



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

“OBTENCIÓN DE CONCRETO POLIMÉRICO A PARTIR DE LA DEGRADACIÓN DEL PET”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
Q U Í M I C A
P R E S E N T A :
ISELA CAMACHO VELASCO

ASESORA: M en C María del Rosario Rodríguez Hidalgo.

CUAUTITLAN IZCALLI EDO DE MÉXICO.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:

"Obtención de concreto polimérico a partir de la degradación del $Ca(OH)_2$ "

que presenta la pasante: Isela Camacho Velasco
con número de cuenta: 0307145-1 para obtener el título de:
Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 27 de Septiembre de 2011

PRESIDENTE	Q. Juan José Mendoza Flores	
VOCAL	Dra. Yolanda Marina Vargas Rodríguez	
SECRETARIO	MC. María del Rosario Rodríguez Hidalgo	
PRIMER SUPLENTE	Q. Juana Cabrera Hernández	
SEGUNDO SUPLENTE	Dr. Cesar Soto Figueroa	



*Antes que nada quiero expresar
mi más profundo y eterno
agradecimiento a **Dios**,
a la vida por dejarme
existir.*

*a mi familia por caminar junto conmigo, en especial a
mi hermana **Bety***

Agradezco a mi casa de Estudios la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan Campo 1 para llevar a cabo mi investigación, también con la colaboración de la Facultad de química que me facilitó las instalaciones para los análisis reológicos además de las FES Aragón donde se realizaron las pruebas mecánicas.

Las pruebas de infrarrojo, mecánicas, reológicas, las cuales fueron posibles mediante los proyectos de investigación PACIVE clave VIASC-102 Investigación teórica-experimental de materiales poliméricos y PAPIIT clave IN 101008 Investigación teórica-experimental de materiales poliméricos nanoestructurados.

Mi más amplio agradecimiento a mi asesora M. C. M. Rosario Rodríguez Hidalgo al Dr. Cesar Soto Figueroa y al Dr. Luis Vicente, cuyo invaluable y generoso apoyo hicieron posible esta investigación, desde luego al Ingeniero Ricardo Eras Cruz de la Fes Aragón por su valiosa asesoría sobre algunos datos de ingeniería civil y por supuesto a la profesora Graciela Martínez Cruz que me prestó el equipo para realizar las pruebas reológicas.

También a todos mis profesores en especial a Raúl Vázquez Chagoyan, Ángel Quintana Vega, Abundio, Decuir, Rosario Rodríguez Hidalgo, Cesar Soto Figueroa, José Luis Espino Vargas, Yolanda Marina Vargas, Juanita Cabrera, Juan José Mendoza, que además de transmitirme sus conocimientos me orientaron.

Por supuesto a mis amigos con los que compartí momentos felices, tristes, divertidos, estresantes: Anabel, Lucy, Bety, Nancy , Gina, Mony, Martha, Gaby, Hilda, Lulú, Mary, Vladimir, Agustín (mis confidentes), Saúl (mi paño de lagrimas), Alejandro (que me oriento para las pruebas reologicas, confidente y consejero) y a todos los compañeros que conformábamos el coro de la FES Cuautitlan por sensibilizar mas mi ser, además de los compañeros que de alguna contribuyeron siendo parte de vida escolar.

Y en la última faceta de la tesis a todos mis jefes del H. Ayuntamiento de Netzahualcóyotl, que me dieron los permisos para acudir a mi casa de estudios para hacer posible este paso.



Agradecimientos.....	1
Prólogo.....	3
Introducción.....	4
Glosario de términos.....	5
Objetivo.....	6
CAPITULO I	7
GENERALIDADES	
1.1 Concepto de polímero.....	8
1.2 Concepto de PET.....	8
1.3 Marco histórico del PET.....	9
1.4 Productores en México.....	10
1.5 Tipos de PET.....	12
1.5.1 <i>Grado fibra</i>	13
1.5.2 <i>Grado película</i>	13
1.5.3 <i>Grado botella</i>	14
1.5.4 <i>Grado ingeniería</i>	15
1.6 Historia del reciclaje del PET en México.....	15
1.7 El reciclaje.....	16
1.7.1 <i>Reciclaje físico o mecánico</i>	16
1.7.2 <i>Reciclaje químico</i>	17
1.7.2.1 <i>Pirólisis</i>	17
1.7.2.2 <i>Hidrogenación</i>	17
1.7.2.3 <i>Alcoholólisis</i>	17
1.7.2.4 <i>Glicólisis</i>	18
1.7.2.5 <i>Aminólisis</i>	18
1.7.2.4 <i>Glicólisis</i>	18
1.7.2.5 <i>Aminólisis</i>	18
1.7.2.6 <i>Hidrólisis</i>	18
1.7.2.6.1 <i>Hidrólisis ácida</i>	19
1.7.2.6.2 <i>Hidrólisis neutra</i>	19
1.7.2.6.3 <i>Hidrólisis básica</i>	20
1.8 Utilidad de los polímeros en la construcción.....	23
1.8.1 Concreto impregnado con polímero (CIP).....	23
1.8.2 Concreto polimérico (CP).....	23
1.8.3 Concreto de cemento Portland polimérico (CCPP).....	23
1.9 Reología.....	25
1.9.1 La Viscosidad.....	26
1.9.1.1 Tipos de viscosidad.....	27
1.9.1.1.1 <i>Viscosidad dinámica o absoluta</i>	27
1.9.1.1.2 <i>Viscosidad aparente</i>	27

1.9.1.1.3 Viscosidad <i>cinemática</i>	28
1.10 <i>Tipos de fluidos</i>	30
1.10.1 Sistema Newtoniano.....	31
1.10.2. Sistema No-Newtoniano.....	32
1.10.2.1 <i>Sistemas Pseudoplásticos</i>	32
1.10.2.2 <i>Flujo Dilatante</i>	32
1.10.2.3 Flujo Plástico.....	33
1.11 Tixotropía	34

CAPITULO II 35

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Análisis físico del PET.....	36
2.1.1 <i>Pruebas de combustión con perlas de bórax</i>	36
2.1.2 Solubilidad del PET.....	36
2.2 <i>Depolimerización del PET</i>	38
2.3 <i>Polimerización del poliéster insaturado</i>	40
2.4 <i>Medición de los parámetros reológicos</i>	41
2.5 <i>Tamizados de los agregados</i>	43
2.6 <i>Gravimetría</i>	45
2.7 <i>Elaboración del concreto polimérico</i>	45
2.8 <i>Compactación del concreto</i>	46
2.9 <i>Rectificado de las probetas de concreto polimérico</i>	47
2.10 <i>Calibrado de las probetas de concreto polimérico</i>	48
2.11 <i>Pruebas mecánicas</i>	48
2.12 Deformación unitaria.....	51

CAPÍTULO III 52

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1 Resultados para el PET transparente.....	53
3.1.1 Pruebas de calentamiento.....	53

3.1.2 Pruebas a la flama. Perlas de Bórax.....	53
3.1.3 Solubilidad.....	54
3.1.4 Ácido-base.....	54
3.2 Resultados para el PET verde.....	55
3.2.1 Pruebas de calentamiento.....	55
3.2.2 Pruebas a la flama. Perlas de Bórax.....	56
3.2.3 Solubilidad.....	56
3.2.4 Ácido-base.....	56
3.3. Depolimerización del PET.....	57
3.4 Análisis de los espectros de infrarrojo.....	59
3.5 Obtención de resinas.....	69
3.5.1 Resina 1.....	71
3.5.2 Resina 2.....	74
3.5.3 Resina 3.....	77
3.5.4 Resina 4.....	80
3.5.5 Resina 5.....	82
3.5.6 Resina 6.....	85
3.6 Composición de las probetas de Concreto Polimérico.....	88
3.6.1 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 1.....	94
3.6.2 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 2.....	97
3.6.3 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 3.....	99
3.6.4 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 4.....	101
3.6.5 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 5.....	103
3.6.6 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 6.....	105
3.6.7 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 7.....	107
3.6.8 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 8.....	109
3.6.9 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 9.....	111
3.6.10 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 10.....	113
3.6.11 Datos, resultados y análisis de resultados para probeta 11.....	115
 <u>CAPÍTULO IV</u>	 117
 <u>CONCLUSIONES</u>	
Conclusiones.....	118
Anexos.....	120
Anexo A Resistencia del concreto.....	121
Anexo B Propiedades del PET.....	121
Propiedades físicas.....	122
Propiedades químicas.....	122
Propiedades ópticas.....	122
Propiedades mecánicas.....	122

Propiedades eléctricas.....	123
Propiedades térmica.....	123
Anexo C Pruebas a la flama.....	124
Anexo D Granulometria del agregado fino y grueso	124
Anexo E Gravimetría.....	125
<i>Cromatografía de capa fina</i>	125
Anexo F Probetas.....	126
Medidas del Molde	126
Anexo G Purificación del estireno.....	127
Anexo H Compactación del concreto	128
Anexo I Espectrofotometría infrarroja.....	129
Anexo J Ddeformación unitaria y esfuerzo.....	130
Anexo K Ley potencia.....	132
Anexo L Mecánica de fractura.....	133
<i>Deformación unitaria y esfuerzo</i>	134
Bibliografía	135

Esta tesis va dirigida a investigadores y estudiantes de áreas de química, ingeniería química, carreras afines e incluso a investigadores de ingeniería civil, por medio de la presente tesis pretendo que posteriormente se lleve a cabo una investigación más avanzada en al que sea posible construir futuros edificios con concreto polimérico o con materiales reciclados químicamente

Uno de los motivos para esta investigación es el pensar en el cuidado de nuestro ambiente, contemplando que día a día se desechan envases de refresco y de agua de polietilen tereftalato, generalmente es reutilizado por reciclaje físico, en la presente investigación se realiza por medio de reciclaje químico en donde la materia prima conserva sus propiedades físicas y sobre todo químicas

La curiosidad de la depolimerización de distintos materiales me llevo a la investigación de un polímero tan común como lo es el PET(Polietilentereftalato) y la inquietud no solo de depolimerizarlo si no de emplearlo en algo útil, la búsqueda de información me llevo a un artículo en el cual realizan la degradación del PET pero no especifican el color del PET, si es de envase de refresco o de agua, incluso en uno de los artículos indican que elaboran la resina con TPA virgen, en la presente investigación se depolimerizarón distintos PET de color de agua y de refresco.

Ahora los investigadores debemos ocuparnos en cómo degradar todos esos polímeros desechables sin dañar al medio ambiente. Ha sido posible el avance tecnológico pero desgraciadamente también la contaminación del medio ambiente.

Uno de los problemas más relevantes en la actualidad es la contaminación del medio ambiente. Una de las alternativas para remediarlo es por medio del reciclaje o degradación de los materiales de desecho. La mayoría de los artículos que se utilizan cotidianamente están elaborados de derivados del petróleo además de muchos aditivos y no es tan fácil su degradación. Generalmente el reciclado se elabora con reciclaje físico, en la presente tesis se degrada por medio de reciclaje químico, de esta manera el polímero conserva sus propiedades químicas (no pierde fuerza en sus enlaces) obteniendo el monómero virgen, ya que en el reciclaje físico el producto obtenido es de menor calidad. Con el **PET (Polietilentereftalato)**, se buscó un método para su reutilización elaborando un concreto polimérico; primeramente depolimerizando el PET para obtener una resina y posteriormente obtener el concreto polimérico.

El concreto debe contener propiedades físicas y mecánicas, de alta viscosidad, resistencia a la compresión, una excelente resistencia a la corrosión, baja permeabilidad y un ajuste rápido a los moldes o espacios, además de baja permeabilidad y sobre todo una alta resistencia-peso.

Encontraremos en el capítulo 1 las generalidades sobre el PET y las propiedades reológicas, el capítulo 2 el desarrollo experimental para cada uno de las pruebas para llevar a cabo la elaboración de las probetas de concreto polimérico, dentro del capítulo 3 los resultados obtenidos en el capítulo 4 resultados análisis de resultados y para finalizar las conclusiones.

BHET: Bis-Hidróxietil Tereftálato

CCPP: Concreto de **C**emento **P**órtland **P**olimérico

CIP: Concreto Impregnado con **P**olímero

CP: Concreto **P**olimérico

DMT: Di-**M**etil Tereftálato

EG: Etilen-**G**licol

Mampostería: Se llama mampostería al sistema tradicional de construcción que consiste en la elaboración de muros, para diversos fines, mediante la colocación manual de elementos que pueden ser realizada con bloques de piedra de caras planas y de forma geométrica, que recuerdan a la prehistoria, que encajan entre sí sin uso de mortero.

PET: Poli-**E**tilen-**T**ereftalato

Resina: Se puede considerar como resina las sustancias que sufren un proceso de polimerización o secado dando lugar a productos sólidos siendo en primer lugar líquidas. Una **resina epoxi** o **poli epóxido** es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o "endurecedor".

Temperatura de transición vítrea: (T_g) se entiende que en esa temperatura el polímero deja de ser rígido y comienza a ser ahulado o blando, es un punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido del material. Arriba de la T_g los enlaces secundarios de las moléculas son mucho más débiles que el movimiento térmico de las mismas, por ello el polímero se torna ahulado y adquiere cierta elasticidad y capacidad de deformación plástica sin fractura. Este comportamiento es específico de polímeros termoplásticos y no ocurre en polímeros termoestables.

TPA: **Á**cido **T**ere**F**tálico (por sus iniciales en ingles)

Objetivo general

Obtener concreto polimérico a partir de PET reciclado

Objetivos particulares:

- 1) Realizar la depolimerización del PET;
- 2) Obtener TPA(ácido tereftálico) como producto de la depolimerización del PET;
- 3) Elaborar una resina insaturada para elaborar el concreto polimérico;
- 4) Caracterizar los productos obtenidos de las diferentes etapas del proyecto;
- 5) Evaluar los resultados de la caracterización.



Capítulo I

Generalidades

Dime y lo olvido, enséñame y lo recuerdo, involucrame y lo aprendo.

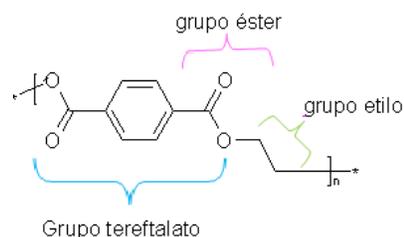
Benjamin Franklin.

1.1 La palabra polímero; *poly* de muchos y *mero* de parte, es decir la unión de monómeros que forman grandes moléculas como los poliésteres que son polímeros que contienen grupos éster en unidad respectiva, a su vez los plásticos son polímeros, sustancias sintéticas caracterizados por alto peso molecular, baja densidad, aislantes del calor y de la electricidad, su facilidad de conformación y su precio económico. Los plásticos se clasifican en dos grupos de acuerdo a sus características. Los termoplásticos son plásticos que, a temperatura ambiente se deforman y al calentarse se derriten y se endurecen al enfriarse, pueden recalentarse y formar otros objetos. Los termofijos, después de enfriarse la forma no cambian y arden. Usualmente la mayor parte de los termoplásticos tienen alto peso molecular. Se utilizan principalmente para la fabricación de fibras películas, láminas, envases soplados y piezas de ingeniería. ¹

1.2 Concepto de PET.⁷

El polietilentereftalato (PET) es un polímero termoplástico que pertenece al grupo de los poliésteres, que como lo indica su nombre conformado por el grupo tereftalato y el grupo etilo. Es elaborado por reacción de condensación. La materia prima utilizada, puede ser ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG) o con dimetil tereftalato (DMT) y también con el bis-hidróxietil tereftalato (BHET), obteniendo distintos grados de PET. El polietilentereftalato es un polímero que se caracteriza por sus propiedades físicas como brillo, ligereza, conserva el sabor de los alimentos además de su aroma, resistencia mecánica, química (ver propiedades anexo B). La estructura química del PET consta de un grupo éster, un grupo etilo, y un grupo tereftalato tal como se muestra en la Figura 1.1:

Figura 1.1. Estructura Química del PET.



1.3 Marco histórico del PET

El polímero se descubrió en el año de 1920 por el investigador Wallace Hume Carothers cuando trabajaba en la empresa Du Pont de Nemours Company, no fue hasta 1941 que Whinfiel y Dickson de la empresa británica ICI (Información Científica Internacional) buscando un sustituto para la seda, identificó la formación de una fibra de poliéster y en 1955 fue patentado como Dacron y nació el proceso de estiramiento de la fibra de poliéster orientación uniaxial para mejorar sus propiedades físicas. En un principio se utilizó para hacer fibras pero en la década de los 70s se tuvo la necesidad de ligereza en envases de bebidas para alimentos y bebidas carbonatadas. Nathaniel Wyeth desarrollo los estudios y tecnología para los envases de PET y también se desempeñaba trabajando en Du Pont³. En 1977 fue aprobado por la Administración de Alimentos y Drogas (FDA) para la producción segura de botellas para la compañía Coca Cola, desarrollando la tecnología para producir el PET grado botella. En la década de los 80s ya se observaba la aparición de los envases de PET en el mercado mundial y a finales de esta misma década ya se envasaban productos carbonatados. Esto condujo al desarrollo del PET grado termoplástico lo cual provocó un aumento en la producción de resina, causando gran acumulación en basureros y por ende contaminación del medio ambiente. A pesar del gran consumo de PET y de la demanda los embotelladores están mejorando sus propiedades para otros productos alimenticios como cerveza, lácteos y conservas y en consecuencia haciendo más complicada su degradación por los aditivos agregados.⁴En la Tabla 1.1 se muestra el consumo de PET en México, en la cual se observa un incremento de casi siete veces de 1997 al 2006.

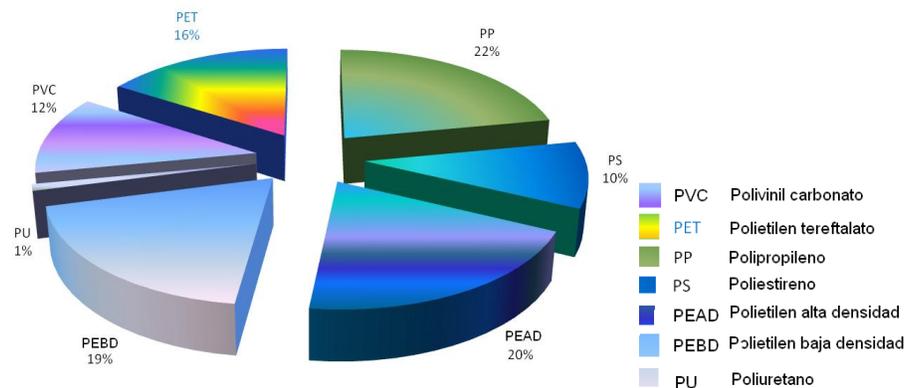
Tabla 1.1. Consumo de PET en México.⁵

Año	Toneladas
1997	105, 931
1998	166, 873
1999	231, 176

2000	297,191
2005	238
2006	740.000

En la Figura 1.2 se muestra el consumo aparente de resinas en México en donde el PET tiene consumo relativamente alto en comparación con las demás resinas.

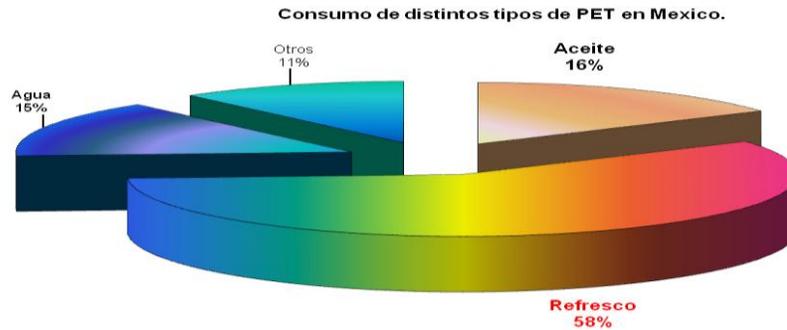
Figura 1.2. Consumo aparente de resinas en México 2007.⁶



1.4 Productores en México.⁵

La única empresa 100% mexicana es Kimex que inició sus operaciones en 1948. En la actualidad cuenta con empresas dedicadas a fabricar y comercializar: filamento Poliéster y Nylon, fibra corta de poliéster, telas de tejido de punto, teñido y acabado de telas, confección de prendas y fabricación de polímeros PET grado textil y grado botella. Además, está integrada a la inyección de preformas y soplado de envases de PET. La planta de PET grado envase está ubicada en Tlalnepantla, Estado de México y tiene una capacidad instalada de 55,000 toneladas. Además, cuenta con una planta de reciclaje de PET.

En México se consume más el PET grado botella, el utilizado para bebidas carbonatadas y representa el 58% del consumo, seguido por las botellas de aceite con un 16%, en tercer lugar por el agua embotellada con el 15%, el restante es de otros productos. Ver Figura 1.3:

Figura 1.3. Consumo de distintos tipos de PET en México.⁵

En México existen aproximadamente 100 empresas transformadoras de PET, tales como: Amcor, Cajaplast, Owens, Polivin, Fapetsa, Alpla, Graham, PET de Occidente, Ediplast, destacadas por su tamaño.⁵

Para la fabricación del PET se obtiene una resina a partir de etileno y paraxileno (derivados del petróleo), presentándose en chips o pequeños cilindros los cuales son fundidos y se inyectan a presión en una máquina de cavidades de distintos tamaños de las que salen las prebotellas o preformas. Posteriormente son sometidas a calentamiento controlado en donde son estirados y por último son inflados a presión hasta que toman la forma que conocemos de botellas.

De acuerdo al método y reactivos que se utilice se obtiene el monómero para después ser convertido en PET. Por medio de la esterificación directa del ácido tereftálico con el etilenglicol se obtiene el *monómero* b-hidroxietil tereftálico (BHET), sometiéndolo a una policondensación hasta obtener una cadena de 100 unidades. Las reacciones representativas para la elaboración son la transesterificación, esterificación y la adición.

a) Esterificación directa: A partir de ácido tereftálico y etilenglicol

Tabla 1.2. Tipos de PET

Tipo de PET	Viscosidad intrínseca(dl/g)
Grado fibra	0.60
Grado película	0.65
Grado botella	0.73-0.80
Grado ingeniería	0.85

1.5.1 Grado fibra

Este tipo de PET presenta un bajo peso molecular con respecto a los otros tipos de PET, se caracteriza por tener elevada resistencia a la tensión, a la abrasión y presentar excelentes propiedades de resistencia química a hidrocarburos aromáticos, alcoholes, detergentes, diferentes ácidos, a los rayos UV además a microorganismos.

El PET grado fibra tiende a absorber humedad por lo cual es sometido previamente a procesos de secado.

Es utilizado para fabricar fibras sintéticas, principalmente poliéster en sustitución de algodón o lino. Ya sea como filamento continuo o como fibra cortada, el PET encabeza a los polímeros textiles. Se emplea para la producción de fibras de confección y para rellenos de edredones o almohadas.

1.5.2 Grado película

El PET grado película usualmente tiene un balance entre sus propiedades físicas, químicas, térmicas y eléctricas. Destacando sus propiedades de permeabilidad a gases como el CO₂, el N₂ y olores. Por su baja retención a la humedad se utiliza en empaques para laminaciones de aluminio y papel. Apropiado para una amplia gama de funciones específicas de ingeniería en calidad. Se ha encontrado aplicación en muchos mercados, incluyendo las industrias productoras de cintas de computadora y cintas de vídeo. También se utiliza en gran cantidad para la fabricación de películas fotográficas, audio y placas de rayos X.⁴

1.5.3 Grado botella

El PET grado botella, a diferencia de los demás tipos de PET no requiere en su elaboración de aditivos, presenta excelentes propiedades de barrera a gases especialmente al CO₂.

Posee muy buena resistencia al impacto y a la tensión puede soportar hasta 4.8 atmósferas.

