftenato de cobalto (g)	MEKP (g)
E1	6	1.5	100	30	12
E2	7	1.75	100	35	14
E3	8	2	100	40	16
E4	9	2.25	100	45	18

ANEXO B

DENSIDAD APARENTE

Tabla B1. Efecto del aumento de la relación caucho-estireno sobre la densidad aparente de los copolímeros.

Muestra	Densidad 1 [Kg/m³]	Densidad 2 [Kg/m³]	Densidad 3 [Kg/m³]	Promedio
E1	1122,94	131221	1033,03	1156,06
E2	1100,84	115451	1066,90	1107,42
E3	1025,85	1101,90	1102,77	1076,84
E4	1091,19	100390	1023,99	1039,69

Tabla B2. Efecto del PVC sobre la densidad aparente de los copolímeros caucho-estireno.

Muestra	Densidad 1 [Kg/m³]	Densidad 2 [Kg/m³]	Densidad 3 [Kg/m³]	Promedio
A4	1030,36	1013,04	1015,04	1019,48
A8	1022,11	1015,45	1014,79	1017,45
A12	1013,17	1009,55	1010,28	1011,00
A16	1003,98	1007,25	1001,37	1004,2

ANEXO C

DENSIDAD ABSOLUTA

Tabla C1. Efecto del aumento de la relación caucho-estireno sobre la densidad absoluta de los copolímeros.

Muestra	Densidad 1 [Kg/m³]	Densidad 2 [Kg/m³]	Densidad 3 [Kg/m³]	Promedio
E1	1060,65	1071,98	1086,30	1072,88
E2	1022,73	1010,89	1061,33	1031,65
E3	1031,40	1026,52	1016,15	1024,69
E4	1023,44	1030,42	1013,79	1022,55

Tabla C2. Efecto del PVC sobre la densidad absoluta de los copolímeros caucho-estireno.

Muestra	Densidad 1 [Kg/m³]	Densidad 2 [Kg/m³]	Densidad 3 [Kg/m³]	Promedio
A4	1042,68	1023,51	1018,70	1028,30
A8	1016,24	1016,79	1043,60	1025,54
A12	1008,37	1020,61	1032,86	1020,61
A16	1026,24	1020,59	1014,91	1020,58

ANEXO D

ABSORCIÓN DE AGUA

Tabla D1. Efecto del aumento de la relación caucho-estireno sobre la cantidad de agua que absorben los copolímeros.

Muestra	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Diferencia de peso [g]	Porcentaje de agua absorbida
E1	2,26	2,3	0,04	1,77
E2	2,13	2,17	0.04	2,09
E3	2,72	2,82	0,10	3,66
E4	2,13	2,23	0,10	4.70

Tabla D2. Efecto del PVC sobre la cantidad de agua que absorben los copolímeros caucho-estireno.

Muestra	Peso inicial [g]	Peso final [g]	Diferencia de peso [g]	Porcentaje de agua absorbida
A4	2.25	2.28	0.03	1.24
A8	3.27	3.33	0.06	1.74
A12	1.38	1.41	0.04	2.11
A16	3.80	3.89	0.09	2.30

ANEXO E

VELOCIDAD DE LLAMA

Tabla E1. Efecto del aumento de la relación caucho-estireno sobre la velocidad de llama de los copolímeros.

Muestra	Longitud [cm]	Tiempo [s]	Velocidad de llama [cm/s]	Observaciones
E1	3	47,51	0,0631	Goteo, chisporroteo, humo negro
E2	3	51,60	0,0581	Llama amarilla, goteo, abundante humo negro
E3	3	51,94	0,0578	Llama amarilla, goteo, abundante humo negro
E4	3	54,81	0,0547	Llama amarilla, goteo, abundante humo negro

Tabla E2. Efecto del PVC sobre la velocidad de llama de los copolímeros caucho-estireno.

Muestra	Longitud [cm]	Tiempo [s]	Velocidad de llama [cm/s]	Observaciones
A4	3	95,48	0,0314	Llama amarilla, goteo, abundante humo negro
A8	3	98,03	0,0306	Llama amarilla, goteo, abundante humo negro
A12	3	109,28	0,0275	Llama amarilla, goteo, abundante humo negro
A16	3	116,59	0,0257	Llama amarilla, abundante goteo y humo negro

ANEXO F

TEMPERATURA DE REBLANDECIMIENTO

Tabla F1. Efecto del aumento de la relación caucho-estireno sobre la temperatura de reblandecimiento de los copolímeros.