La polimerización del PET grado botella se realiza en dos etapas:

Polimerización de la base fundida

Por medio de una transesterificación TPA y EG para obtener BHET, recuperando el EG, posteriormente el producto es mezclado con catalizadores y nitrógeno, obteniendo un polímero de bajo peso molecular y con algunos subproductos que son eliminados para mejorar la calidad del producto. Los pellets tienen un peso molecular de 1600 g/mol el cual es alto para la utilización en botellas.

Polimerización del estado sólido

Una vez obtenida la base fundida esta se calienta arriba de la transición vítrea y por de bajo de la temperatura de fusión, dando movilidad a los grupos funcionales al final de las cadenas, logrando un incremento en el peso molecular y el grado de polimerización.

1.5.4 Grado ingeniería

Tiene propiedades de brillantez y estructura cristalina

En su forma natural es un material fácilmente inflamable y gotea a la flama, permanece aún después de alejarlo del contacto con el fuego, es de color amarillo y desprende humos negros de olor irritante. Es un material semirrígido de gran

resistencia a la deformación, alta tenacidad, estabilidad dimensional, bajos coeficientes estáticos y fricción y excelente resistencia al impacto.

El PET grado ingeniería se fábrica a partir de PET grado botella y PET virgen, se le agregan tres tipos de sustancias, agente nucleador para promover un catalizado rápido y uniforme y materiales orgánicos que modifican la estructura química del polímero además de materiales como fibra de vidrio que refuerzan la estructura de productos modelados.⁴

1.6 Historia del reciclaje del PET en Mexico.^{8, 10, 11}

Actualmente existen 4.9 millones de toneladas de PET a nivel mundial que se pueden reciclar.⁶ El PET es uno de los plásticos más utilizados en México y en el mundo, a los cuales también se les llama comodines. En México se cuenta con empresas que se dedican al reciclado del PET son APREPET (Asociación para Promover el Reciclado del PET), ECOCE (Ecología Compromiso Empresarial), A.C; aunque esta ultima exporta a China gran parte del material recolectado. Sin embargo contamos con una de las cuatro plantas de reciclaje de PET grado alimenticio las otras se encuentran en Suiza, Alemania y Estados Unidos. La planta se llama Industria Mexicana de Reciclaje (IMER). La planta esta diseñada para reciclar 25,000 toneladas de PET por año. También existen otras plantas que transforman las botellas principalmente en tapetes.

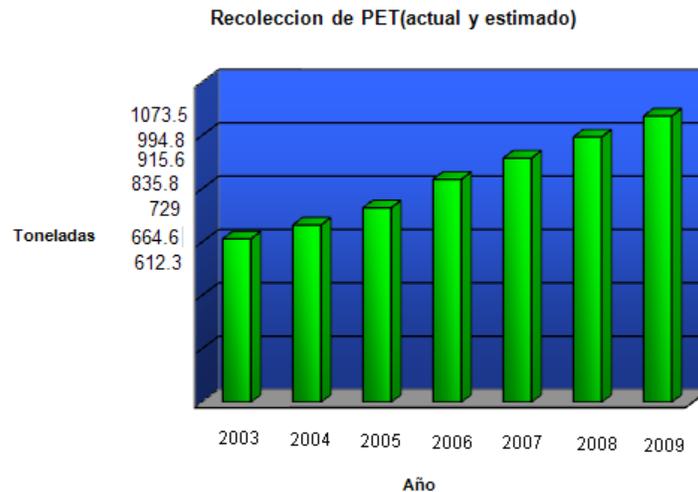
Según el sistema de identificación de materiales reciclados se identifica con el número uno rodeado de tres flechas, como se muestra en la Figura 1.4:

Figura 1.4. Símbolo identificativo del PET.⁸



En la Figura 1.5 se muestran las toneladas de PET recolectado en México tan solo de 1997 a 2009.¹¹

Figura 1.5. Recolección de PET.



El proceso de químico consiste en el fraccionamiento del polímero en monómeros, obteniendo la materia que lo conformó originalmente.

Actualmente se han desarrollado métodos para su reciclaje tanto físico como químico. La depolimerización del PET por medio de reciclaje químico conduce a la obtención de ácido tereftálico (TPA) o b-hidroxitereftalato (BHET), dependiendo del método empleado.

1.7 El *reciclaje*

El **reciclaje** es el proceso de transformación de un artículo que al terminar su vida útil es reutilizada. El reciclaje se puede llevar a cabo de dos formas físico o químico. A continuación se describen los diferentes procesos:

1.7.1 *Reciclaje físico o mecánico*

Es el proceso mediante el cual el plástico de posconsumo es recuperado para su reutilización. Consiste en la molienda, separación y lavado de los plásticos. El

plástico en trozos se puede destinar de forma directa o combinar con materia prima nueva para la elaboración de nuevos productos.

1.7.2 Reciclaje químico

El reciclaje químico implica rompimiento de la estructura original, dando origen a materia prima. Este tratamiento se puede realizar por a) Pirólisis, b) hidrogenación, c) alcoholólisis un ejemplo es la metanolólisis en la que se trabaja en condiciones suaves, d) glicólisis, e) aminólisis, e f) hidrólisis.

A continuación se describen los diferentes procesos de reciclaje químico.

1.7.2.1 Pirólisis

Es el craqueo de las moléculas por calentamiento en vacío. Proceso que genera hidrocarburos líquidos o sólidos que posteriormente pueden ser procesados en refinerías.¹

1.7.2.2 Hidrogenación

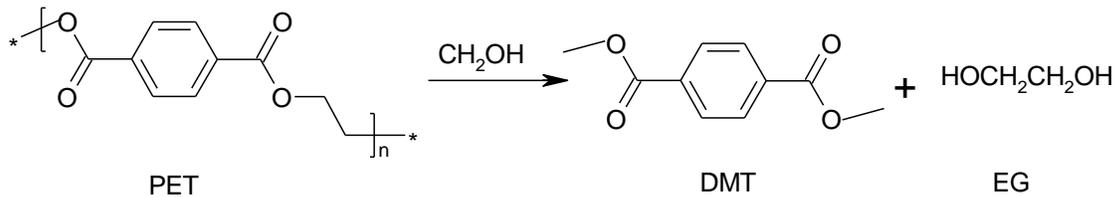
Los plásticos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son transformadas en petróleo sintético que es tratado en plantas químicas.¹

1.7.2.3 Alcoholólisis

El PET es lavado y triturado en una reacción de un solo paso, con alcoholes de uno a cuatro átomos de carbono en su molécula, contenido en un reactor autoclave de presiones de 98.69 atmósferas y intervalos de temperatura de 500°C. Posteriormente se realiza una cristalización, centrifugación y destilación. Los productos son ésteres di alquílicos aromáticos, el alcohol y etilenglicol madre se recuperan por otra destilación.

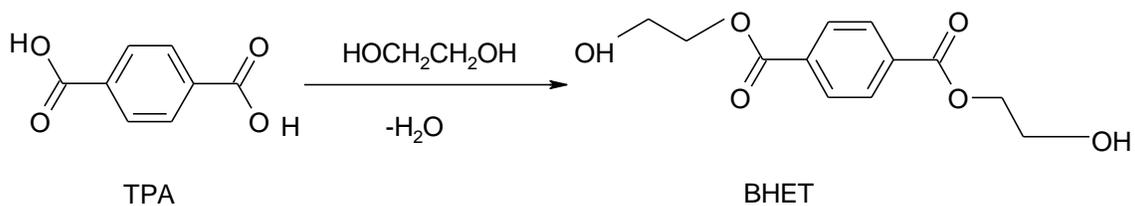
Por ejemplo la metanolólisis se coloca el PET con una mezcla de metanol-agua. Esto produce dimetil tereftálato y etilenglicol en un tiempo aproximado de 4 horas, en un rango de temperatura 240-250°C bajo presión de 20-70 atm, obteniendo un

99% de rendimiento. Los catalizadores pueden ser ácidos, oxalatos, tartratos, metálicos⁴.



1.7.2.4 Glicólisis.⁴

El PET se hace reaccionar con exceso de glicol, como propilenglicol y de un catalizador metálico, el proceso revierte la polimerización del PET, formando cadenas de menor tamaño. La reacción se lleva a cabo en un intervalo de temperatura de una a hora y media.⁴



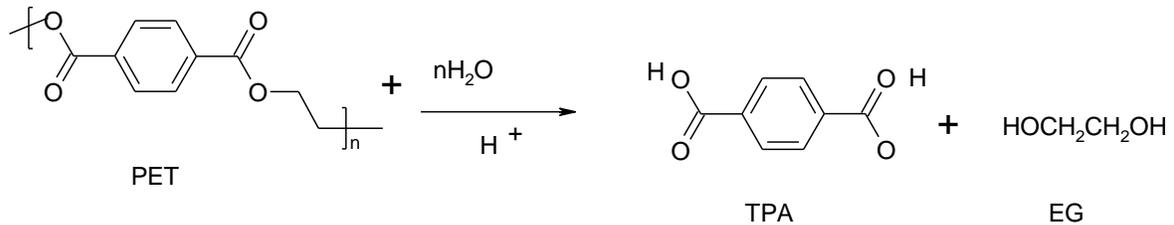
1.7.2.5 Aminólisis.⁴

Es la reacción entre el PET y diferentes disoluciones acuosas de aminas o de amoníaco respectivamente, para dar las correspondientes diaminas del ácido tereftálico y etilenglicol.

1.7.2.6 Hidrólisis.⁴

El PET es hidrolizado con agua, ácidos o hidróxidos, para obtener ácido tereftálico y etilenglicol. Este procedimiento es menos comercial que la metanólisis y la

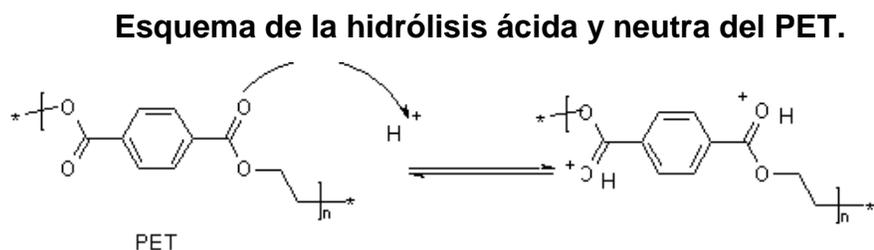
glicólisis. El mecanismo de la degradación ácida y neutra es distinto a la básica, por lo que a continuación se describen cada uno⁴:

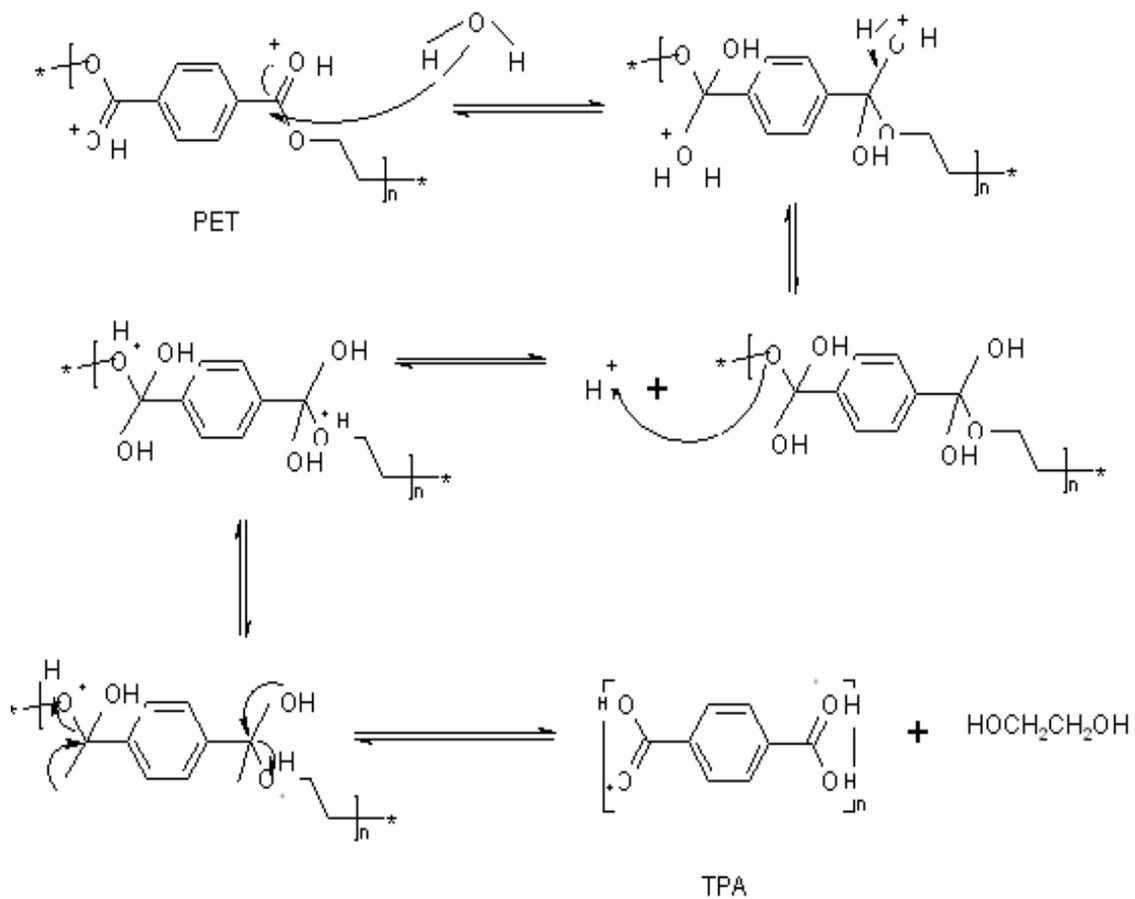


1.7.2.6.1 Hidrólisis ácida: Se trata de depolimerización del PET en ácido tereftálico y etilenglicol, usando disoluciones ácidas, la más utilizada es con ácido sulfúrico, aunque es la más contaminante, por que los productos obtenidos poseen una baja pureza y problemas de corrosión. Utilizando el ácido nítrico, el proceso es más rentable y se obtiene mayor pureza de ácido tereftálico, el etilenglicol se oxida a ácido oxálico el cual es más costoso que el TPA y EG.

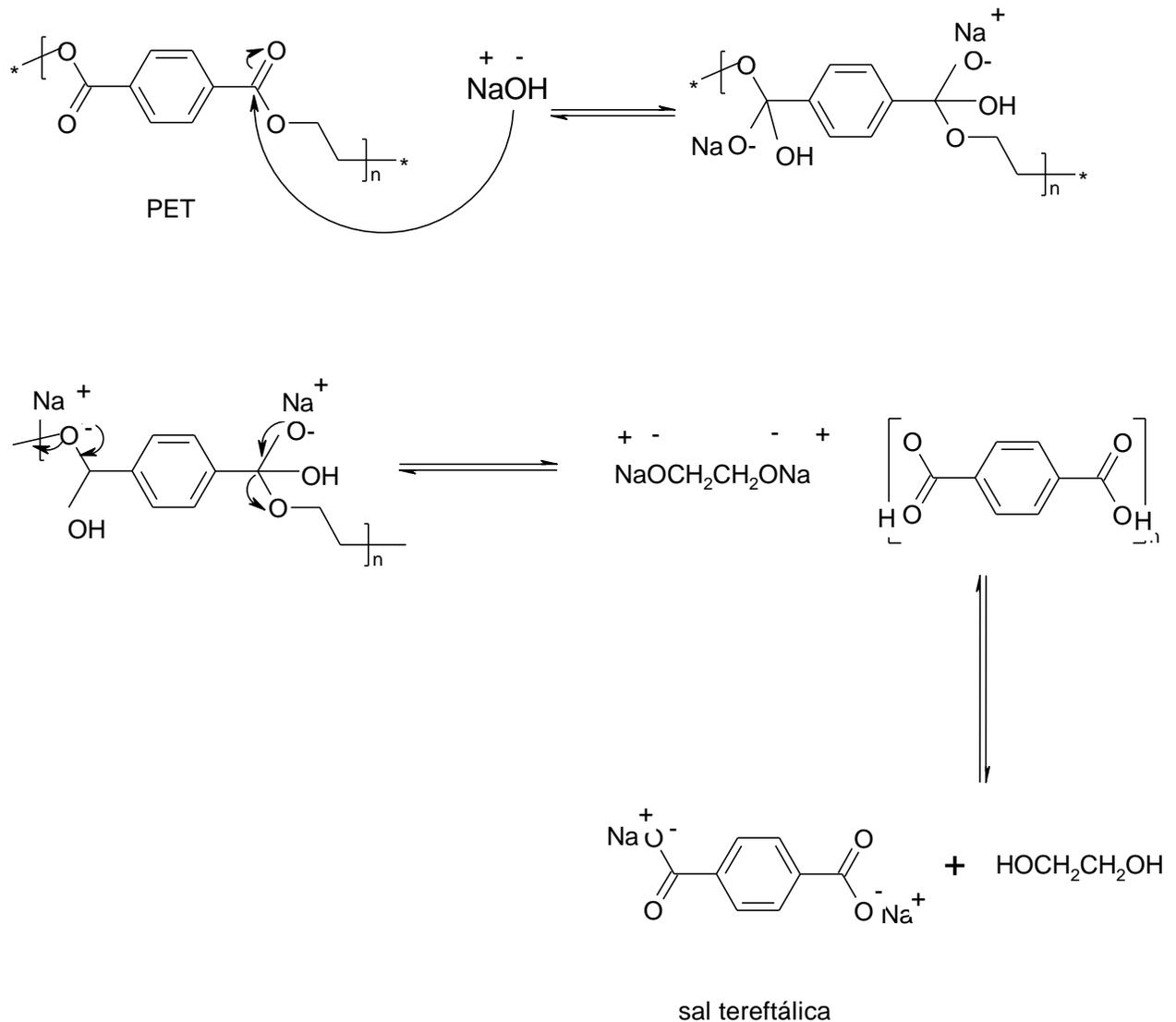
1.7.2.6.2 Hidrólisis neutra. Se lleva a cabo en agua caliente o vapor de agua a altas presiones, para la obtención de ácido tereftálico y etilenglicol, no hay formación de sales inorgánicas, ni problemas de corrosión. La pureza del TPA es mucho menor.

A continuación se muestra el mecanismo de reacción para la hidrólisis ácida y básica:





1.7.2.6.3 Hidrólisis básica. Se utilizan disoluciones de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, para la obtención de tereftálato alcalino. Con la adición de un éter y un alcohol para acelerar la reacción. Tal como se muestra la formación del TPA es como fue utilizado para la elaboración de la resina.



En la Tabla 1.3 se muestra la comparación de los distintos métodos de depolimerización del PET, en el cual la glicólisis es la que tiene más ventajas y esto es mostrado en siguiente capítulo (depolimerización del PET) en los rendimientos obtenidos de los experimentos realizados.

Tabla 1.3. Comparación de los diferentes procesos de reciclaje químico utilizados para el PET.⁴

	Hidrólisis			Metanólisis	Glicólisis
	neutra	ácida	básica		
Materia prima	PET H ₂ O	PET H ⁺	PET OH ⁻	PET metanol	PET EG
% Rendimiento	70	80	70	99	99
Productos obtenidos	<p>TPA + EG</p>			<p>DMT + EG</p>	
toxicidad	—	Liberación de gases	—	—	—
Tiempo de reacción (hrs.)	5-6	4-6	4-5	3-5	1-1.5
Temperatura de reacción(°C)	220	180	180	210-250	200-240
Separación del producto	Filtración, precipitación y purificación	Neutralización, Filtración, precipitación y purificación		Filtración, recristalización y destilación.	Filtración

1.8 Utilidad de los polímeros en la construcción.

Los polímeros también son utilizados para la construcción, se usan para producir tres tipos de concreto que tienen mayor resistencia (ver resistencia en anexo A) al convencional: a) concreto impregnado con polímero (CIP), b) concreto polimérico (CP) y c) concreto de cemento Pórtland polimérico (CCPP).²

1.8.1 Concreto impregnado con polímero (CIP)

Para hacer CIP, el concreto de cemento Pórtland común se seca y después se satura con el monómero líquido como metil metacrilato y estireno. La polimerización se logra con radiación gama a partir de medios térmico-catalíticos, por cual quiera de los dos métodos se generan radicales libres para formar el polímero,(causando contaminación al medio ambiente la cual es una desventaja importante) Una impregnación mayor se logra al evacuar el concreto después del secado a una temperatura aproximada de 150°C. El inconveniente de este tipo de concreto es el alto costo.

1.8.2 Concreto polimérico (CP)

El concreto polimérico se forma al polimerizar un monómero mezclado con los agregados (arena y grava) a temperatura ambiente, usando un sistema promotor de catalizador. Al mezclar todos los componentes se forma la resina mejorando la adherencia en las superficies. El agregado que use en el concreto polimérico debe tener un contenido de humedad bajo y un tamaño proporcional a la cantidad de resina empleada para poderse trabajar, se puede colocar y comprimir por vibración de manera similar al concreto común.

1.8.3 Concreto de cemento Portland polimérico (CCPP)

Se mezclan los agregados (arena y grava) con un polímero en solución acuosa o un monómero que es polimerizado in situ. El látex, los acrílicos y los acetatos de

vinilo son materiales típicos que se emplean junto con un agente antiespumante para minimizar el aire atrapado.

Comparando con el concreto común, las mayores ventajas del CCPP son por su durabilidad y adhesión, la resistencia al congelamiento, al deshielo, abrasión y al impacto de carga alta, pero el flujo plástico es mayor en el concreto usual. El uso típico es en el recubrimiento de puentes y en panales de muros de cortina de mampostería.

Una vez que se obtuvieron los rendimientos de la depolimerización del PET, se elaboraron diferentes resinas con distintas viscosidades, a las cuales fue necesario realizarle pruebas reológicas, se describen a continuación generalidades de reología.

1.9 Reología.¹²

La Reología se define como el estudio entre el esfuerzo y la deformación de los flúidos. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes. Las propiedades de los flúidos son determinadas por reómetros capaces de medir las deformaciones y los esfuerzos de la muestra. Las propiedades reológicas son la elasticidad, viscosidad y relajación.

La Ley de Hooke para la aplicación del estudio en la reología de sustancias sólidas:

$$\sigma = G \cdot \gamma$$

Siendo: σ : esfuerzo cortante (Pa)

G : módulo de rigidez (Pa).

γ : deformación (%).

La fórmula nos dice que si se aplica una carga σ sobre un cuerpo sólido, éste va a sufrir una cierta deformación γ . El valor de dicha deformación se mantendrá hasta que cese el esfuerzo aplicado.

Maxwell propuso un modelo matemático para describir los fluidos que poseen propiedades elásticas, es decir, elementos asociados a la respuesta de un sólido:

$$\sigma = \beta \cdot \gamma$$

donde β es un parámetro semejante al módulo de rigidez (Parámetro no-nulo). Tanto la conducta que observó Weber en sólidos como Maxwell en líquidos se denominó posteriormente “Viscoelasticidad”.

Reiner definió el número de Deborah, D_e como:

$$D_e = \frac{\tau}{T}$$

En donde “ τ ” es el tiempo característico del material y “ T ” el tiempo característico del proceso de deformación. Si D_e era muy alto se consideraba al material como un sólido elástico, y si D_e era muy bajo se le consideraba como un líquido viscoso.

1.9.1 La Viscosidad

La **viscosidad** es una medida de la resistencia ofrecida al flujo por un material, y refleja la capacidad del mismo para disipar la energía de deformación en forma de calor a través del flujo. Un material puede responder a la aplicación de una determinada fuerza mediante un comportamiento elástico o mediante un comportamiento viscoso, sin embargo, lo más habitual es que lo haga como combinación de ambos mecanismos. Este comportamiento combinado se denomina **viscoelasticidad**.

La *viscosidad* se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. La Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\tau = \mu \cdot D$$

donde,

τ : esfuerzo cortante [Pa].

μ : viscosidad [Pa·s]

D: velocidad de deformación [s^{-1}]

1.9.1.1 Tipos de viscosidad

Existen tres tipos de viscosidad la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente.