Muestra	Temperatura de reblandecimiento [° C]
E1	89
E2	88
E3	87
E4	79

Tabla F2. Efecto del PVC sobre temperatura de reblandecimiento de los copolímeros caucho-estireno.

Muestra	Temperatura de reblandecimiento [° C]
A4	55
A8	55
A12	65
A16	75

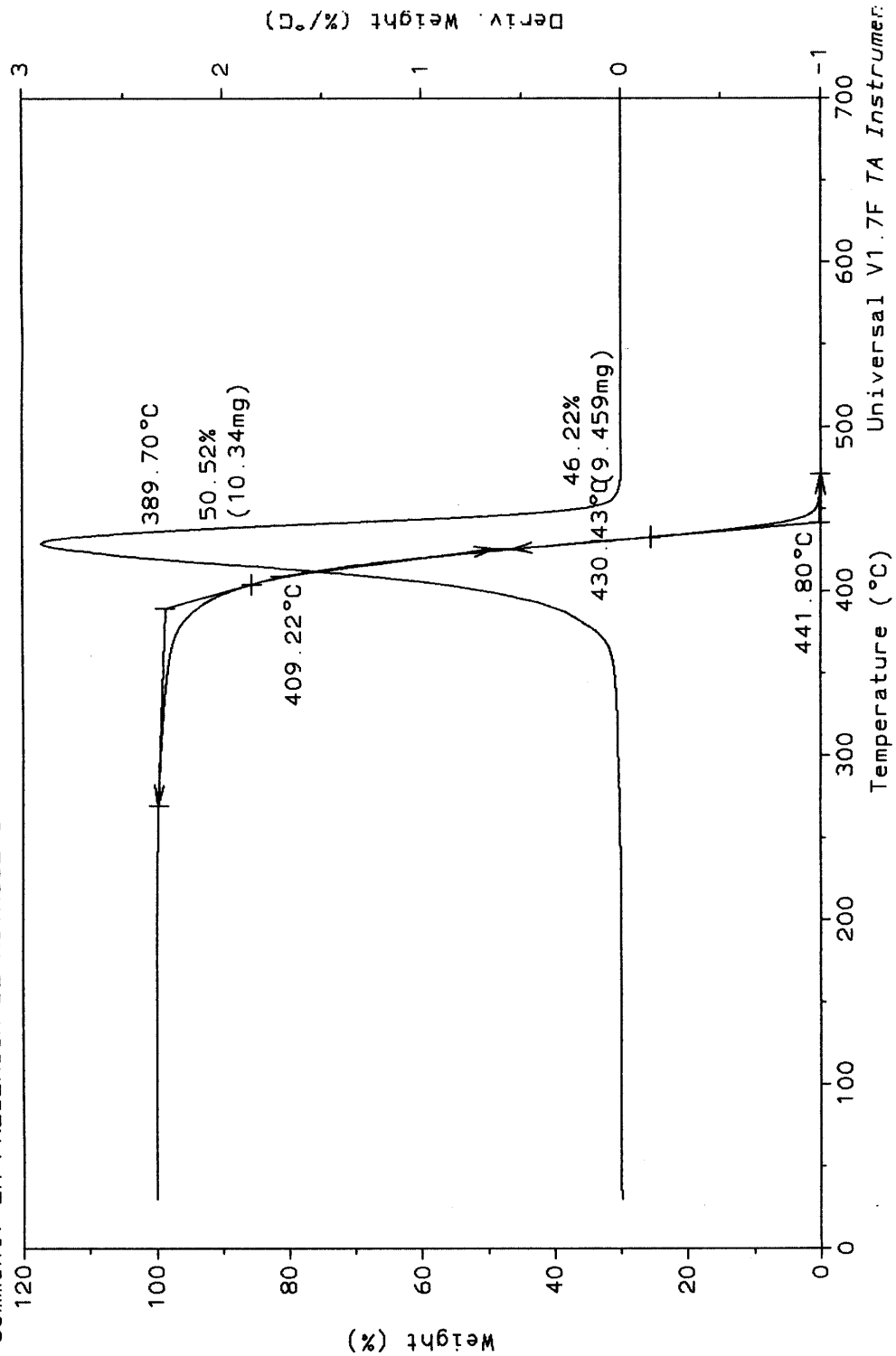
ANEXO G

GRAFICOS DE TGA

Sample: POLIESTIRENO PURO
Size: 20.4650 mg
Method: LINA
Comment: EN PRESENCIA DE NITROGENO

File: D:\TA\DATA.193
Operator: JESUS MANUEL MENDOZA
Run Date: 29-Sep-99 13:57

TGA

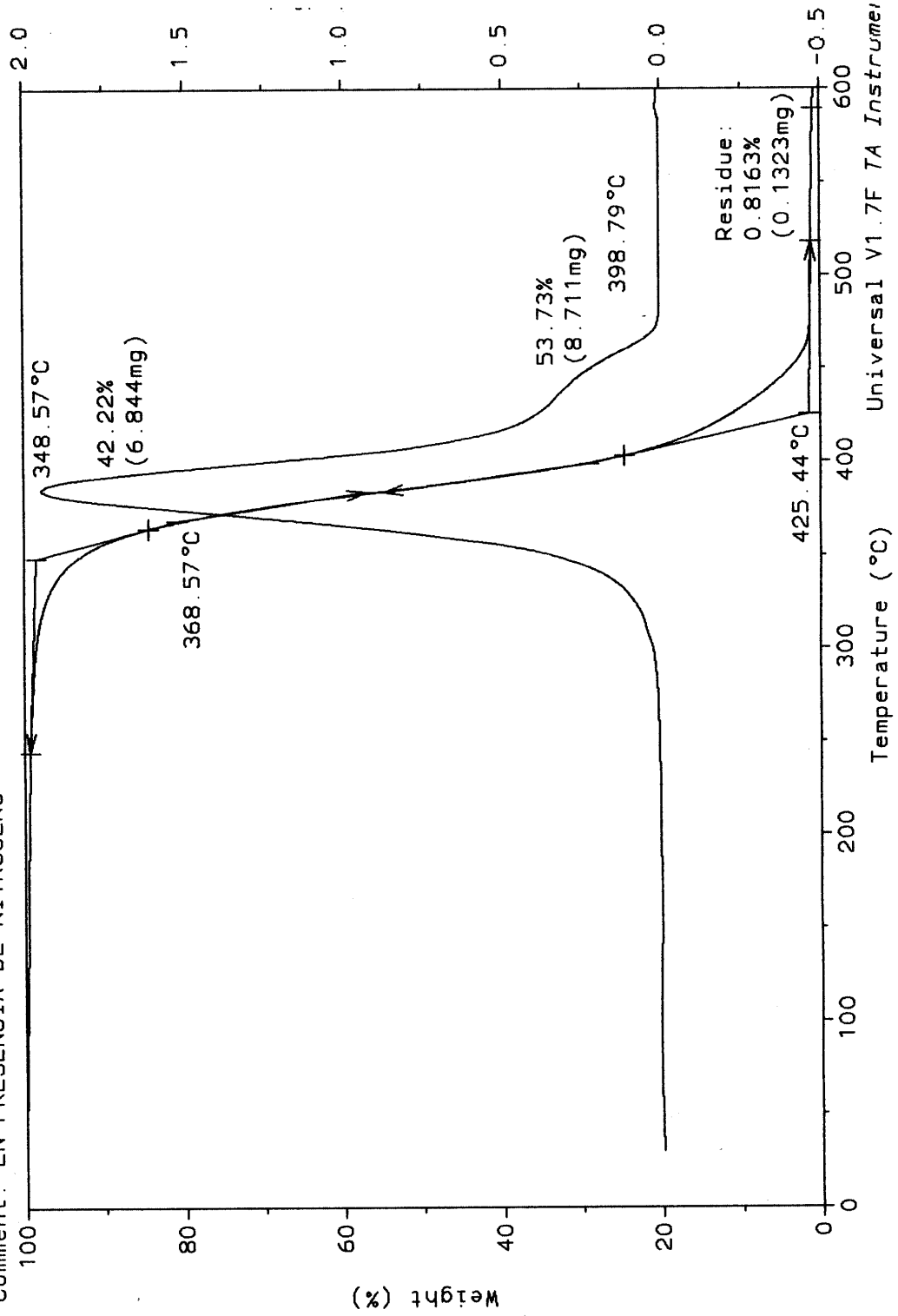


Sample: CAUCHO NATURAL
Size: 16.2120 mg

File: D:\TA\DATA.390
Operator: JMM