1.9.1.1.1 La viscosidad dinámica o absoluta, denominada " μ " se ha visto anteriormente en la ecuación 1. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define también como la *pendiente* en cada punto de dicha curva.

1.9.1.1.2 La viscosidad aparente " μ " se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de "viscosidad" para fluidos no newtonianos (figura 1.6).

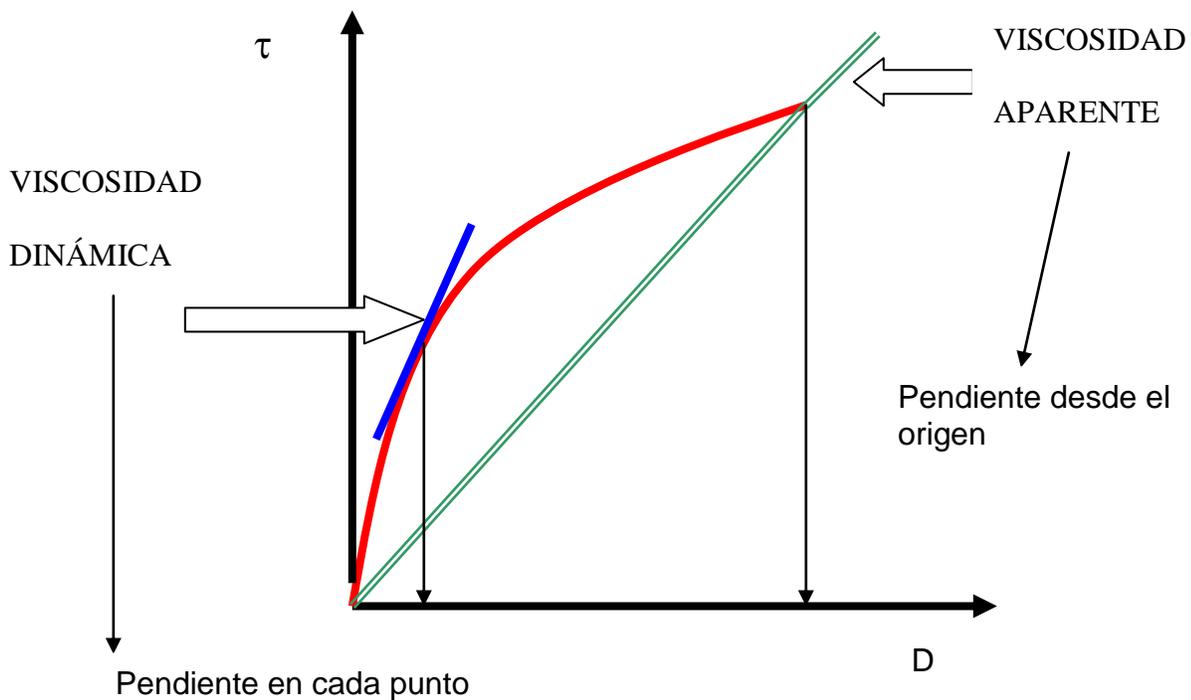


Figura 1.6: Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente.

1.9.1.1.3 Viscosidad “v” denominado **viscosidad cinemática**, que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado. Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centistokes [cst].

$$1 \text{ stoke} = 100 \text{ centistokes} = \text{cm}^2/\text{s}$$

Su ecuación es la siguiente:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Siendo:

ν : viscosidad cinemática.

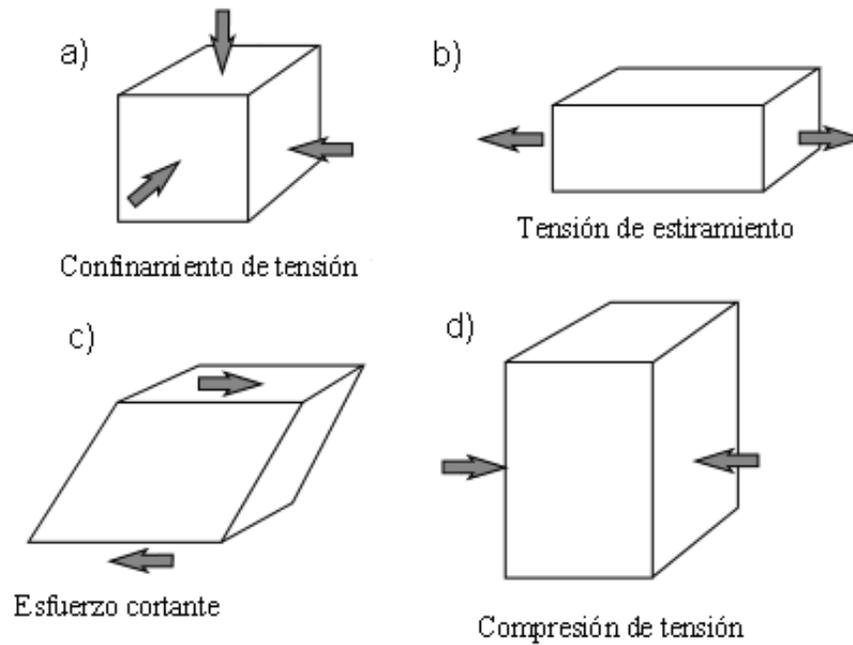
μ : viscosidad dinámica .

ρ : densidad del fluido.

La **elasticidad** es la capacidad de un material para asimilar la energía mecánica aplicada sobre él para conseguir una deformación con el fin de recuperar su forma original cuando cesa la fuerza causante de la deformación.

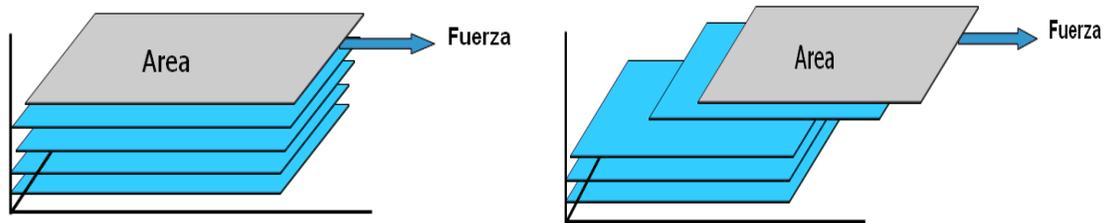
Deformación por cizalla.

Un tipo particular de deformación es la deformación por cizalla. A diferencia de las deformaciones por compresión o expansión, tal como se muestra en al Figura 1.7, en un esfuerzo de cizalla la fuerza aplicada es paralela al plano de la superficie que se deforma, lo que provoca el movimiento relativo entre las distintas capas paralelas de partículas que forman el material, como se muestra en la figura 1.8.

Figura 1.7. Tipos de esfuerzos para flúidos

Los flúidos en movimiento pueden visualizarse como placas paralelas que se mueven una sobre otra por la aplicación de una fuerza. La placa más cercana a la pared del sólido tiene una velocidad de deformación nula debido a fuerzas de tracción de superficies. Conforme las placas se alejan de dicha superficie, las fuerzas de tracción son más débiles y las placas se mueven con mayor velocidad de deformación cuanto más alejadas están (Figura 1.8). La energía utilizada para sostener el flujo, normalmente se disipa como calor de rozamiento (b).

Figura 1.8. Placas de flúido en movimiento.



En la Figura 1.8 se muestra la distribución de las diferentes velocidades de deformación de las placas en la relación a la que se encuentran inmediatamente sobre la pared sólida, la cual se encuentra fija lo cual produce un gradiente de velocidad, este gradiente a su vez ocasiona un esfuerzo cortante τ en dirección perpendicular al movimiento.

Los equipos que se utilizan para medir la viscosidad se denominan viscosímetros y principalmente se clasifican en:

Viscosímetros capilares

Viscosímetros rotacionales

Viscosímetros rotacionales de baja densidad

Viscosímetros rotacionales de alta densidad

1.10 Tipos de fluídos:

1.10.1 Sistema Newtoniano

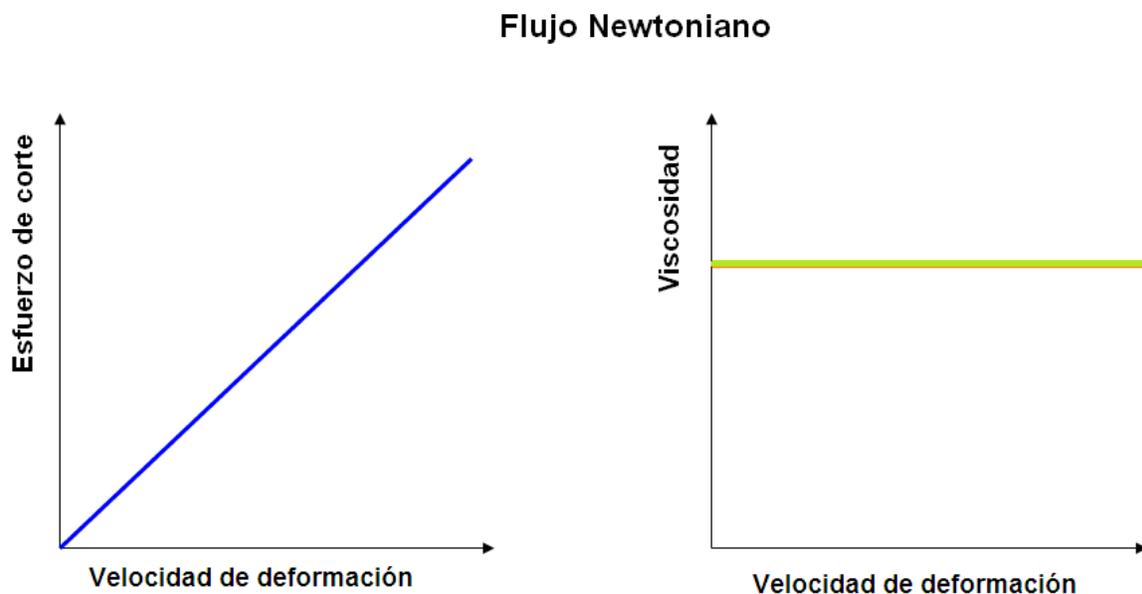
1.10.2 Sistema No-Newtoniano

- ✿ **Flujo Pseudoplástico o reofluidizante (corte delgado)**
- ✿ **Flujo Dilatante o reoespesante (corte grueso)**
- ✿ **Flujo Plástico (o Bingham)**

1.10.1 Sistema Newtoniano:

Los flúidos newtonianos son definidos como aquellos que tienen un esfuerzo de corte (τ) directamente proporcional a la velocidad de deformación (γ). La viscosidad newtoniana es la constante de proporcionalidad, depende de la temperatura y la presión. El diagrama de los fluidos newtonianos es una línea recta que pasa por el origen y cuya pendiente es igual a la viscosidad. Los flúidos se representan dos tipos de gráficas, la “Curva de Fluidez” y la “Curva de Viscosidad”. En la Curva de Fluidez se grafica el esfuerzo de corte frente a la velocidad de deformación (τ vs γ), mientras que en la Curva de Viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de deformación (μ vs γ). Para un flúido newtoniano se obtienen las siguientes curvas (Figura 1.9):

Figura 1.9. Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido newtoniano.



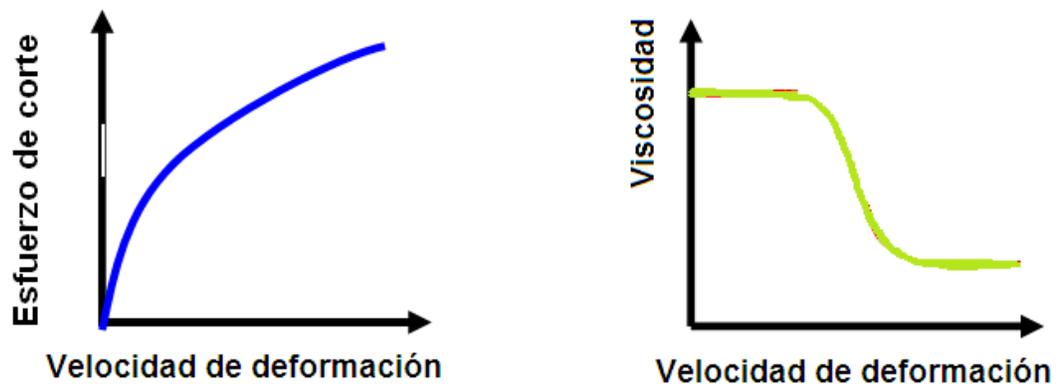
1.10.2 Sistemas no Newtonianos.

Los fluidos no newtonianos, aun a temperatura y presión fijas, son aquellos que presentan un reograma no lineal, que inclusive puede no pasar por el origen. Un ejemplo es el aceite de girasol.

1.10.2.1 Sistemas Pseudoplásticos.

Los líquidos Pseudoplásticos son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se cizallan lentamente, es decir; la viscosidad disminuye con el aumento de la fuerza de corte.

Figura 1.10. Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido pseudoplástico



Algunos ejemplos de fluidos pseudoplásticos son:

- ✿ Ketchup
- ✿ Mezcla ketchup-mostaza al 50 %
- ✿ Gel de manos
- ✿ Suavizante

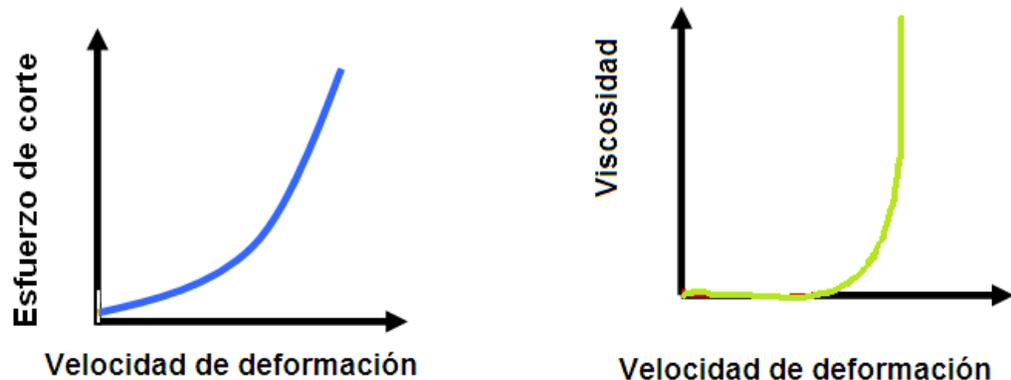
1.10.2.2 Flujo Dilatante

En los fluidos dilatantes el espesamiento es independiente del tiempo que se da a altas velocidades de deformación, es decir, “Aumento de la viscosidad al tacto” – la

viscosidad aumenta con el aumento de la fuerza de corte. Es un fluido inversa a un sistema de flujo pseudoplástico. Un ejemplo es la maizena.

Se aproxima al origen con curva ascendente

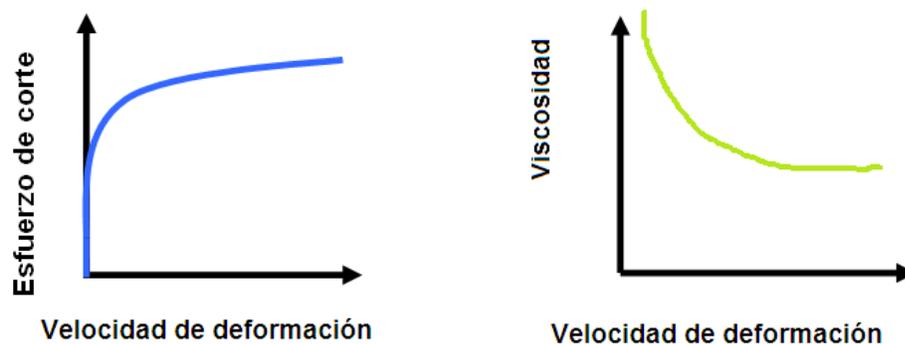
Figura 1.11. Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido dilatante.



1.10.2.3 Flujo Plástico

El Reograma para un fluido plástico es lineal pero no pasa por el origen. Los materiales plásticos no fluyen hasta alcanzar una fuerza de corte que supere el valor de cedencia. A bajas fuerzas de corte el material se comporta como un sólido (elástico). Se encuentra en dispersiones con estructuras intermoleculares con elevadas fuerzas de unión.

Figura 1.12. Curvas de fluidez y de viscosidad para un fluido plástico



1.11 Tixotropía

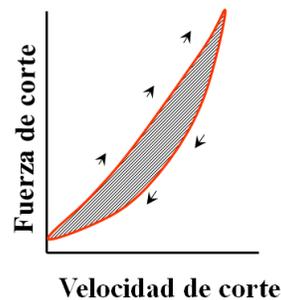
Mewis y Cheng definieron la tixotropía como un decremento continuo de la viscosidad aparente con respecto al tiempo y la subsecuente recuperación de la viscosidad cuando el flujo se suspende. La Tixotropía implica unión de partículas asimétricas de macromoléculas, capaces de producir una estructura 3-D

- **Estructura de gel cuando disminuye la agitación**
- **Por agitación → destrucción de la estructura... Caída de la viscosidad**

El lazo de histéresis es un indicador de la destrucción de la estructura.

El área de histéresis es un índice del grado de destrucción estructural.

Figura 1.13. Gráfica de tixotropía.



Algunos ejemplos de tipos de fluidos tixotropicos son los siguientes:

- Detergente líquido
- Gel de baño
- Yogur
- Pintura

Capítulo II



Desarrollo experimental

"La ciencia avanza a pasos, no a saltos."

Thomas Macaulay

2.1 Análisis físico del PET.

2.1.1 Pruebas a la Flama (ver Anexo C)

Desarrollo experimental¹⁴:

1. Se introduce el alambre de platino en disolución de ácido clorhídrico HCl 1:1.
2. Se toma un poco de muestra de PET transparente con el alambre de platino
3. Se lleva a la base de la flama
4. Se observa el color de la flama
5. Repetir el mismo procedimiento con el PET verde

Tabla 2.1. Material y Reactivos para caracterización física del PET:

Material	Reactivos
Alambre de platino	Ácido clorhídrico
Mechero bunsen	Bórax
Vaso de precipitado	

2.1.2 Pruebas de combustión con perlas de bórax

Desarrollo experimental¹⁵:

1. Se introduce el alambre de platino en el ácido clorhídrico HCl 1:1.
2. Se toma un poco de muestra de PET transparente
3. Se lleva a la base de la flama.
4. Se observa el color de la flama.
5. Repetir el mismo procedimiento con el PET verde.

2.1.3 Solubilidad del PET

Tabla 2.2. Material y Reactivos para pruebas de solubilidad del PET.

Material	Reactivos
Pinzas	Bicarbonato de sodio
Vasos de precipitado	Ácido clorhídrico
Varilla de vidrio	Ácido nítrico
Vidrio de reloj	Ácido sulfúrico
Probeta	Hidróxido de sodio
Refractómetro de Abbe	

Desarrollo experimental:

1. En cada uno de los cinco vasos de precipitado agregar 20 mL de cada disolvente y se etiquetan
2. Se introduce un trozo de PET transparente en cada vaso de precipitado
3. Se deja reposar por 15 minutos, con las pinzas se saca la muestra de PET observando si hay diferencias.
4. Se toma el índice de refracción del disolvente para checar si se quedo alguno de los componentes del PET en la disolución.
5. Repetir el mismo procedimiento con el PET verde

2.2 Depolimerización del PET.

El procedimiento para el reciclaje químico del PET se describe a continuación

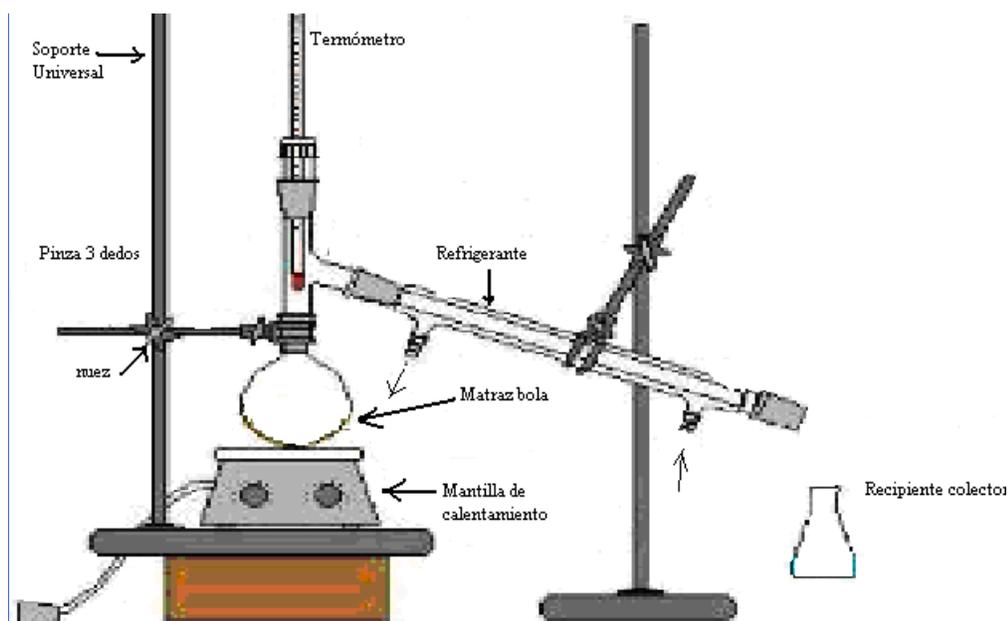
Tabla 2.3. Material, Equipo y reactivos utilizados para la depolimerización del PET

Material	Equipo	Reactivos
Reóstato	Refractómetro de Abbe	Etilenglicol
Espátula	Infrarrojo	PET transparente,
Vasos de precipitado	Cámara para	verde y azul
Pipetas volumétricas y graduadas	cromatografía	Agua destilada
Embudo Buschner	Lámpara de luz UV	Hexano
Matraz Kitazato	Balanza analítica	Acetona
Matraz volumétrico	Bomba de vacío	Acetato de etilo
Placas para cromatografía de capa fina	Quifit	catalizadores
Pipeta Pasteur		gas nitrógeno
Piseta		

Desarrollo experimental^{16, 17, 18}:

1. Se cortan envases de PET transparente, de color azul y verde, se pesa el PET y se coloca en un matraz bola, la disolución de una base, más el etilenglicol, catalizador y perlas de ebullición.
2. Se monta el siguiente equipo:

Figura 2.1. Montaje del equipo de destilación simple.



1. Se mantiene la temperatura en un intervalo de 140-220° C durante una hora
2. Se recolecta el destilado a diferentes tiempos.
3. Se deja enfriar la disolución que queda en el matraz para recuperar TPA,
4. Se agrega agua destilada y unas gotas de una mezcla de ácido sulfúrico-agua.
5. Posteriormente se filtra a vacío.
6. Se envasa el destilado y se mide índice el refracción

En la Tabla 2.4 se muestran los gramos de los reactivos empleados para la depolimerización del PET.

Tabla 2.4. Cantidades empleadas de los reactivos para la depolimerización del

Nº de Ensallo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
g PET	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
mL NaOH	5	10	10	10	10	10	10	5	10	10	10	10
mL EG	8	8	8	8	8	10	8	8	8	8	8	8

PET.

g PET= Gramos de PET de recipientes de color diferente.

NaOH = disolución de hidróxido de sodio.

EG = Etilenglicol.

2.3 Polimerización del poliéster insaturado.

Una vez obtenido el TPA obtenido de la depolimerización del PET se prosiguió para la obtención de la resina con el siguiente desarrollo experimental:

Tabla 2.5. Material, Equipo y reactivos utilizados para la polimerización del poliéster insaturado.