Run Date: 23-Apr-03 07:11

TGA

Comment: EN PRESENCIA DE NITROGENO

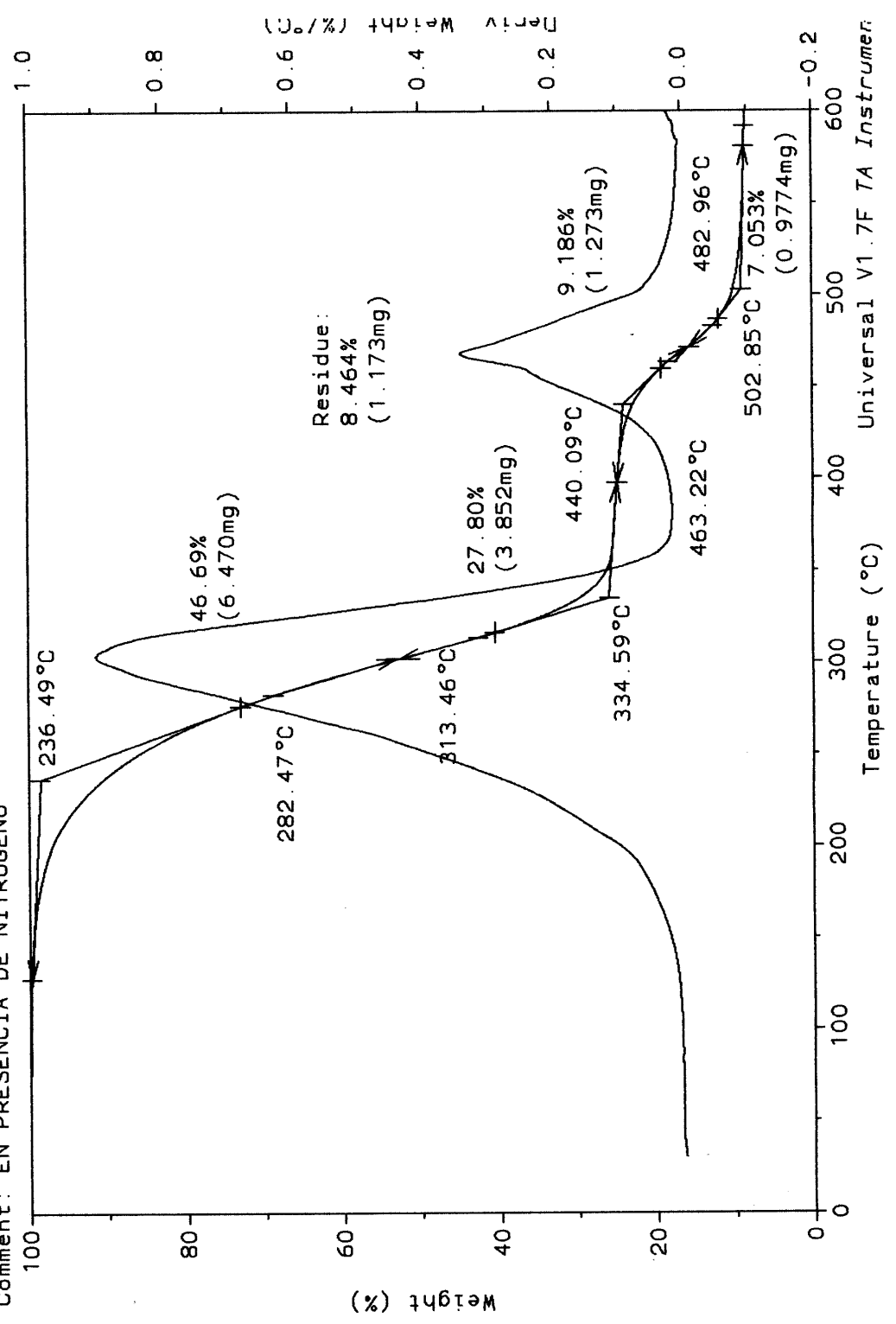


Universal V1.7F TA Instrume

Sample: MUESTRA PVC
 Size: 13.8570 mg
 Method: HEIDY
 Comment: EN PRESENCIA DE NITROGENO

File: D:\TA\DATA.437
 Operator: JMM
 Run Date: 1-Jan-90 06:10

TGA

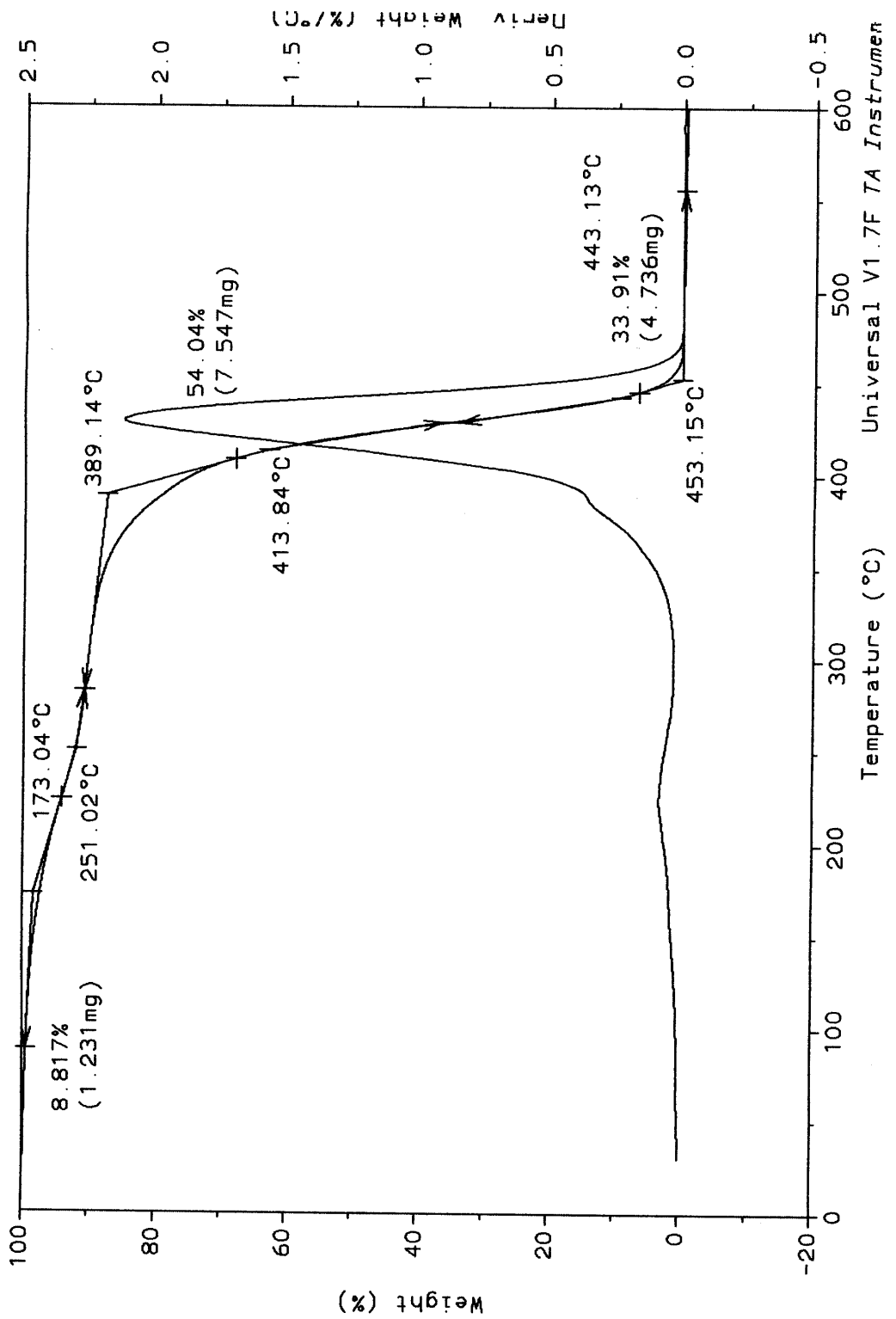


Universal V1.7F TA Instrumen

Sample: MUESTRA M2
 Size: 13.9650 mg
 Method: HEIDY
 Comment: EN PRESENCIA DE NITROGENO