Material	Equipo	Reactivos
Reóstato	Refractómetro	Etilenglicol
Espátula	Infrarrojo	Hexano
Vasos de precipitado	Cámara para	Acetona
Pipetas volumétricas y graduadas	cromatografía	Acetato de etilo
Matraz volumétrico	Lámpara de luz uv visible	Anhídrido Maléico
Fibra de vidrio	Balanza analítica	Ácido sebásico
Placas para cromatografía de capa fina	Bomba de vacío	catalizadores
Pipeta Pasteur	Quifit	
Piseta		

Metodología experimental.^{16, 17, 18};

1. Se hace reaccionar el TPA con la cantidad necesaria de anhídrido maléico, ácido sebásico y etilen glicol.
2. Se mantiene en un intervalo de temperatura adecuado por 30 minutos, posteriormente se aumenta gradualmente de 10 en 10°C hasta llegar a la temperatura dentro de un rango de 70-200°C y se mantiene esta temperatura por una hora.

Se elaboraron distintas resinas con las siguientes composiciones:

Tabla 2.6. Composiciones de las resinas

# de resina	Nombre del compuesto	% Anhídrido maléico	% Ácido sebásico	% Etilenglicol	% Ácido tereftálico
Resina 1		16.35	8.15	65.5	10
Resina 2		16.5	9.2	61.3	13
Resina 3		14.5	11.5	61	13
Resina 4		10.2	4.2	74	11.6
Resina 5		9.5	1.9	70	18.6
Resina 6		15.2	6.3	70.5	14.8
Resina 7		9.7	8.8	65.5	8
Resina 8		14.3	8.2	70	17.5

2.4 Medición de los parámetros reológicos

Posteriormente de la resina polimérica se midió la viscosidad de cada resina obtenida, para tener un parámetro de la viscosidad de las diferentes resinas, siguiendo los siguientes pasos:

Secuencia de pasos para la medición de los parámetros reológicos.

1. Se verifica el nivel de agua del baño de temperatura controlada, se enciende el equipo y se programa a 25°C.
2. Se establece el sistema de cono y placa
3. Se coloca el cono en el sensor. La separación entre el cono y placa se da con la manivela ubicada en el lado derecho del equipo. Cuando se enciende el botón rojo, se lleva a cero el micrómetro y de ahí se da la distancia de 10 o 15 micras.
4. Se calibra el equipo:

Se selecciona la opción de τ

Se selecciona la señal del filtro en 1

Se coloca el botón de % τ en 100%
5. Se agrega la muestra de resina en el contenedor y se ajusta en el reómetro.
6. Se coloca la geometría MP40 en el sensor
7. Se registra las lecturas de los valores de la velocidad de corte.
8. Se enciende el panel de control
9. Se guardan los datos de la lectura inicial del esfuerzo de corte.
10. Se realizan por triplicado las lecturas para cada muestra de resina
11. Al concluir las lecturas, se apaga el panel de control.
12. Se remueve la geometría y el conector.
13. Se limpia el contenedor
14. Se apaga el baño y el equipo.

Datos para la medición reológica.

$t^{\circ}\text{C} = 25$

$\tau = 0.7 - 200$

Intervalo de datos:

30 Puntos.

Tabla 2.7. Material, Equipo y reactivos utilizados para la medición de los parámetros reológicos

Material	Equipo	Reactivos
Vasos de precipitado	Aguja	Acetona
Piseta	Reómetro giratorio	Resina polimérica
Algodón		

Figura 2.2. Reómetro MC-120 Paar Physica (Fluidos viscosos)



2.5 Tamizado de los agregados.

De acuerdo con las ASTM (ver Anexo D) es necesario tamizar y quitar la humedad de los agregados por lo que a continuación se muestra el procedimiento:

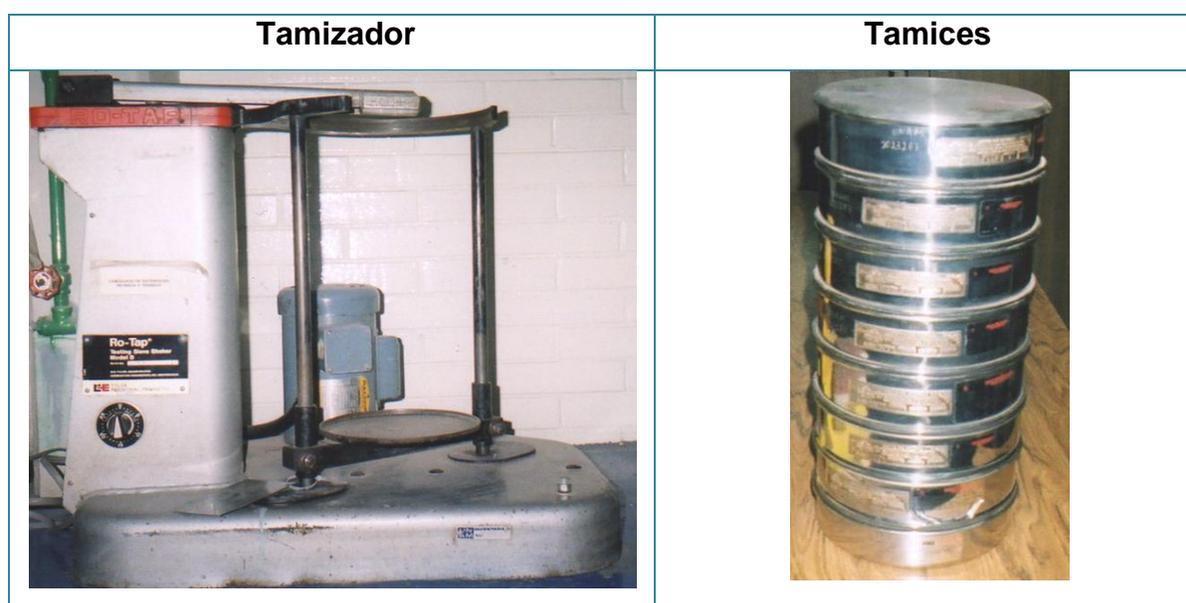
Tabla 2.8. Material, Equipo y reactivos utilizados para el tamizado de los agregados.

Material	Equipo	Reactivos
Serie de Tamices: tamices: # 4, # 8, # 16, # 30, # 50, # 100, # 200 y fondo para el Agregado Fino.	Balanza Tamizador (Ro-Tap) con temporizador automático	Agregado fino (arena) Agregado grueso(grava)
Cucharón		
Cepillo de latón		

Procedimiento.^{16, 17, 18:}

1. Se colocan los tamices de mayor a menor, desde 4, 8, 16, y fondo.
2. Se agrega el hormigón.
3. Se tamiza durante 10 minutos.
4. Se separa cada uno de los tamices utilizando solo lo que queda en el fondo y tamiz # 16.

Figura 2.3. Tamizador y tamices.



2.6 Gravimetria.¹⁹ (Ver fundamento anexo E)

Procedimiento:^{20,21}

1. Se extiende en recipientes amplios la arena que pasó por la maya número 16.
2. Cuando la estufa alcanza 120°C se introduce la arena suficiente durante 24 horas.

2.7 Elaboración del concreto polimérico.²²

De acuerdo a las especificaciones de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) las probetas de concreto polimérico fueron elaboradas y compactadas. (Anexo F)

Tabla 2.9. Material, Equipo y reactivos utilizados para la elaboración del concreto polimérico

Material	Equipo	Reactivos
Espátula Vasos de precipitado Pipetas volumétricas y graduadas Matraz volumétrico	Balanza analítica	Estireno Grava arena catalizadores

Metodología experimental:

- 1 El poliéster insaturado se mezcla con estireno (ver anexo G), arena y grava
- 2 De la mezcla obtenida se le agrega estireno
- 3 Se agregan los catalizadores para producir endurecimiento.

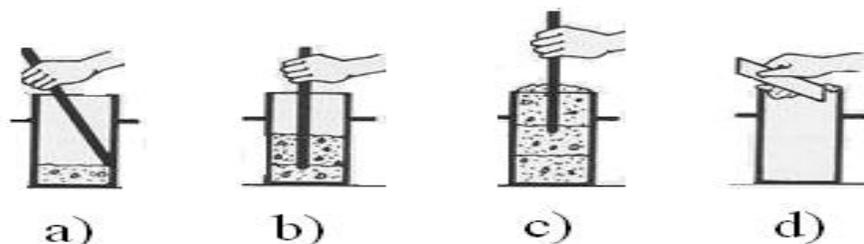
2.8 Compactación del concreto^{23, 24.}

De acuerdo con las especificaciones ASTM (ver Anexo H) las probetas fueron compactadas con el siguiente procedimiento utilizando el material y equipo mostrado en el Tabla 2.10:

Tabla 2.10. Material, Equipo y reactivos utilizados para la compactación del concreto polimérico

Material
Mazo de cuero crudo cabeza con un peso de 0.20kg
Varilla de acero con la punta semiesférica de 10mm de diámetro por 300 mm de largo.

Figura 2.4. Pasos de compactación para el llenado de los cilindros del concreto



1. Se impregna con vaselina fría al molde para que no se pegue con el concreto polimérico.

2. Se llena el primer tercio del cilindro **(a)** compactando con la varilla para que no quede nada de aire atrapado en la mezcla de concreto polimérico.
3. Posteriormente se llena el segundo y tercer tercio del cilindro **(b y c)** de la misma manera hasta llenar completamente el cilindro **(d)** dejando un exceso y con una placa se retira el exceso **(d)**.
4. Se deja fraguar la probeta de concreto polimérico sin mover.

Los moldes fueron elaborados de acuerdo a lo establecido con la ASTM (Anexo E)

2.9 Rectificado de las probetas de concreto polimérico.

1. Se coloca la probeta de concreto polimerico de manera horizontal sobre la base de la máquina rectificadora cuidando que este paralela.
2. Se prende la máquina rectificadora sin mover la probeta de concreto polimerico sin moverla hasta observar que este completamente uniforme(poco tiempo para no perjudicar las medidas establecidas por la ASTM)

En la Figura 2.6 se muestra la máquina rectificadora utilizada para dejar completamente planas las 2 caras de las probetas de concreto polimérico.

Figura 2.6. Máquina Rectificadora.



2.10 Calibrado de las probetas de concreto polimérico

Siguiendo las especificaciones de la ASTM las probetas de concreto polimérico deben tener medidas uniformes a lo largo y a lo ancho por lo que fueron rectificadas las medidas con un calibrador lineal de carátula como se muestra en la Figura 2.7.



Procedimiento del calibrado de las probetas de concreto polimérico²⁵

1. Se coloca la probeta en una posición tan cercana a las caras de medición exterior deslizando la quijada deslizante hasta ajustar a la medida de la probeta.
2. Se toma la lectura en la caratula del calibrador.

2.11 Pruebas mecánicas²⁶

Durante la realización de las pruebas mecánicas fue necesario el apoyo de un compañero para el manejo de la máquina, mientras se toman los datos del calibrador de cuadrante.

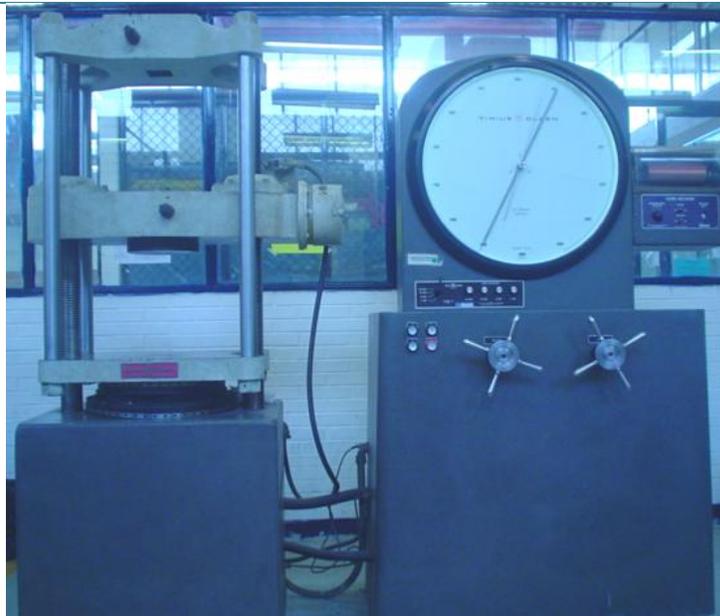
Procedimiento para la medición de las pruebas mecánicas

1. Se selecciona la escala de carga

2. Se carga el depósito hidráulico de máquina abriendo la válvula de carga hasta el punto de que el pistón se mantenga sobre la cama de aceite (para que el sensor de presión no registre en el valor de la carga el peso del armazón de columnas).
3. Se ajusta la altura de la estructura y se coloca la probeta con los cabezales que la mantendrán fija y sujeta y su vez ejercerán fuerza sobre ella.
4. Posteriormente el operario deberá apretar ligeramente la tensión con que se sujeta la probeta de manera en que la medición de la carga empiecen a registrar variaciones.
5. Se ajusta el valor de la medición a cero para que a partir de este punto la máquina registre los cambios de carga y deformación unitaria.
6. Finalmente en operario debe abrir la válvula de carga, procurando mantener la velocidad con que se aumenta la carga de manera constante hasta llegar al punto de rotura, el cual indica el final del experimento.

En la Figura 2.8 se muestra la **Máquina Universal Tinius Olsen**, la cual se ocupa para realizar ensayos tracción/compresión con gran precisión de medida.

Figura 2.8. Máquina Universal Tinius Olsen.



Antes de colocar las probetas de concreto polimérico sobre la Máquina Universal Tinius Olsen se le colocó un cabezal dependiendo del tamaño de la probeta, los cabezales utilizados se muestran en la Figura 2.9.

Figura 2.9. Cabezales utilizados	
Cabezal para muestras con diámetro mayor a 1.8 cm	Cabezal para muestras con diámetro menor a 1.8 cm
	

Procedimiento:

1. Se colocó la probeta sobre los ensayos centrándola de manera que la dirección de su eje mayor sea normal a los apoyos y la proyección de aquel coincida con el centro de estos.
2. Se colocaron las probetas con las caras laterales de la posición de modelo en contacto con los apoyos y las piezas de carga.
3. La carga se podrá aumentar rápidamente al principio hasta aproximadamente el 50% de la rotura, después el incremento será de 500 Kg por minuto como máximo.
4. Una vez producida la rotura se midió la sección de la probeta en la zona de la fractura con la proximidad de 1mm tomando para ello la altura y el ancho promedio.

2.12 Deformación unitaria (ver anexo J).

Se utilizó un calibrador de cuadrante conformado por un Indicador de Cuadrante de Pestaña (Palpador) (este nos indica cuanto se deforma la probeta de concreto polimérico con respecto de la presión ejercida por la máquina Universal Tinius Olsen) y una base para Indicador como se muestra en al Figura 2.10.

Procedimiento²⁷:

1. Se coloca el palpador sobre la cama de aceite de manera que la caja del reloj del palpador se desplace axialmente sobre la superficie de la cama de aceite. Mientras se aplica fuerza en la máquina universal el desplazamiento de la varilla hace girar a la aguja que señalará espacio recorrido por el palpador.
2. Se registra la deformación unitaria cada 20 segundos en la carátula del palpador hasta registrar la falla de la probeta.

Figura 2.10. Calibrador de cuadrante.



Capítulo III



Resultados y discusión de resultados

*"Mil cosas avanzan. Novecientas noventa y nueve retroceden.
Esto es el progreso."*

Henry J. Am

3.1 Resultados para el PET transparente

3.1.1 Pruebas de calentamiento.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos para las pruebas a la flama del PET transparente.

Tabla 3.1. Pruebas en las diferentes zonas de la flama para el PET transparente.

Pruebas a la flama	Zona oxidada	Color	Olor
			Amarillo
	Zona reducida	Amarillo	----
Fuera de la flama		Negro	Dulce
cenizas		Opacas, Gotas, Duras y quebradizas	
Sigue prendiendo		----	

3.1.2 Pruebas a la flama. Perlas de Bórax

Tabla 3.2. Pruebas a la flama. Perlas de Bórax

Perlas de Bórax		color	Olor
		Zona oxidada	Amarillo
	Zona reducida	Amarillo	----

La muestra expuesta al fuego sufrió una considerable distorsión dimensional, contracción, opacidad, y quebrantabilidad. Esto es debido a que el PET es un poliéster y no soportan más de los 70°C de calentamiento.

Tabla 3.3. Caracterización física del PET transparente.

	PET
Opaco transparente	Transparente
Elastómero o plástico	Plástico
Sonoridad	-----
Fácilmente rayable	rayable

3.1.3 Solubilidad.

Tabla 3.4. Solubilidad del PET transparente.

Disolvente	Solubilidad
Acetona	Ligeramente soluble
Cloroformo	No solubiliza
Alcohol etílico	No soluble
Etér	No soluble

3.1.4 Ácido-base

Tabla 3.5. Solubilidad ácido-base para el PET transparente

Disolvente	Soluble / Insoluble
	+ --
NaHCO ₃	Insoluble
HCl	Soluble
HNO ₃	Soluble
H ₂ SO ₄	Muy soluble
NaOH	Insoluble
NH ₄ OH	Insoluble

El PET tiene una estructura molecular con regularidad estructural necesaria para tener un potencial de cristalización (la cristalización, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm³ del amorfo a 1.4 del cristalino), por lo que se observa esa quebrantabilidad y gotas duras al estar en contacto con el fuego.

Debido a la presencia de los anillos aromáticos en su cadena, el PET presenta una moderada flexibilidad al estar en contacto con los diferentes tipos de ácidos sin presentar solubilidad. El **parámetro de solubilidad** del PET es aproximadamente de 21,8 MPa^{1/2} lo que lo hace sensible, en mayor o menor grado, a algunos solventes como cetonas, clorados y alcoholes de 4 u 8 carbonos, los tipos de PET utilizados solo presentaron un poco de flexibilidad y no solubilizaron.

3.2 Resultados para el PET verde

También se realizó la caracterización del PET verde ya que la utilidad del PET verde en la industria es para bebidas con un mayor grado de carbonatación y la porosidad de las capas cambia para mantener en buenas condiciones a la bebida.²⁸ La importancia de también estudiar el PET de color verde es que en la industria cuando lo fabrican para otro tipo de alimentos (como el refresco de toronja) le agregan mas aditivos cambiando las propiedades químicas y físicas del PET.

3.2.1 Pruebas de calentamiento PET verde.

En la tabla 3.6 se muestran las pruebas a la flama para el PET verde presentando los mismos resultados que para el PET transparente solo que el PET verde tiene mayor resistencia al rayado como se muestra en la tabla 3.8 y tarda un poco menos para arder en contacto con el fuego siendo la flama un amarillo mas luminoso, además de ser menos soluble a los ácidos (tabla 3.10), debido a los estabilizadores que le agregan para que sea mas estable a la fotodegradación.²⁹

Tabla 3.6. Pruebas en las diferentes zonas de la flama para el PET verde.

Pruebas a la flama	Zona oxidada	Color	Olor
		Zona reducida	Amarillo
Fuera de la flama		Negro	Dulce
cenizas		negro, Gotas, Duras y quebradizas	
Sigue prendiendo		----	

3.2.2 Pruebas a la flama. Perlas de Bórax

Tabla 3.7. Pruebas a la flama. Perlas de Bórax

Perlas de Bórax		color	Olor
	Zona oxidada	Amarillo	---
Zona reducida	Amarillo luminoso	---	

Tabla 3.8. Caracterización física del PET verde.

	PET
Opaco transparente	Transparente
Elastomérico o plástico	Plástico
Sonoridad	---
Fácilmente rayable	Poco rayable

3.2.3 Solubilidad

Tabla 3.9. Solubilidad del PET verde.

Disolvente	Solubilidad
Acetona	Insoluble
Cloroformo	Insoluble
Alcohol etílico	Insoluble
Etér	Insoluble

3.2.4 Ácido-base

Tabla 3.10. Solubilidad ácido-base para el PET verde

Disolvente	Soluble / Insoluble	
	+	--
NaHCO ₃		Insoluble
HCl	Soluble	
HNO ₃	Soluble	
H ₂ SO ₄	Muy soluble	
NaOH		Insoluble
NH ₄ OH		Insoluble

3.3. Depolimerización del PET:

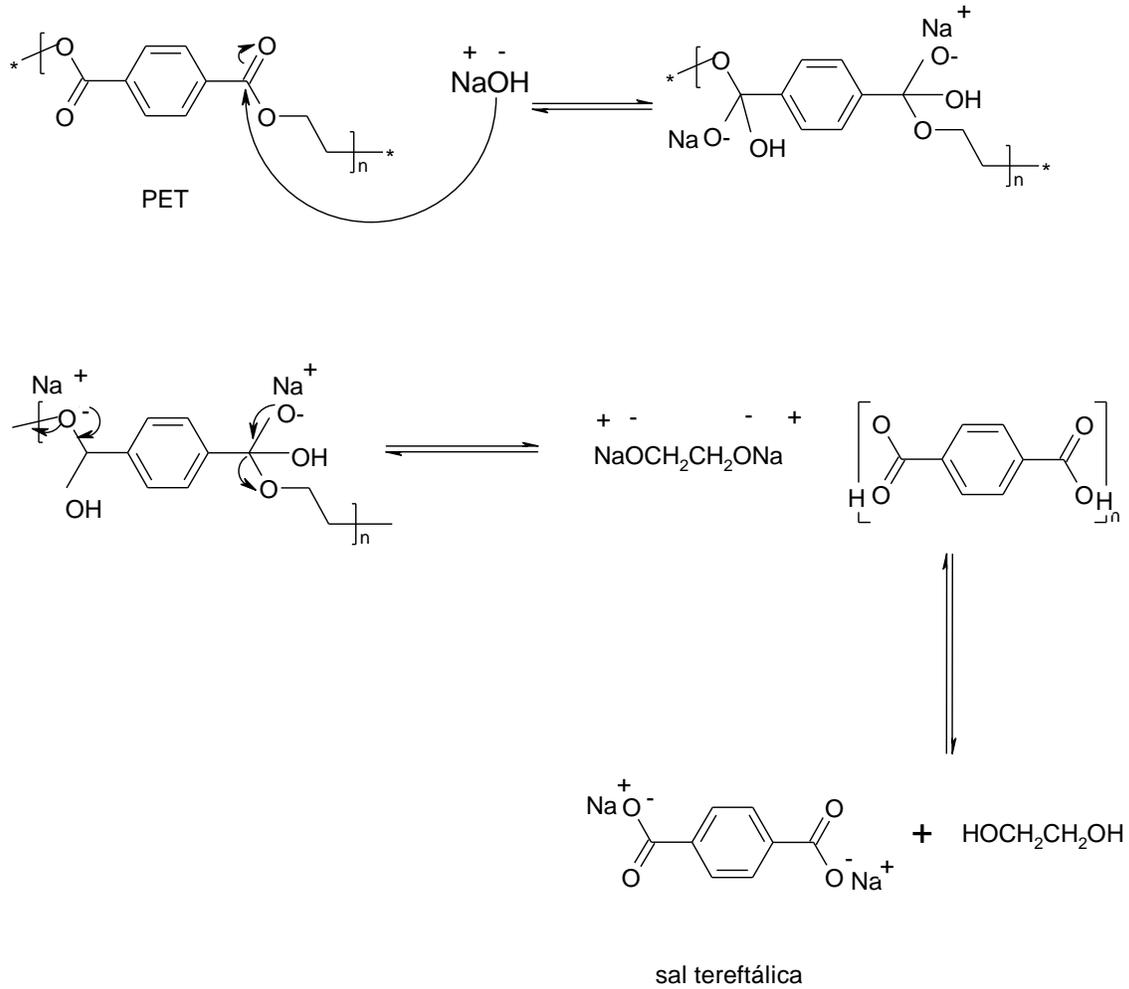
El reciclaje químico del PET se basa en reacciones de policondensación, primeramente se realiza una reacción de glicólisis catalizada en medio básico con hidróxido de sodio. El PET es transformado en TPA, recuperando el etilenglicol.

El PET es un poliéster que tiene grupos éster en su estructura molecular, la hidrólisis básica presenta interacciones estables y en cuanto se le agrega el ácido se forma la sal mediante precipitación.⁴

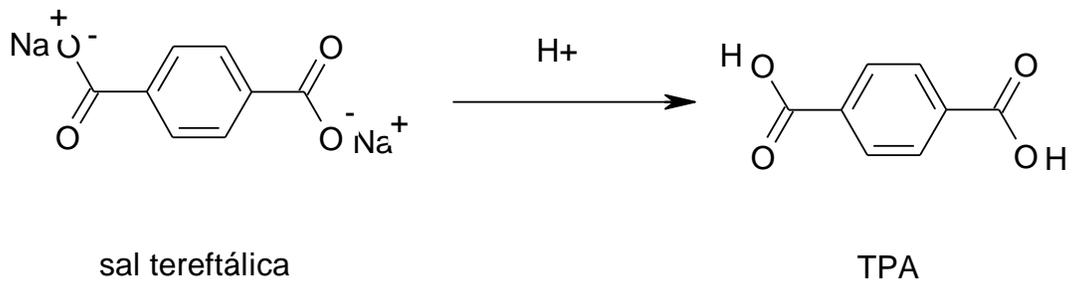
Se utilizaron diferentes tipos de PET, azul, verde y transparente de botellas de agua y de refresco de los cuales se logró una completa depolimerización.

La temperatura del sistema se incremento de temperatura ambiente a temperatura de reacción y posteriormente se mantuvo por media hora para obtener una depolimerización mayor al 85%.

La acción bifuncional de los grupos OH del etilenglicol y del NaOH que actúa como catalizador de la reacción (cargada negativamente), ataca a la parcial positiva del grupo carbonilo del Polietilen tereftálato (PET), produciendo el rompimiento gradual del polímero. Efectuando el siguiente mecanismo de reacción:⁴



Una vez formada la sal tereftálica se le agregó ácido sulfúrico que conlleva a la precipitación del ácido tereftálico.



La obtención de ácido tereftálico se comprobó por medio de espectroscopia de infrarrojo

3.4 Análisis de los espectros de infrarrojo (fundamento ver anexo D)

En el presente capítulo se muestran los espectros obtenidos y su interpretación. Se analizaron las tres zonas del infrarrojo (Anexo B) para cada banda característica de los grupos funcionales.

En la zona I la primera banda localizada en 3064.71 cm^{-1} se debe a la vibración del enlace C-H del alargamiento de la molécula.

En la zona II la banda ubicada en 2822.40 a 2548.75 cm^{-1} se confirma el alargamiento de C-H. También se localiza la banda en 1681.90 cm^{-1} , por la vibración del grupo C=O de alargamiento, la cual es intensa. Asimismo se observa el alargamiento de la banda alrededor de 1829 cm^{-1} la cual es característica de aromaticidad a causa de la presencia de los enlaces insaturados C=C provocados por el sistema de dobles enlaces conjugados en el anillo aromático. El anillo aromático se encuentra conjugado a su vez con grupos insaturados los cuales originan la banda ubicada en 1575 y 1510.45 cm^{-1} traslapándose con la vibración de tijereteo del CH_2 de los grupos metileno.

En la zona III la banda en 1285.34 cm^{-1} confirma los grupos alcano y éster aromática de la molécula del PET. La vibración de estiramiento asimétrico C-O-C característico se observa en las bandas situadas en 1136.37 y 1113.38 cm^{-1} cuando este grupo se encuentra conjugado con grupos aromáticos la banda se desplaza a 1285.34 cm^{-1} . El estiramiento asimétrico de los grupos metileno se encuentra en 1019.55 cm^{-1} y 939.58 . Se confirma la presencia de C-O debido a la banda de absorción en 1113.38 cm^{-1} .

El análisis anterior es semejante para los siguientes espectros presentados de la depolimerización del PET excepto en el espectro N° 3 dado que difieren en la

banda ubicada en 3373.43 cm^{-1} , la cual es característica para el grupo OH. Esta diferencia se debe a la humedad en la muestra.

Espectro de infrarrojo N° 1 del PET depolimerizado

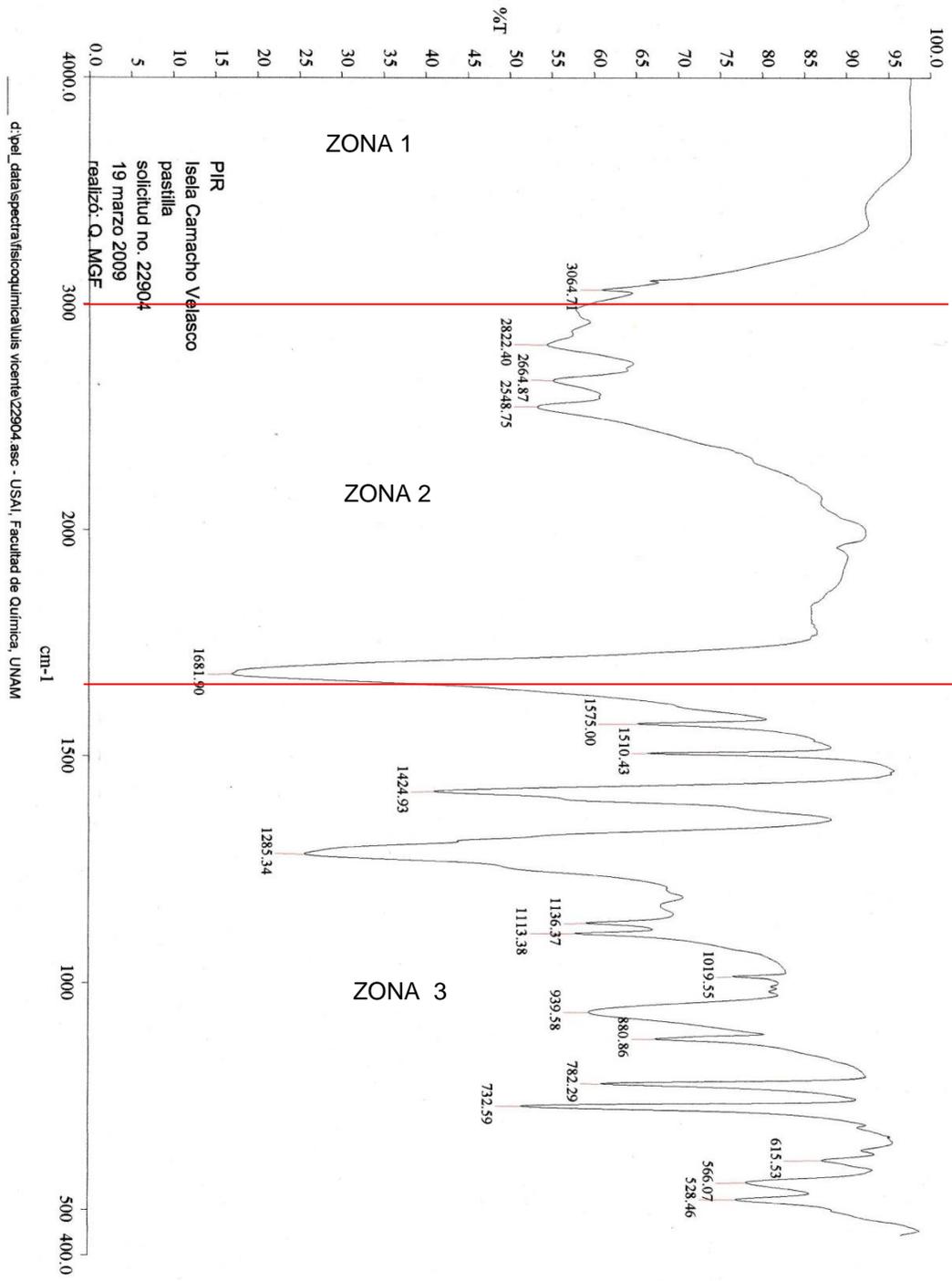


Tabla 3.11 descripción del espectro de IR del PET reciclado

Zona	Región espectral (cm ⁻¹)	Grupo funcional que causa la absorción
Zona I	3064.71	C-H alargamiento
Zona II	2822.40	C-H alargamiento
	2548.75	
	1829	C=C alargamiento aromático
	1681.90	
	1575.00	C-H de CH ₂ deformación
1510.45		
	1424.93	Flexión de C-H CH ₂
Zona III	1285.34	C-O-C alargamiento asimétrico
	1113.38	
	1019.55	Estiramiento de los grupos metileno CH ₂
	939.58	

Espectro de infrarrojo N° 2 de TPA (Reactivo analítico)

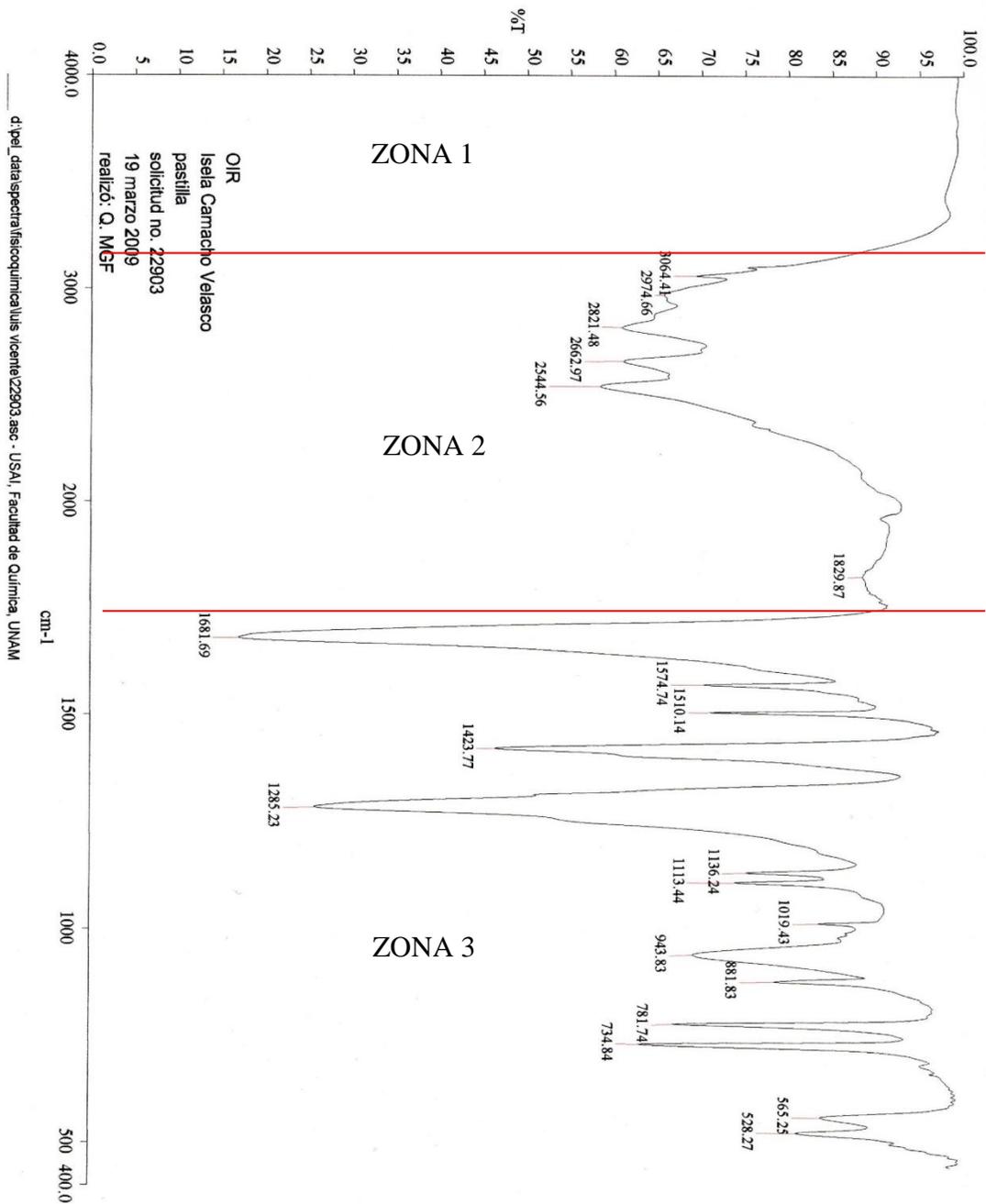


Tabla 3.12. Descripción del espectro N° 2 de IR de TPA (reactivo analítico)

Zona	Región espectral (cm ⁻¹)	Grupo funcional que causa la absorción
Zona I	3064.41	C-H alargamiento
Zona II	2974.66 2544.56 1829.87 1681.69 1423.77	C-H alargamiento C=C alargamiento aromático C=O alargamiento Flexión de C-H CH ₂
Zona III	1285.23 1136.24 1019.43 943.83	C-O-C alargamiento asimétrico C-O alargamiento Estiramiento de los grupos metileno CH ₂

Espectro de infrarrojo N° 3 del PET depolimerizado

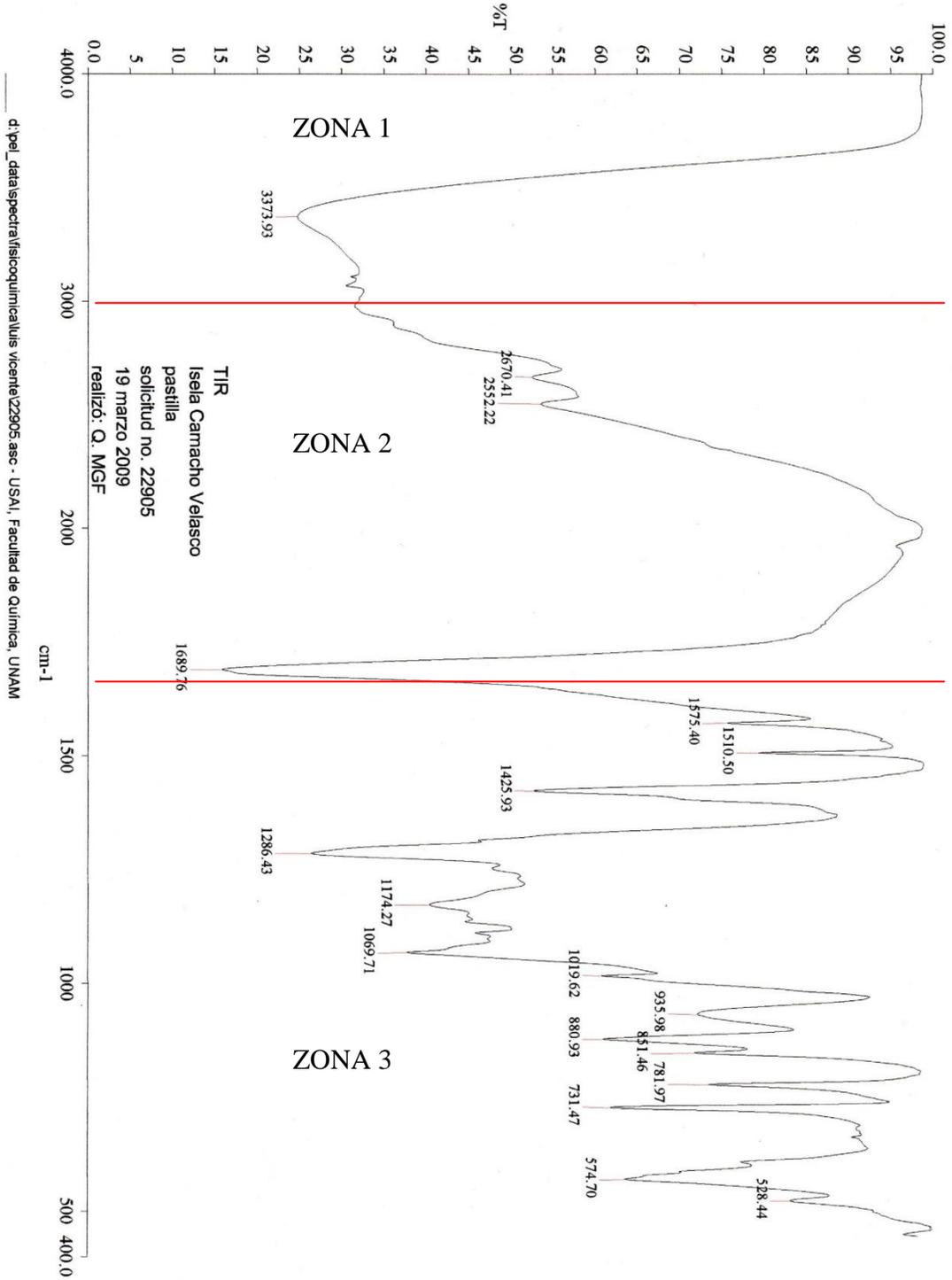


Tabla 3.13 descripción del espectro de IR del PET reciclado

Zona	Región espectral (cm ⁻¹)	Grupo funcional que causa la absorción
Zona I	3373.93	HO- C-H alargamiento
Zona II	2670.41 2552.22 1689.76 1575.40 1510.50 1425.93	C-H alargamiento C=C alargamiento aromático C=O alargamiento C-H de CH ₂ deformación Flexión de C-H CH ₂
Zona III	1286.43 1174.27 1019.55 935.98	C-O-C alargamiento asimétrico C-O alargamiento Estiramiento de los grupos metileno CH ₂

Al comparar los espectros 1 y 2 que el uno es del PET reciclado contra el espectro del TPA (grado reactivo analítico) son muy semejantes por lo cual se confirma que se obtiene el TPA de la depolimerización realizada.

Tabla 3.14. Análisis físico del PET

TPA Obtenido De la depolimerización del PET	Propiedades físicas del TPA obtenido	Propiedades físicas del TPA reportado. ⁸
	<p>Polvo blanco Sublima sin fundir Insoluble en agua Ligeramente en NaOH</p>	<p>Polvo blanco Sublima sin fundir Insoluble en agua Ligeramente en NaOH</p>

Tabla 3.15. Índices de refracción del destilado obtenidos de depolimerización del PET.

Nº de Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% R	76.11	83	87.28	98	81	95	90	98	97	96	99	95
η_0	1.3305	1.33	1.3305	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.3305	1.33	1.33
η 1	1.3305	1.33	1.3305	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.3305	1.33	1.33
2	1.331	1.33	1.3305	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.3305	1.33	1.33
3	1.331	1.331	1.3305	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.331	1.3305	1.33	1.33
4	1.331	1.331	1.3305	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.331	1.3305	1.33	1.33
5	1.332	1.332	1.3305	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.332	1.3305	1.33	1.33
6	1.333	1.332	1.3315	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.332	1.3305	1.33	1.33
7	1.333	1.334	1.3315	1.33	1.3305	1.33	1.33	1.33	1.334	1.3305	1.33	1.33
8	1.333	1.3365	1.3345	1.33	1.331	1.33	1.33	1.33	1.3365	1.3305	1.33	1.33
9		1.3635	1.345	1.33	1.334	1.33	1.33	1.33	1.3635	1.3305	1.33	1.33
10		1.417	1.345	1.33	1.3325	1.33	1.33	1.33	1.417	1.3305	1.33	1.33
11		1.417	1.404	1.33		1.3315	1.33	1.33	1.417	1.3305	1.33	1.33
12			1.417	1.331		1.332	1.33	1.33		1.3305	1.331	
13				1.331		1.333	1.33			1.3305	1.331	
14				1.335			1.33				1.335	
15				1.338			1.33				1.338	

η = índice de refracción del destilado

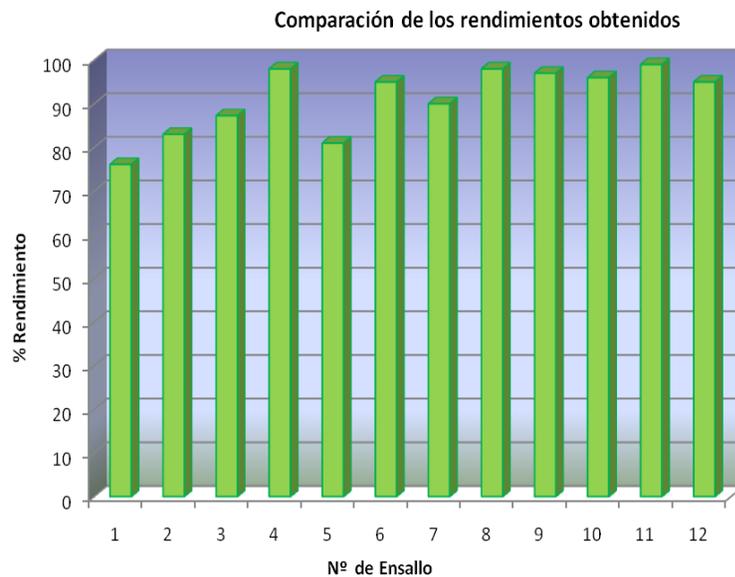
η_0 = índice de refracción del blanco.

% R = porcentaje de rendimiento

Durante la experimentación se observó que a mayor tiempo de reacción se destila acetaldehído el cual es producto de la degradación del PET, es decir que a mayor tiempo de reacción mayor cantidad de acetaldehído destilado, esto se comprobó por cromatografía de placa fina y por índice de refracción.

Tabla 3.16 y grafico 3.1 del rendimiento obtenido de los ensayos realizados

Nº de ensayo	% R
1	76.11
2	83
3	87.28
4	98
5	81
6	95
7	90
8	98
9	97
10	96
11	99
12	95





Polimerización del poliéster insaturado

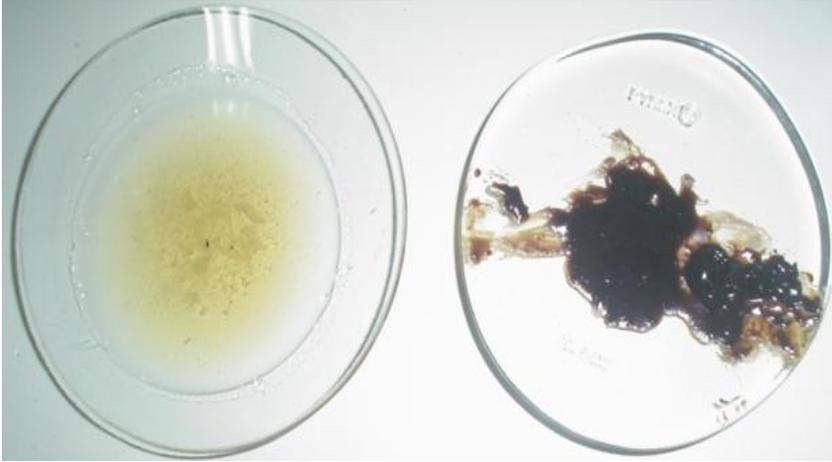
"Lo importante es no dejar de hacerse preguntas."

Albert Einstein (1879-1955).

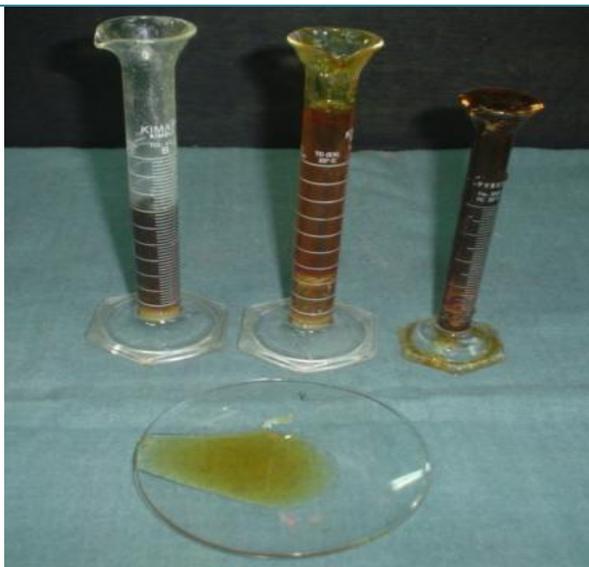
3.5 Obtención de resinas

Una vez llevada a cabo la polimerización de la resina se obtuvo de 3 a 5 mililitros de resina por cada gramo de PET. En la siguiente tabla se muestran los diferentes tipos de resinas obtenidas.

Figura 3.1. Resinas obtenidas de la polimerización del poliéster insaturado

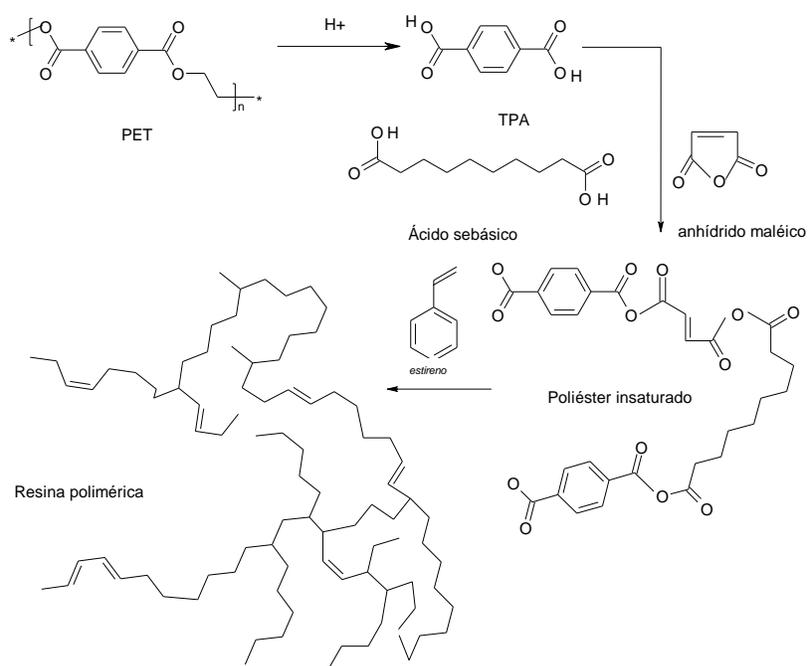
a) Poliéster insaturado	
	<p><i>Primeras resinas elaboradas. La primera (color miel) con una baja viscosidad obteniendo pocas insaturaciones y la segunda con una muy alta viscosidad.</i></p>
b) Poliester insaturado	
	<p><i>Observación cualitativa de la viscosidad obtenida de la resina polimerica.</i></p>

c) Distintos poliésteres insaturados



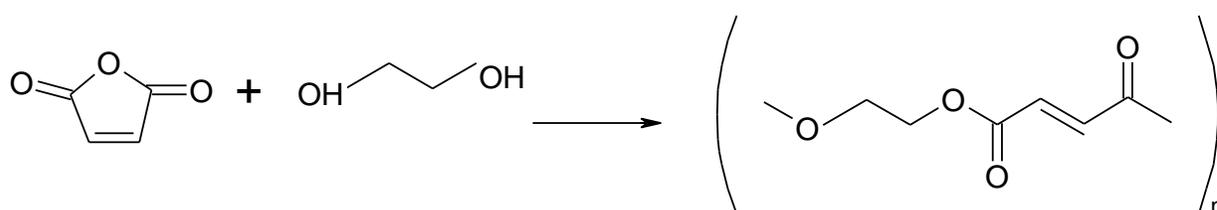
Medición de los distintos poliésteres insaturados obteniendo diferentes viscosidades y tonalidades de cada una de las resinas.

Al agregarle las cantidades adecuadas de anhídrido maléico y ácido sebásico, al final de la reacción se obtuvo un líquido color ámbar viscoso pegajoso, el TPA reacciona con el ácido sebásico para formar un poliéster insaturado, por vía reacción de condensación.

Mecanismo de reacción de la elaboración de la resina polimérica:


Una característica de las resinas poliméricas es que son de color ligeramente amarillo, producidas por condensación con el etilenglicol y el ácido tereftálico (ácidos dicarboxílicos) con el ácido sebásico, estos son empleados para la producción de los puntos de entrecruzamiento, uno saturado y otro insaturado. El TPA reduce la proporción de puntos de entrecruzamiento, la densidad de la resina da flexibilidad al poliéster final, el ácido sebásico da los puntos para obtener entrecruzamientos de la estructura de la resina. El empleo principal del ácido sebásico es espaciar los dobles enlaces reduciendo la viscosidad de la resina polimérica.

Como primer paso en la elaboración de la resina polimérica el anhídrido maleico reacciona con etilenglicol para obtener la resina con insaturaciones repartidas a lo largo de la cadena.^{34, 35}



3.5.1 Resina 1

Tabla 3.17. Promedio de las tres mediciones Reológica de la Resina 1

Punto de medición	Velocidad de deformación [1/s]	Esfuerzo de corte [Pa]	Viscosidad [Pa·s]	Temperatura [°C]	Log Velocidad de deformación	Log Viscosidad
1	0.70066667	22.0666667	30.9333333	24.9333333	-0.15448864	1.49038704
2	0.86066667	38.9333333	45.5	24.9333333	-0.06522252	1.65799243
3	1.03666667	51.1	49.2333333	24.9333333	0.01562125	1.69225606
4	1.23333333	72.7	58.1333333	24.9333333	0.09087437	1.764411
5	1.49666667	110	74.0333333	24.9666667	0.1749063	1.86934346
6	1.81666667	143.333333	79.0666667	24.9666667	0.259024	1.89793242
7	2.22	172.333333	77.7	24.9666667	0.34624314	1.89012804

8	2.66	214	79.73333333	25	0.42442753	1.90146995
9	3.48666667	297.3333333	85.7	25	0.54222655	1.93284616
10	4.04	343.666667	84.6	25	0.60637514	1.92712361
11	4.893333333	434.3333333	86.5666667	25	0.68958638	1.93718848
12	5.903333333	535.3333333	88.3666667	25.03333333	0.77100276	1.94603105
13	7.473333333	655	89.63333333	25.03333333	0.87322843	1.95206923
14	8.803333333	791.3333333	90.4666667	25.03333333	0.94463959	1.95616018
15	10.32	923.666667	90.4666667	25	1.01289956	1.95611518
16	12.9666667	1183.333333	90.5666667	25	1.11272185	1.95659281
17	15.43333333	1433.333333	90.6666667	25	1.18805408	1.95708836
18	19.0666667	1736.66667	90.6666667	25	1.28020919	1.95711218
19	22.8	2106.66667	90.53333333	25	1.35762849	1.95643571
20	27.3	2580	89.83333333	25	1.43457651	1.9531561
21	34.1	3103.333333	89.53333333	25	1.53263984	1.95170143
22	43	3760	89.3666667	25	1.63328074	1.95087403
23	53.5666667	4693.333333	89.1	25	1.72855217	1.94958303
24	61.5	5510	88.7666667	25	1.78881841	1.94791652
25	76.63333333	6636.66667	88.3	25	1.88432364	1.94557188
26	93.6	8080	86.3666667	25	1.97120803	1.93606469
27	111	9700	85.0666667	25.03333333	2.04507391	1.92941177
28	138.3333333	11500	83.9	25.0666667	2.14080462	1.92337899
29	171.666667	13666.6667	82.2666667	25.1	2.23404654	1.91483835
30	200.666667	16233.33333	80.73333333	25.13333333	2.30247045	1.90658183

Gráfico 3.2. Reograma de Resina 1

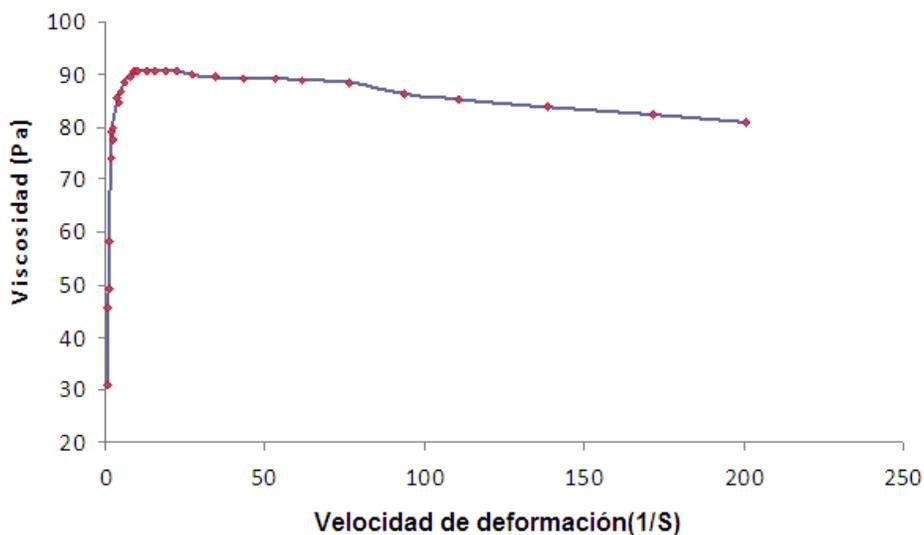
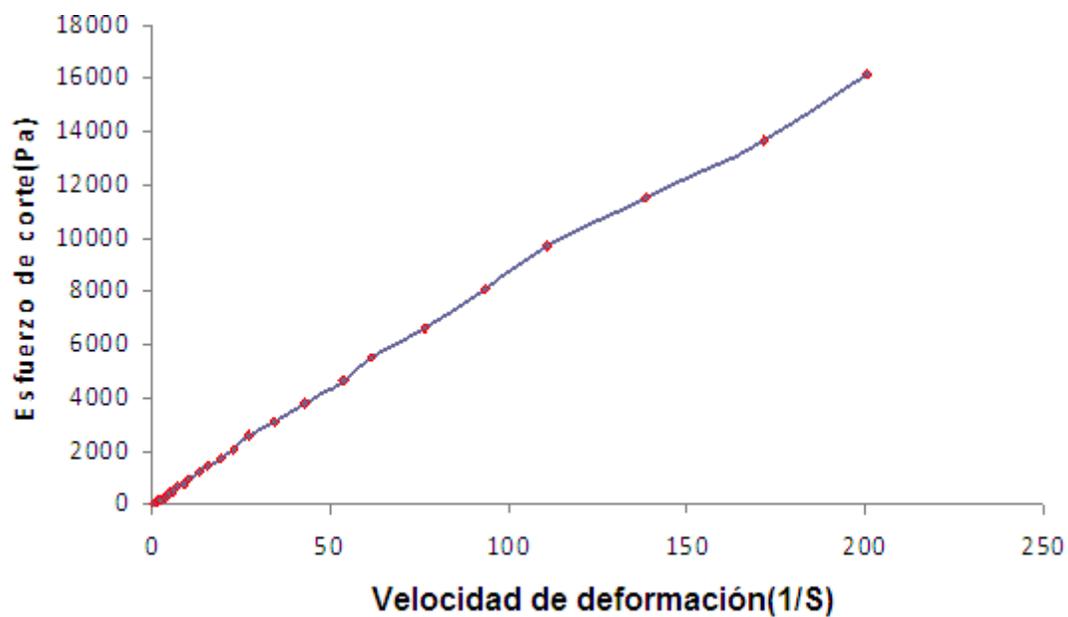
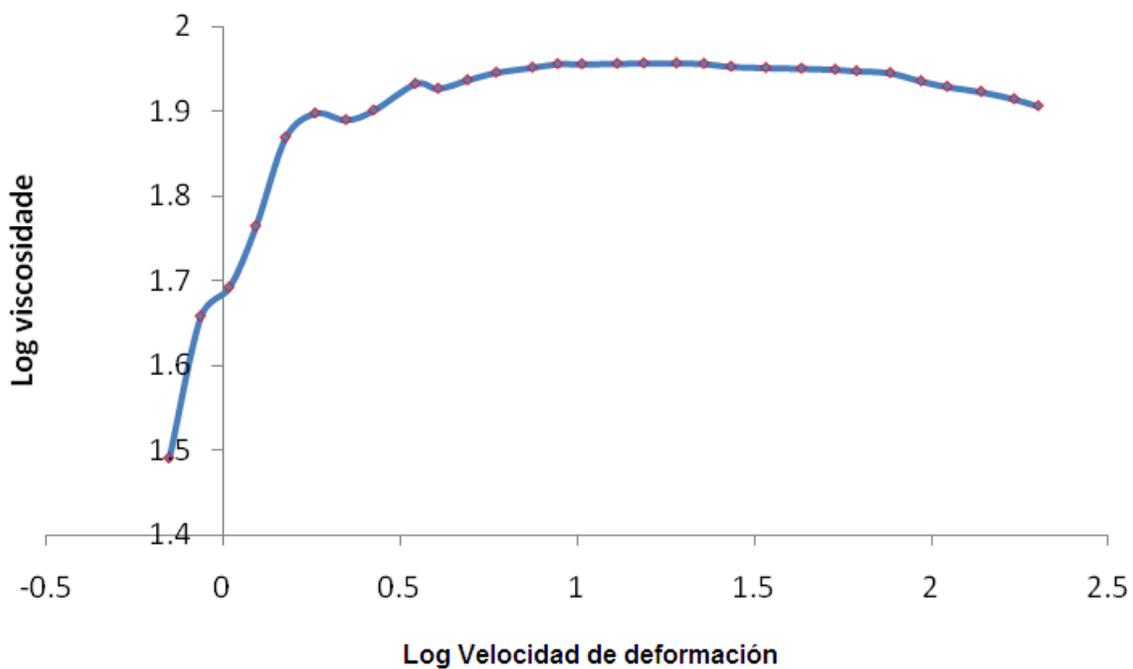


Gráfico 3.3. Curva de flujo para Resina 1**Gráfico 3.4. Reograma de Resina 1 aplicando Ley potencia (ver anexo K).**

En la primera parte del gráfico 3.3 tiene un comportamiento pseudoplástico va incrementándose la viscosidad poco a poco y posteriormente comportamiento newtoniano en donde la viscosidad cambia muy poco.

Se promediaron las tres mediciones para un mejor análisis de resultados y posteriormente se le aplicó logaritmo a la viscosidad y velocidad de deformación de acuerdo a la ley potencia para corroborar el comportamiento de la resina tal como se muestra en el gráfico 3.4. La curva de flujo vuelve a comprobar el comportamiento pseudoplástico y newtoniano ya que no es una línea completamente recta ni curva tal como se muestra en el gráfico 3.3.

3.5.2 Resina 2

Tabla 3.18. Promedio de las mediciones Reológicas obtenidas de la resina 2

Punto de medición	Velocidad de deformación [1/s]	Esfuerzo de corte [Pa]	Viscosidad [Pa·s]	Temperatura [°C]	Log Velocidad de deformación	Log Viscosidad
1	0.69966667	11.8866667	17	25	-0.15510921	1.22370699
2	0.852	10.6666667	12.5666667	24.9666667	-0.0695606	1.098927
3	1.03666667	20.4	19.7333333	24.9666667	0.01563463	1.27809389
4	1.26	32.8666667	26.1333333	24.9666667	0.10037055	1.41017731
5	1.53	57.0333333	37.3333333	24.9666667	0.18469143	1.5705002
6	1.86	76	40.9	24.9666667	0.26951294	1.61170946
7	2.26	98.2666667	43.4666667	24.9666667	0.35410844	1.6380328
8	2.74333333	125.666667	45.8	24.9666667	0.43827794	1.6603402
9	3.37	162.666667	48.3	24.9333333	0.5276299	1.68392793
10	4.05	202.666667	49.9	24.9333333	0.60745502	1.69783898
11	4.92333333	252.333333	51.2	24.9333333	0.69225904	1.70924617
12	5.98333333	312	52.1333333	24.9333333	0.77694306	1.71709091
13	7.36	390	53.0333333	24.9	0.86681339	1.72452083
14	8.84	472.666667	53.4333333	24.9333333	0.94645227	1.72779941
15	10.7	576.333333	53.6666667	24.9333333	1.02938378	1.7296919
16	13.2333333	708	53.5666667	24.9333333	1.12158452	1.7288823
17	15.9	847.666667	53.4666667	24.9333333	1.20139712	1.72807074
18	19.3	1030	53.4666667	24.9333333	1.28555731	1.72805756
19	23.4666667	1256.66667	53.4666667	24.9333333	1.37045053	1.72806774

20	29.0666667	1550	53.3666667	24.9333333	1.46334319	1.72725465
21	34.6	1843.33333	53.2666667	24.9333333	1.5390761	1.72643643
22	42.1	2236.66667	53.2	24.9333333	1.6242821	1.72589575
23	51.1333333	2710	53.0333333	24.9333333	1.70870392	1.7245302
24	62.1333333	3283.33333	52.8	24.9333333	1.79332453	1.72261779
25	75.5333333	3973.33333	52.5666667	24.9666667	1.87813857	1.72069454
26	92.6	4840	52.2666667	24.9666667	1.96657457	1.71820872
27	113	5850	51.9333333	24.9666667	2.05304463	1.71543258
28	135.666667	6986.66667	51.5333333	25	2.13247053	1.71207441
29	165	8400	50.9666667	25	2.21748394	1.70727489
30	200	10023.3333	50.2333333	25.0666667	2.30103	1.70098208

Gráfico 3.5. Reograma de Resina 2

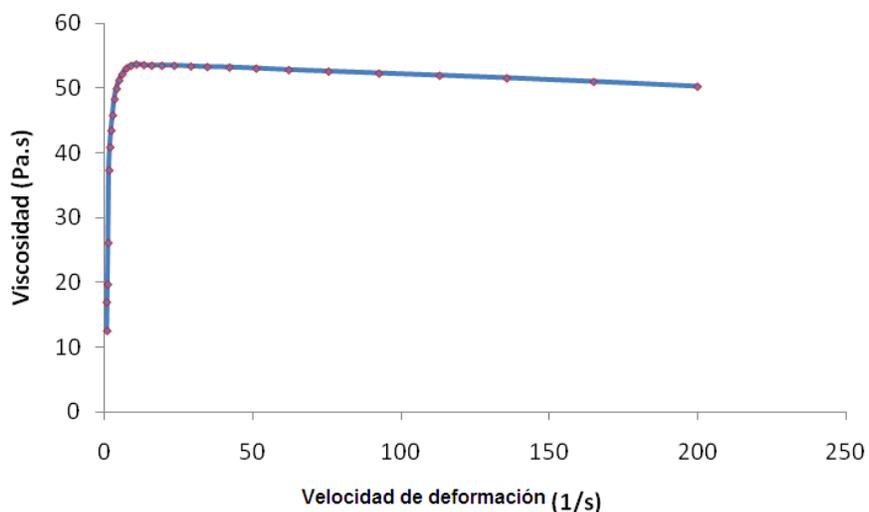


Gráfico 3.6. Curva de flujo para Resina 2

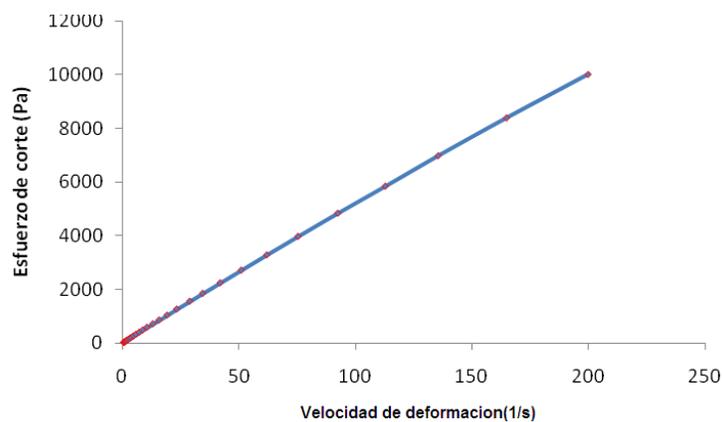
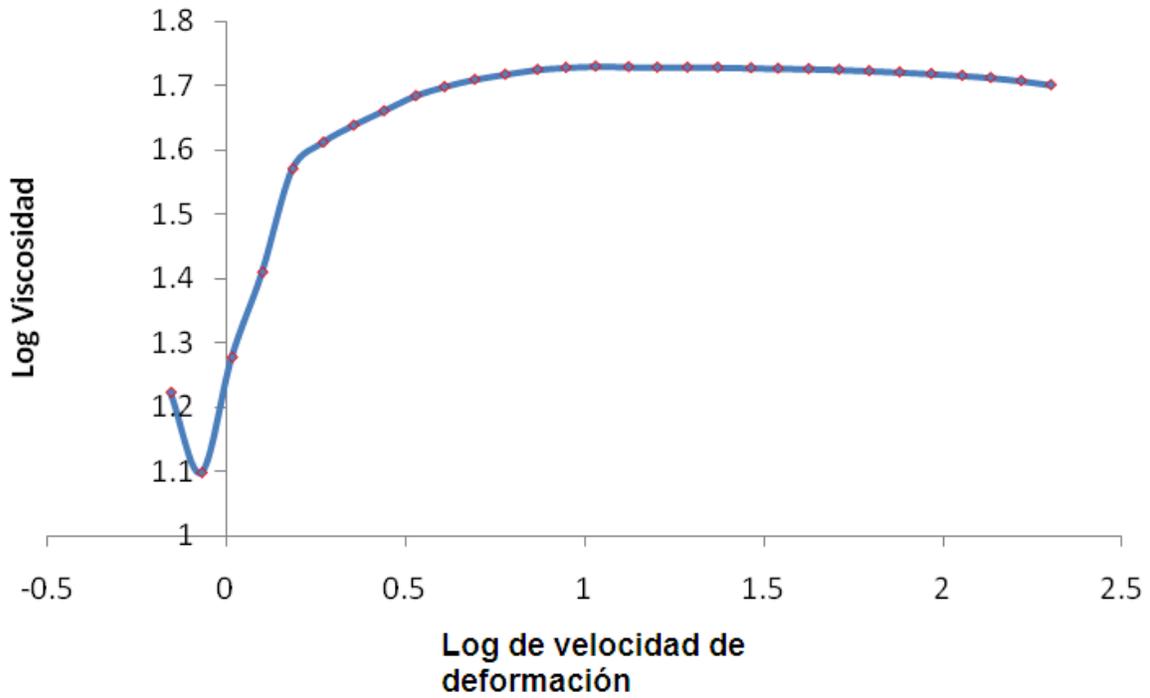


Gráfico 3.7. Reograma de Resina 2 aplicando Ley potencia.

Al igual que en el gráfico anterior muestra un comportamiento muy parecido. En el comportamiento pseudoplástico va incrementándose la viscosidad poco a poco y posteriormente comportamiento newtoniano en donde la viscosidad cambia muy poco.

Se promediaron las tres mediciones para un mejor análisis de resultados y posteriormente se le aplicó logaritmo a la viscosidad y velocidad de deformación de acuerdo a la ley potencia para corroborar el comportamiento de la resina tal como se muestra en el gráfico 3.7. La curva de flujo vuelve a comprobar el comportamiento pseudoplástico y newtoniano ya que no es una línea completamente recta ni curva tal como se muestra en el gráfico 3.6.

3.5.3 Resina 3

Tabla 3.19. Promedio de las mediciones Reológicas obtenidas de la Resina 3

Punto de medición	Velocidad de deformación [1/s]	Esfuerzo de corte [Pa]	Viscosidad [Pa-s]	Temperatura [°C]	Log Velocidad de deformación	Log Viscosidad
1	0.6995	215.766667	308	24.9333333	-0.15521239	1.81495014
2	0.85133333	14.3166667	17	24.9666667	-0.06990053	1.20527486
3	1.03333333	17.3033333	17	24.9666667	0.01423593	1.18330365
4	1.26	30.7166667	24	24.9666667	0.10037055	1.34782666
5	1.53	50.4	33	24.9666667	0.18469143	1.49872266
6	1.86	67.4333333	36	24.9666667	0.26951294	1.55211685
7	2.26666667	91	40	24.9666667	0.35537969	1.59746583
8	2.74333333	115.7	42	24.9833333	0.43827794	1.61889749
9	3.335	145.166667	44	24.9833333	0.52309535	1.63560319
10	4.05166667	180	44	24.9833333	0.60763352	1.6455983
11	4.99833333	225.5	45	24.9833333	0.69872693	1.65244891
12	5.98666667	272.5	46	24.9666667	0.77718474	1.65676691
13	7.30333333	334.666667	46	24.9666667	0.86350557	1.65925461
14	8.63833333	396.833333	46	24.9833333	0.93527386	1.65922344
15	10.1666667	464.5	46	24.9666667	1.00305362	1.65702522
16	13.1666667	600.833333	46	24.9666667	1.11940353	1.65811911
17	16.15	729.833333	45	24.9666667	1.20792248	1.65465644
18	19.3	865.5	45	24.9666667	1.28555731	1.65101195
19	22.7333333	1014	45	24.9666667	1.35558143	1.64767393
20	26.1166667	1154.33333	44	24.9666667	1.41235877	1.64575526
21	32.9333333	1441.66667	44	24.9666667	1.51323388	1.64233955
22	42.85	1868.33333	44	24.9666667	1.63180438	1.63817498
23	50.55	2181.66667	43	24.9666667	1.70303407	1.63483108
24	59.2833333	2531.66667	43	24.9666667	1.76992186	1.63161782
25	73.6333333	3131.66667	43	24.9666667	1.8659189	1.62847668
26	86.9833333	3670	42	24.9666667	1.93521569	1.62522713
27	104.033333	4351.66667	42	24.9833333	2.0078884	1.6215929
28	135.833333	5610	41	25	2.13300472	1.61540043
29	165.833333	6751.66667	41	25.0166667	2.21964477	1.60976234
30	195	7836.66667	40	25.0333333	2.28926648	1.60384252

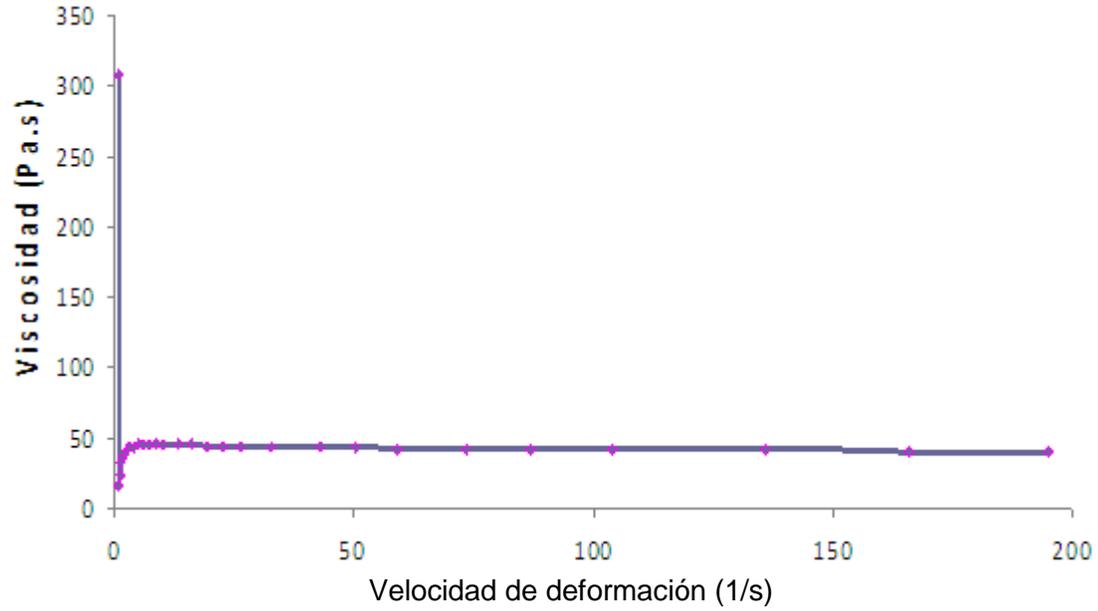
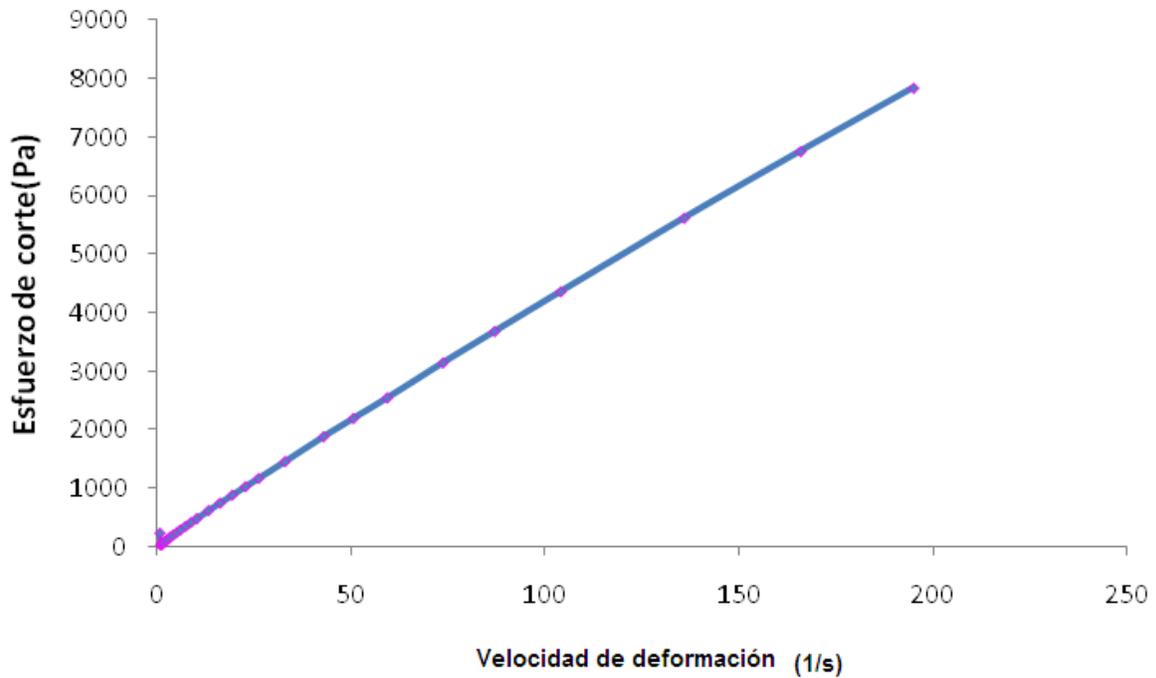
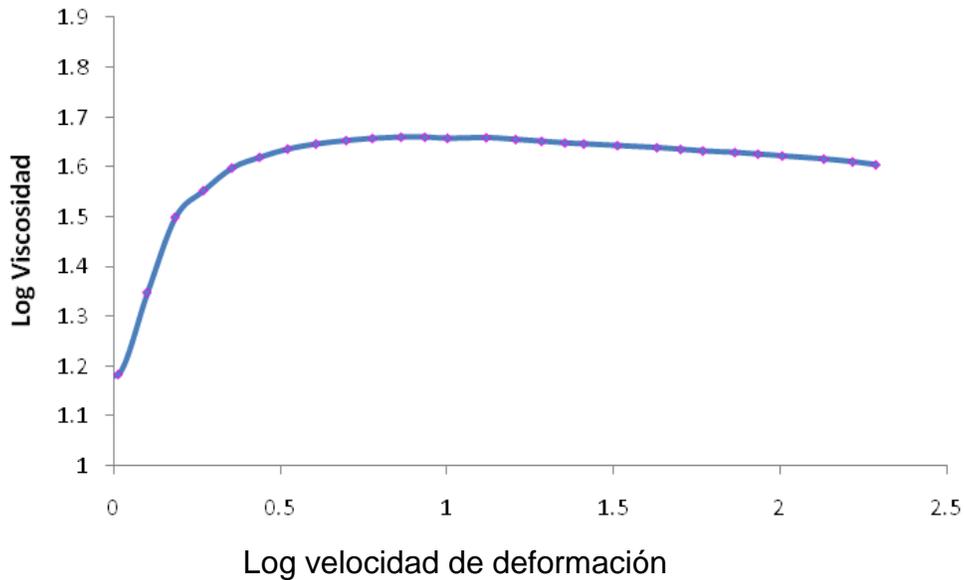
Gráfico 3.8. Reograma de Resina 3**Gráfico 3.9. Curva de flujo para Resina 9**

Gráfico 3.10. Reograma de Resina 3 aplicando Ley potencia.

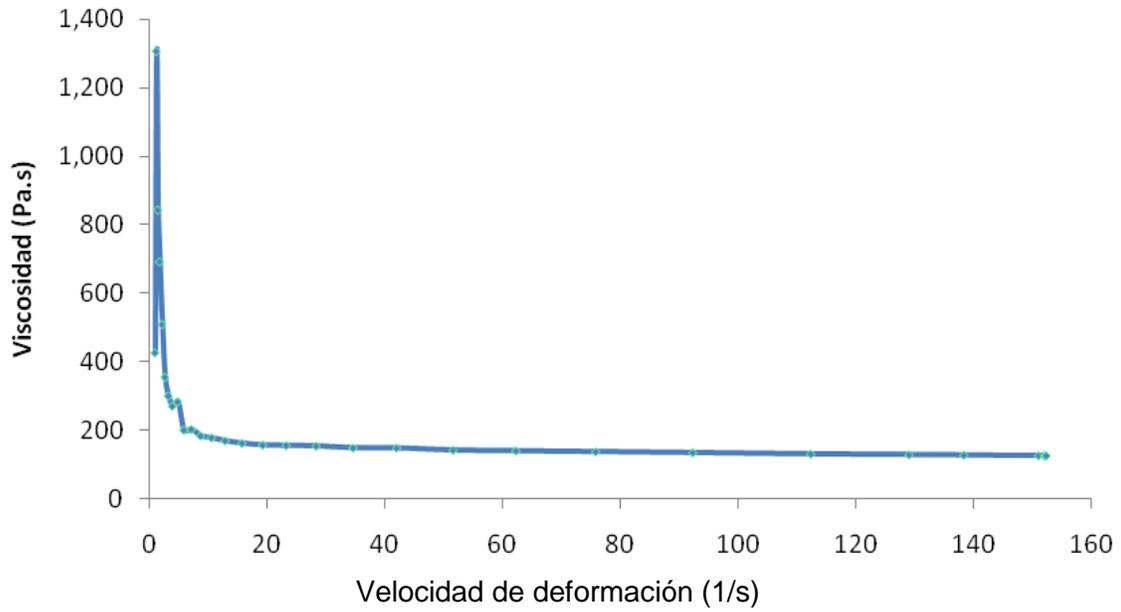
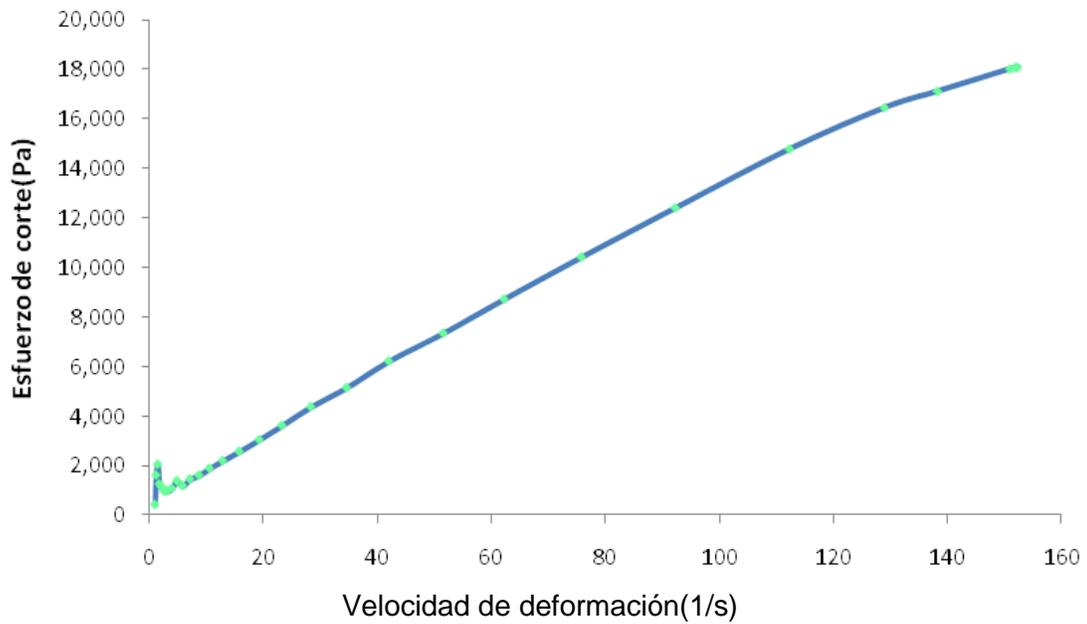
En el gráfico 3.8 se observa un comportamiento pseudoplástico ya que al incrementarse la velocidad de deformación la viscosidad disminuye poco a poco y posteriormente comportamiento completamente newtoniano.

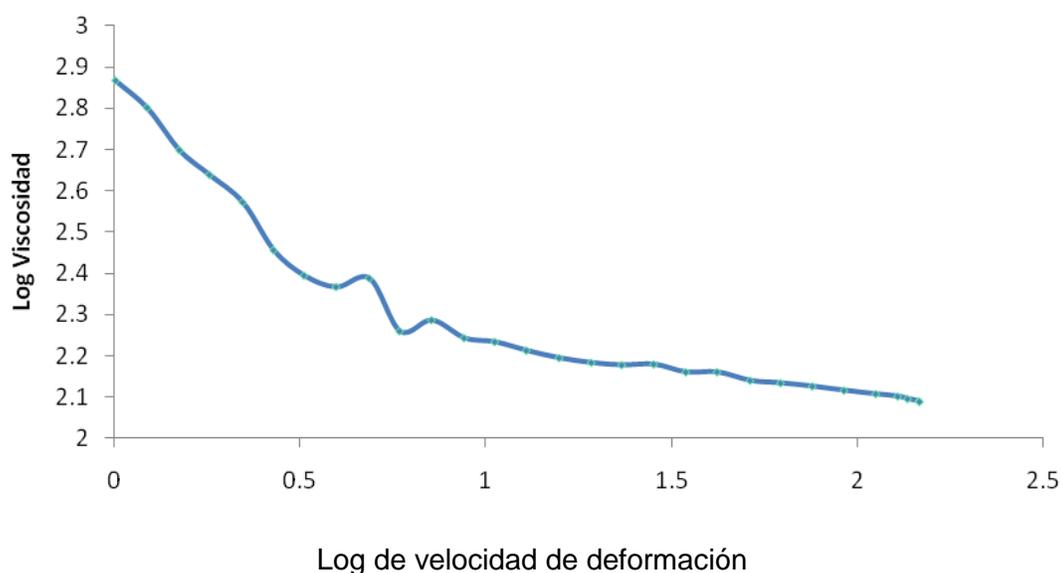
Se promediaron las tres mediciones para un mejor análisis de resultados y posteriormente se le aplicó logaritmo a la viscosidad y velocidad de deformación de acuerdo a la ley potencia para corroborar el comportamiento de la resina tal como se muestra en el gráfico 3.10. La curva de flujo vuelve a comprobar el comportamiento pseudoplástico y newtoniano ya que no es una línea completamente recta ni curva tal como se muestra en el gráfico 3.9.

3.5.4 Resina 4

Tabla 3.20. Promedio de las mediciones Reológicas obtenidas de la Resina 4

Punto de medición	Velocidad de deformación [1/s]	Esfuerzo de corte [Pa]	Viscosidad [Pa-s]	Temperatura [°C]	Log Velocidad de deformación	Log Viscosidad
1	1.01233333	426	427	25	0.00522396	2.86597496
2	1.23	1,611	1,308	25	0.08989554	2.80024177
3	1.50333333	2,047	844	24.9666667	0.17690122	2.69748727
4	1.81	1,254	693	24.9666667	0.25767857	2.63798873
5	2.22333333	1,137	510	24.9666667	0.34697446	2.57142103
6	2.69333333	957	355	24.9666667	0.4302795	2.45525808
7	3.25333333	978	301	24.9666667	0.51232811	2.39384196
8	3.96666667	1,077	271	24.9666667	0.5984254	2.36623903
9	4.87	1,385	284	24.9666667	0.68750524	2.38712122
10	5.88	1,185	201	24.9666667	0.76937691	2.25901471
11	7.16333333	1,457	203	24.9666667	0.8551145	2.28597914
12	8.76666667	1,610	184	24.9666667	0.9428299	2.24268493
13	10.6	1,890	178	24.9666667	1.02530587	2.2334106
14	12.9	2,197	170	24.9666667	1.11058971	2.21232088
15	15.8	2,570	162	24.9666667	1.19863976	2.19436814
16	19.3	3,047	157	24.9666667	1.28551099	2.18284888
17	23.3	3,623	156	24.9666667	1.36735592	2.17730433
18	28.3666667	4,377	154	24.9666667	1.45280591	2.17907148
19	34.6333333	5,153	149	24.9666667	1.53948787	2.16011118
20	42.0333333	6,220	148	24.9666667	1.62359356	2.16021537
21	51.6	7,353	142	24.9666667	1.71262374	2.13953363
22	62.3	8,730	140	24.9666667	1.79448805	2.13359409
23	75.8333333	10,427	138	25	1.87986006	2.12569586
24	92.3	12,420	135	25.0666667	1.96520153	2.11568204
25	112.333333	14,800	131	25.0666667	2.05050483	2.10708905
26	129	16,467	129	25.1333333	2.10941908	2.10137505
27	138.333333	17,133	128	25.1666667	2.13642046	2.09533054
28	151	18,033	126	25.2	2.16665066	2.08945176
29	152	18,100	126	25.2666667	2.16877439	2.08846696
30	152.333333	18,100	126	25.3	2.16947543	#¡NUM!

Gráfico 3.11. Reograma de Resina 4**Gráfico 3.12. Curva de flujo para Resina 4****Gráfico 3.13. Reograma de Resina 4 aplicando Ley potencia.**



En el gráfico 3.11 y 3.12 se observa claramente comportamiento pseudoplástico y al aplicar la ley potencia se confirma nuevamente.

3.5.5 Resina 5

Tabla 3.21. Promedio de las mediciones Reológicas obtenidas de la Resina 5

Punto de medición	Velocidad de deformación [1/s]	Esfuerzo de corte [Pa]	Viscosidad [Pa-s]	Temperatura [°C]	Log Velocidad de deformación	Log Viscosidad
1	0.99975	13,137	13,137	25	-0.00010863	3
2	1.22	11,828	9,708	24.975	0.08635983	4
3	1.4825	2,613	1,760	24.975	0.17099285	3
4	1.805	956	530	24.975	0.25647554	2
5	2.2075	204	93	24.975	0.34389323	1
6	2.675	290	109	24.975	0.42732303	1
7	3.26	9	3	24.975	0.5132176	0
8	3.9725	19	5	24.975	0.59906365	1
9	4.885	21	4	24.975	0.68883526	1
10	5.875	31	5	24.975	0.76900771	1
11	7.1525	48	7	24.975	0.85445779	1
12	8.7575	60	7	24.975	0.94236097	1
13	10.725	73	7	24.975	1.03031014	1
14	13.025	92	7	24.95	1.11471848	1

15	15.725	110	7	24.95	1.19658901	1
16	19.175	133	7	24.95	1.28272546	1
17	23.3	160	7	24.95	1.36735592	1
18	28.35	195	7	24.95	1.45255239	1
19	34.875	237	7	24.95	1.54243995	1
20	42	284	7	24.95	1.62324929	1
21	51.15	341	7	24.95	1.70884543	1
22	63	413	7	24.95	1.79929841	1
23	77.05	500	6	24.95	1.88670082	1
24	92.275	590	6	24.95	1.96508401	1
25	112.25	713	6	24.95	2.05018313	1
26	137.5	860	6	24.95	2.13829413	1
27	166.5	1,029	6	24.925	2.22141228	1
28	202.75	1,235	6	24.95	2.30695987	1
29	246.75	1,485	6	24.95	2.39225649	1
30	300	1,780	6	24.95	2.47712125	1

Gráfico 3.14. Reograma de Resina 5

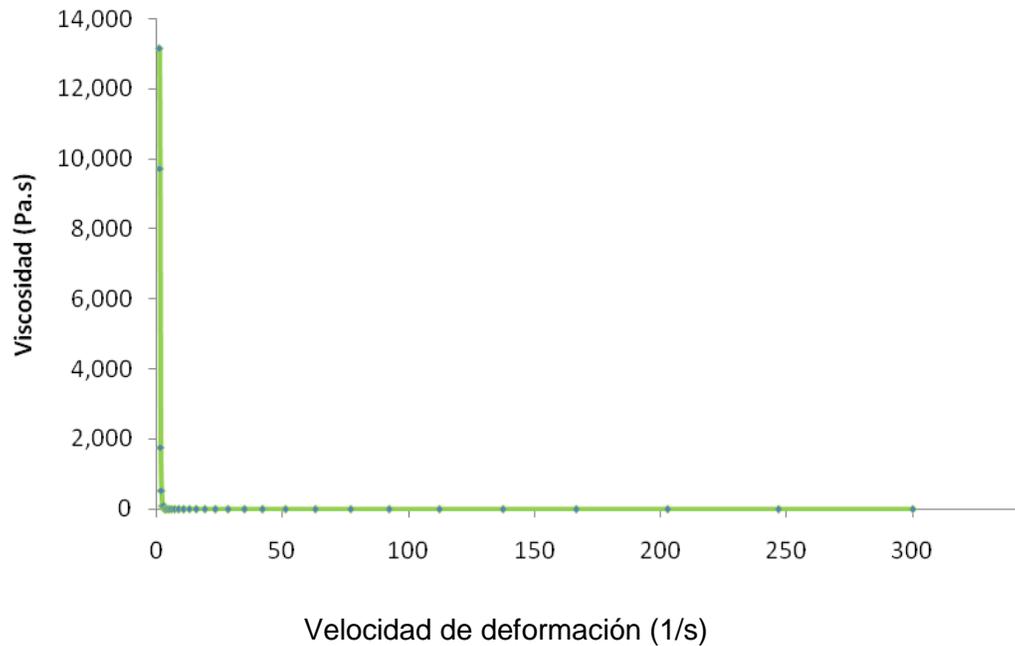


Gráfico 3.15. Curva de flujo para Resina 5

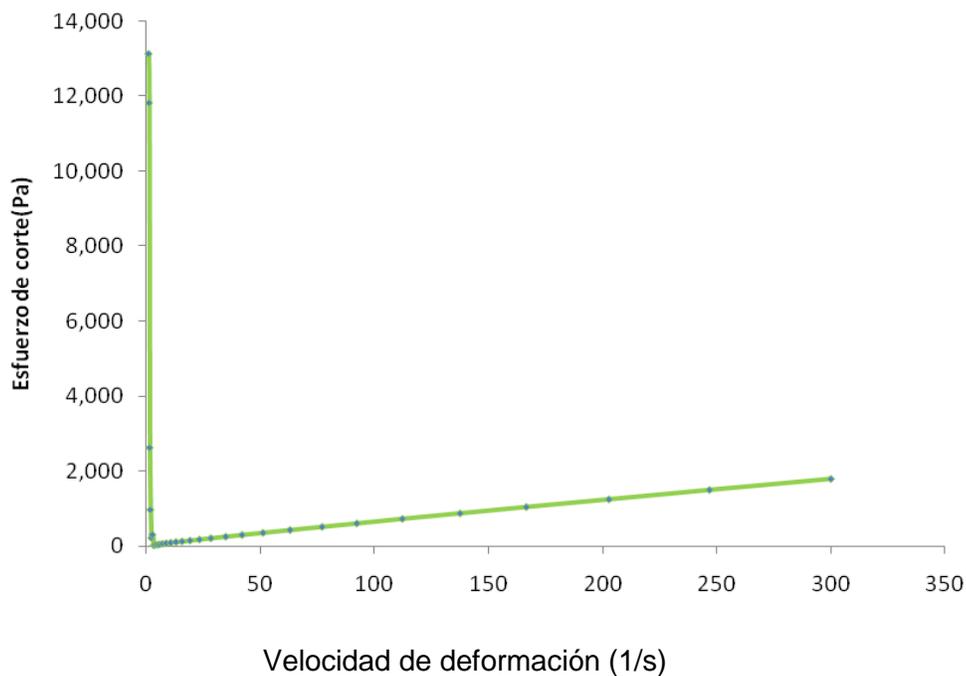
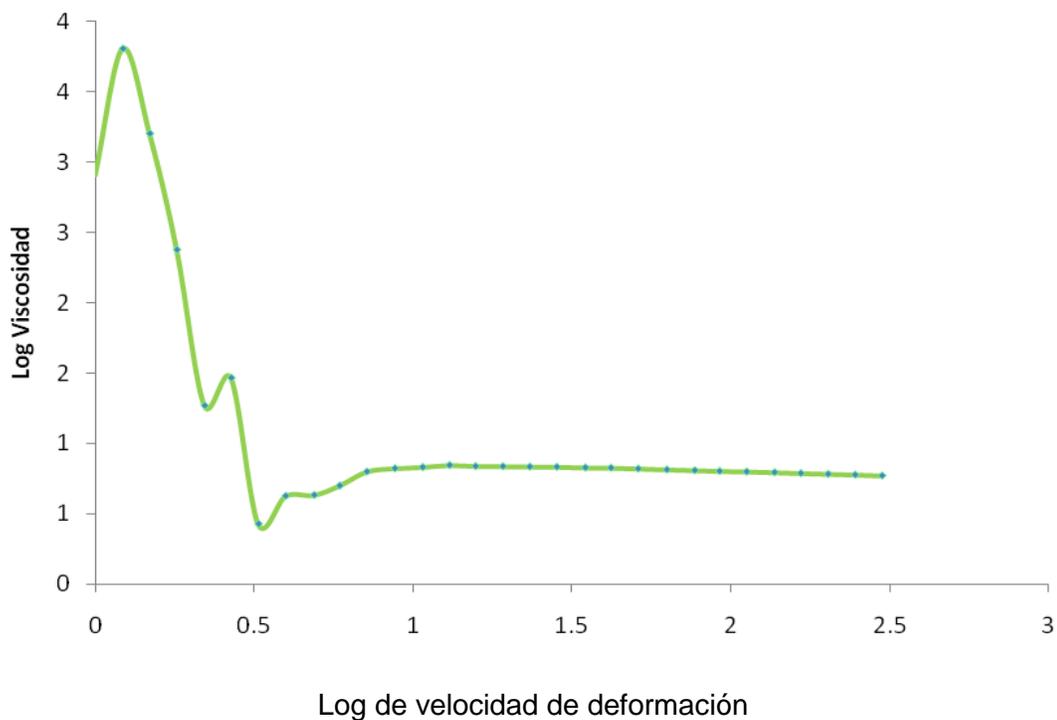


Gráfico 3.16. Reograma de Resina 5 aplicando Ley potencia.



En la primera parte del reograma del gráfico 3.14 muestra un comportamiento pseudoplástico va incrementándose la viscosidad poco a poco y posteriormente comportamiento newtoniano en donde la viscosidad se mantiene constante.

Se promediaron las tres mediciones para un mejor análisis de resultados y posteriormente se le aplicó logaritmo a la viscosidad y velocidad de deformación de acuerdo a la ley potencia para corroborar el comportamiento de la resina tal como se muestra en el gráfico 3.13. La curva de flujo vuelve a comprobar el comportamiento pseudoplástico y newtoniano ya que no es una línea completamente recta ni curva tal como se muestra en el gráfico 3.12.

3.5.6 Resina 6

Tabla 3.22. Promedio de las mediciones Reológicas obtenidas de la Resina 6

Punto de medición	Velocidad de deformación [1/s]	Esfuerzo de corte [Pa]	Viscosidad [Pa·s]	Temperatura [°C]	Log Velocidad de deformación	Log Viscosidad
1	1	834.5	834.5	24.95	0	2.92134143
2	1.22	1010	829	24.95	0.08635983	2.91847363
3	1.48	1205	815	24.95	0.17026172	2.91111805
4	1.805	1435	797.5	24.95	0.25647554	2.90166846
5	2.2	1720	781.5	24.95	0.34242268	2.89286417
6	2.675	2065	770.5	24.95	0.42732303	2.88668475
7	3.26	2490	764	24.95	0.5132176	2.88292924
8	3.96	3015	761	24.95	0.59769519	2.88126314
9	4.885	3700	757.5	24.95	0.68886434	2.87933258
10	5.87	4365	743.5	24.95	0.7686381	2.87116064
11	7.155	5340	747	24.9	0.85460953	2.8732957
12	8.715	6405	735	24.9	0.94026675	2.86624714
13	10.6	7755	732	24.9	1.02530587	2.8645046
14	12.9	9300	721	24.9	1.11058971	2.85793151
15	15.7	11200	712.5	24.9	1.19589965	2.85278391
16	19.35	13600	702	24.9	1.28667952	2.84633711
17	23.3	16050	690.5	24.9	1.36735592	2.83916266
18	26.6	18100	681	24.9	1.42487857	2.83314524
19	26.85	18100	675.5	24.95	1.42894354	2.82962428
20	26.95	18100	672.5	25	1.43055204	2.82768641
21	27.05	18100	670.5	25	1.43216059	2.82639287
22	27.1	18100	668.5	25	1.43296633	2.82509837
23	27.15	18100	667.5	25	1.43376321	2.8244453
24	27.15	18100	667	25	1.43376321	2.82412144

25	27.2	18100	667	25	1.43456597	2.82412144
26	27.15	18100	667	25	1.43376321	2.82411802
27	27.15	18100	667	25	1.43376321	2.82412144
28	27.15	18100	667	25	1.4337691	2.82412388
29	27.15	18100	667.5	25	1.43376321	2.8244453
30	27.15	18100	668	25	1.43376321	2.82476868

Gráfico 3.17. Reograma de Resina 6

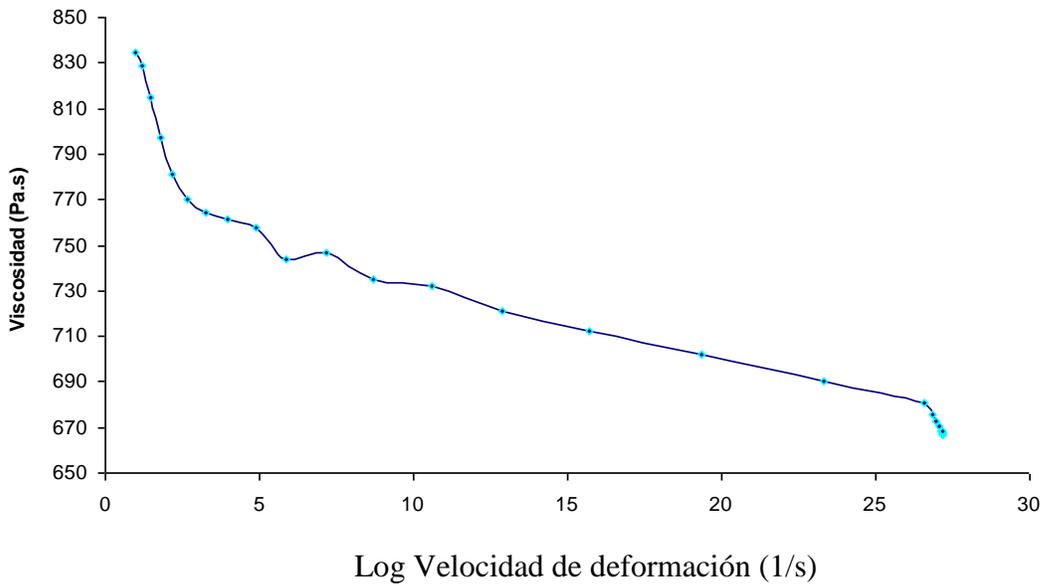


Gráfico 3.18. Curva de flujo para Resina 5

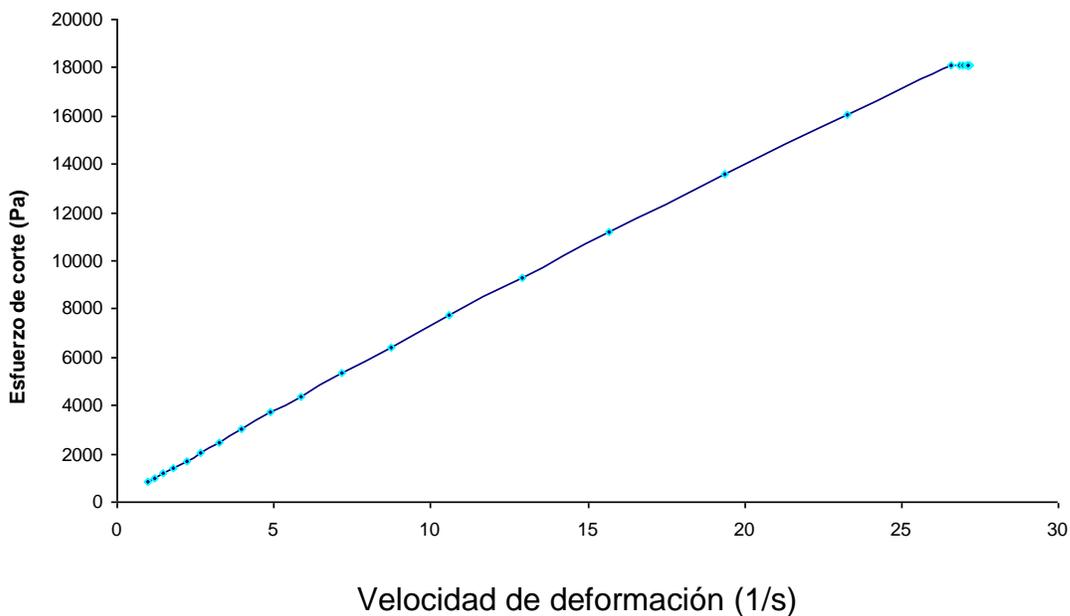
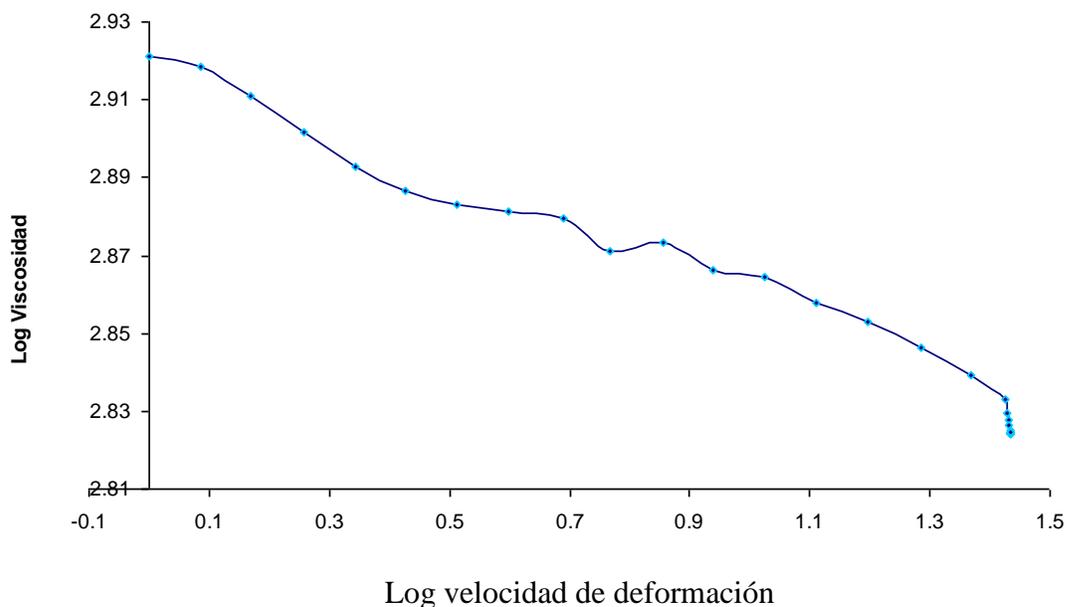


Gráfico 3.19. Reograma de Resina 6 aplicando Ley potencia.

En el gráfico 3.18 y 3.19 se observa claramente comportamiento pseudoplástico y al aplicar la ley potencia se confirma nuevamente.

En la Tabla 3.23 se muestra un resumen de las distintas resinas obtenidas y el tipo de fluido obtenido de acuerdo con los análisis reológicos.

Tabla 3.23. Viscosidades finales de las Resinas obtenidas.

Nº Resina	Viscosidad final promedio	Color	Tipo de fluido
1	80.73	Miel	Pseudoplástico/newtoniano
2	50.23	Amarillo verdoso	Pseudoplástico/newtoniano
3	40	Ámbar	Pseudoplástico/newtoniano
4	26	Miel claro	Pseudoplástico
5	6	Miel	Pseudoplástico/newtoniano
6	600	Ámbar	Pseudoplástico



Elaboración del concreto polimérico

*"El mundo exige resultados.
No le cuentes a otros tus dolores del parto.
Muéstrale al niño."
Indira Gandhi (1917-1984).*

Una vez fraguado y desmoldado el concreto polimérico fue necesario lijar la superficie de los extremos de las probetas. Como se muestra en la Figura 3.24.

Figura 3.2. Probetas de concreto polimérico sin lijar.



Debido a que las probetas de concreto polimérico no tenían una superficie completamente plana por lo que fue necesario lijarlas en una máquina rectificadora. Para que las probetas tocaran uniformemente los cabezales y la base de una la máquina Universal Tinius Olsen, ya que si no es así la presión ejercida por máquina no es distribuida uniformemente en toda la probeta provocando un mal resultado.

En la Tabla 3.25 se muestran imágenes del concreto polimérico obtenido y el montaje experimental empleado.

Figura 3.3. Imágenes de la elaboración del concreto polimérico



La resistencia de un concreto común está regida por la relación agua/cemento en este caso para el concreto polimérico la relación es resina/arena-grava (agregado fino-agregado grueso). La homogeneidad es un factor importante el cual está influida por la variabilidad de la arena y grava a utilizar.

Resultados y Análisis de resultados:

El poliéster de tereftalato cuando es expuesto con los glicoles se creó un sistema más uniforme, provocando una matriz de estructura uniforme en el

entrecruzamiento, para dar un mayor grado de resistencia, rigidez y dureza al concreto polimérico final.

El poliéster no saturado fue diluido con estireno para reducir la viscosidad y permitir el avance del curado del polímero, participando en el entrecruzamiento de la cadena de reacción de polimerización, dando una adecuada incorporación de los radicales libres de los catalizadores.

La adición del anhídrido maleico se destino para la producción de los dobles enlaces de la resina de lo cual dependió para la resistencia de las diferentes probetas elaboradas.

Los propósitos de las pruebas de resistencia del concreto son para determinar el cumplimiento de una especificación de resistencia y por esto se juzga la calidad del concreto.

La reacción anterior se repite una y otra vez, las cadenas moleculares generan la formación de la matriz polimérica

Tabla 3.24 % de Composición de las probetas de Concreto Polimérico.

Nº de Probeta	% Resina	% Agregado fino	% Agregado grueso	% Estireno	Resistencia	Nº de Resina utilizada
1	5	40	40	15	39.6	1
2	6	35	44	15	51.9	2
3	10	32	45	13	91.11	4
4	8	36	42	14	70.14	4
5	10	32	45	13	94.15	4
6	8	38	40	14	15.27	3
7	10	32	45	13	98.71	4
8	9	29	48	14	67.64	3

9	10	32	45	13	237.55	6
10	10	32	45	13	161.41	5
11	10	32	45	13	168.41	6

Figura 3.4. Imágenes de la elaboración del concreto polimérico





Colocación de la probeta de concreto polimérico en la máquina universal Tinius Olsen la cual debe estar en el centro para una excelente medición de la fuerza de compresión.

La deformación unitaria fue determinada de la siguiente manera:

$$\text{Deformación unitaria} = \frac{\text{deformación}}{\text{Área}}$$

El esfuerzo se determino con la siguiente formula:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{carga (Kg)}}{\text{Área (cm}^2\text{)}}$$

Para la conversión de unidades

$$\text{Esfuerzo} \times 14.22 = \text{psi}$$

$$\text{Esfuerzo} \times 0.0980665 = \text{MPa}$$

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las pruebas mecánicas para cada una de las probetas, el tipo de fractura fue determinado de acuerdo a las especificaciones de la ASTM (Ver anexo L)

3.6.1 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 1

Tabla 3.25. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta

1

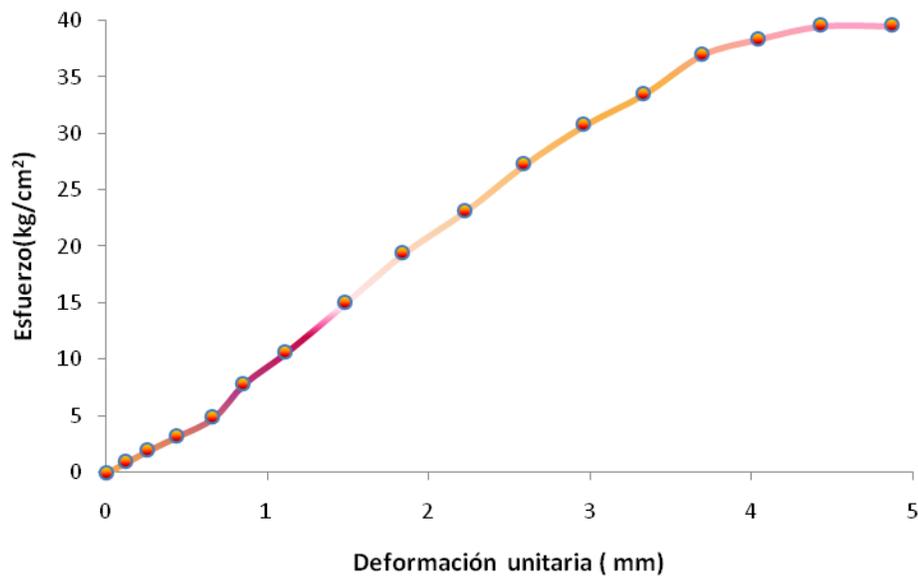
Número de identificación	1.	
Diámetro del cilindro (cm)	5.243	
Altura (cm)	9.10	
Área	21.5923	
Carga (kg)	855	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	39.60	
Fuerza de compresión (psi)	563.07	
Fuerza de compresión (MPa)	3.883	
Tipo de fractura	cortado	
Edad de la muestra(días)	28	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.26 Resultados de pruebas mecánicas para probeta 1

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformación unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
20	20	0.12	0.01318681	0.92635912
40	43	0.26	0.02857143	1.99167212
60	70	0.44	0.04835165	3.24225693
80	105	0.66	0.07252747	4.8633854
120	170	0.85	0.09340659	7.87405255
140	230	1.11	0.12197802	10.6531299

160	325	1.48	0.16263736	15.0533358
180	420	1.84	0.2021978	19.4535416
200	500	2.22	0.24395604	23.1589781
220	590	2.59	0.28461538	27.3275942
240	665	2.96	0.32527473	30.8014409
260	725	3.33	0.36593407	33.5805182
280	800	3.69	0.40549451	37.054365
300	830	4.04	0.44395604	38.4439036
320	855	4.43	0.48681319	39.6018525
340	855	4.87	0.53516484	39.6018525

Gráfico 3.20. Esfuerzo/deformación probeta 1



Al inicio de la curva, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria, se encuentra en la región elástica. La probeta se deforma hasta un máximo de 855 kg, hasta llegar a l punto de rotura. Mostrado un tipo de fractura cortado. La resistencia para cada probeta también dependió del tiempo de fraguado que se le dio a cada una, dando menor resistencia a las probetas con menores días de fraguado.

Figura 3.5. Pruebas mecánicas

La probeta presento un esfuerzo máximo a la compresión de 39.60 kg/cm^2 debido a que la resina le falto tiempo de reacción presentando baja elasticidad. Tiene un tipo de fractura cortado, el tipo de agregado grueso influyo demasiado en el tipo de

fractura debido a la forma ya que es cortante no le permitió adherirse correctamente al conglomerado de concreto. Para concreto el agregado grueso debe ser de tipo esférico y no cortante. Este tipo de agregado fue utilizado en las probetas de 1 a la 6, un factor muy importante el cual influyo para que se obtuviera un bajo esfuerzo a la compresión sobre las probetas de concreto polimérico. En estas mismas muestras los gráficos obtenidos de los datos deformación unitaria vs esfuerzo de compresión es bajo debido a las razones expuestas anteriormente.

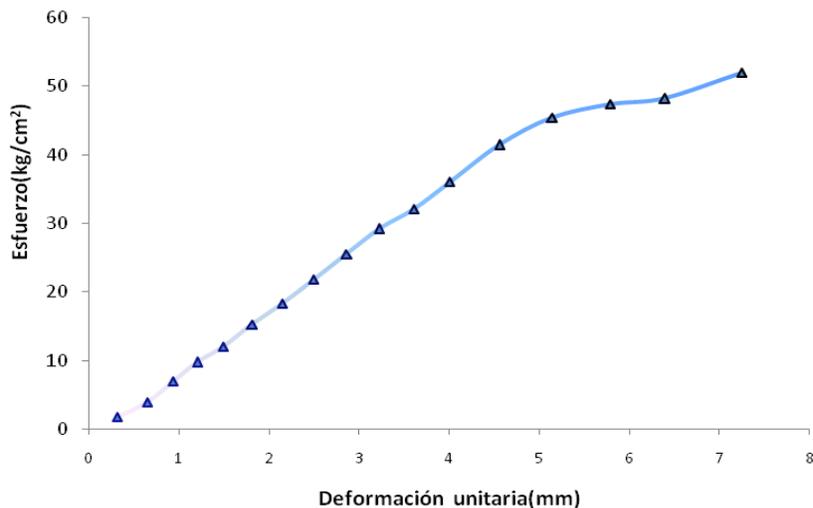
3.6.2 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 2

Tabla 3.27. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 2

	2	
Número de muestra		
Diámetro del cilindro	5.403	
Altura	9.29	
Área	22.930	
Carga (kg)	1190	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	51.897	
Fuerza de compresión (psi)	737.97	
Fuerza de compresión (MPa)	5.089	
Tipo de fractura	cortado	
Edad de la muestra (días)	36	
Defectos de la muestra	Se fracturo la probeta al intentar sacarla del molde	

Tabla 3.28. Resultados de pruebas mecánicas para probeta 2

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformacion unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
30	40	0.32	0.013956906	1.74461322
60	90	0.65	0.028349965	3.92537975
80	160	0.94	0.040998411	6.97845288
100	225	1.21	0.05277455	9.81344937
120	275	1.49	0.064986842	11.9942159
140	350	1.81	0.078943748	15.2653657
160	420	2.15	0.093772961	18.3184388
180	500	2.5	0.109038326	21.8076653
200	585	2.86	0.124739845	25.5149684
220	670	3.23	0.140877518	29.2222715
240	735	3.61	0.157451343	32.0572679
260	825	4.01	0.174897475	35.9826477
280	950	4.56	0.198885907	41.434564
300	1040	5.14	0.224182799	45.3599437
320	1085	5.79	0.252532764	47.3226336
340	1105	6.39	0.278701962	48.1949402
360	1190	7.25	0.316211146	51.9022433

Gráfico 3.21. Esfuerzo/deformación probeta 2

Durante la primera parte de la curva, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria, encontrándose en la región elástica. La línea recta termina hasta soportar 825 kg en donde es su límite elástico. La muestra se deforma hasta un máximo de 1190 kg, hasta llegar a al punto de rotura. Mostrado un tipo de fractura cortado.