TGA

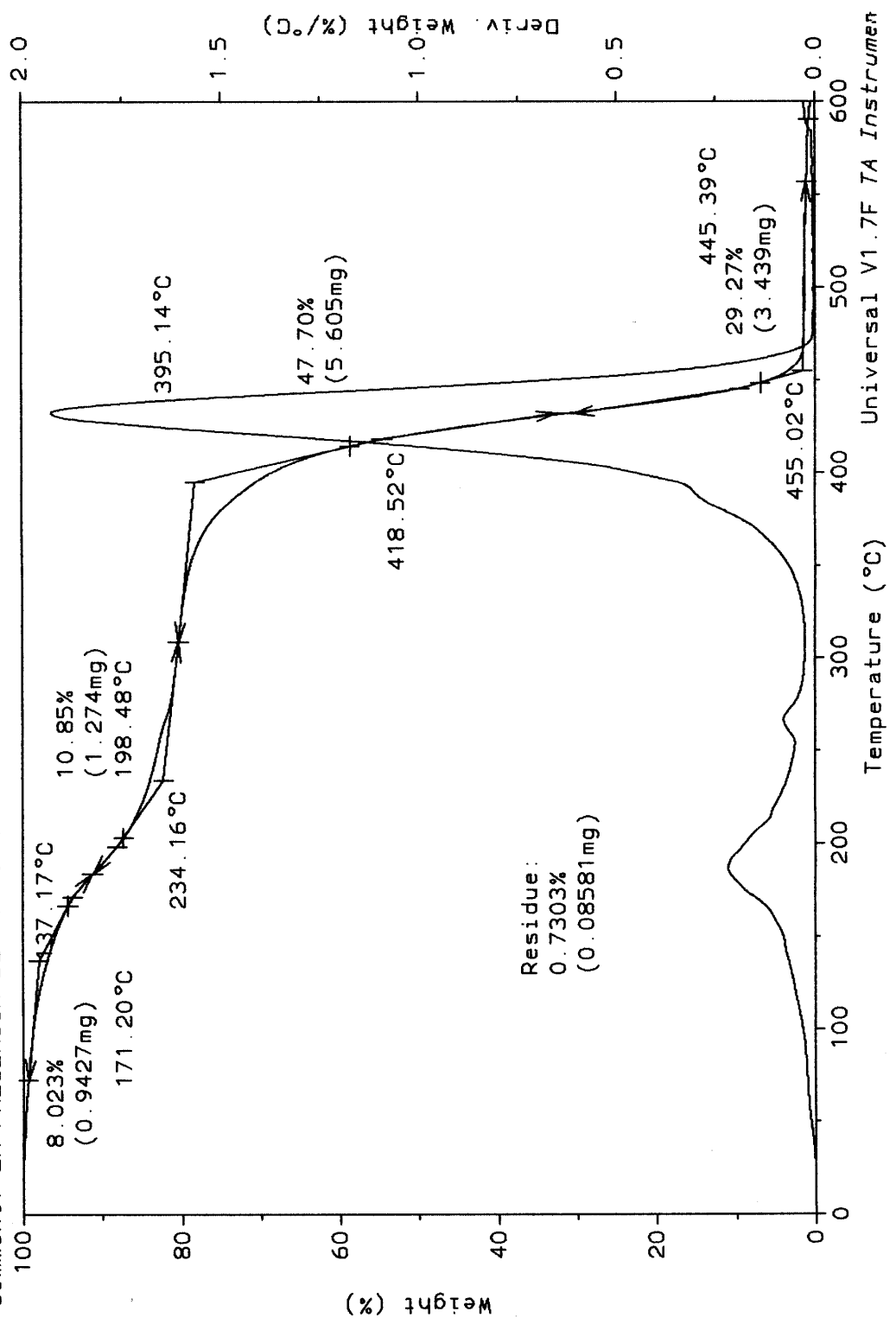
File: D:\TA\DATA.435
 Operator: JMM
 Run Date: 1-Jan-90 05:39



Sample: MUESTRA M3
 Size: 11.7500 mg
 Method: HEIDY
 Comment: EN PRESENCIA DE NITROGENO

File: D:\TA\DATA.436
 Operator: JMM
 Run Date: 1-Jan-90 00:54

TGA



ANEXO H

DUREZA

Tabla H1. Efecto del aumento de la relación caucho-estireno sobre la dureza Shore D de los copolímeros.

Muestra	Dureza Shore D
E1	79,50
E2	77,29
E3	75,43
E4	63,67

Tabla H2. Efecto del PVC sobre la dureza Shore D de los copolímeros caucho-estireno.

Muestra	Dureza Shore D
A4	55,8
A8	52,4
A12	32,4
A16	25

ANEXO J

DIMENSIONES DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN

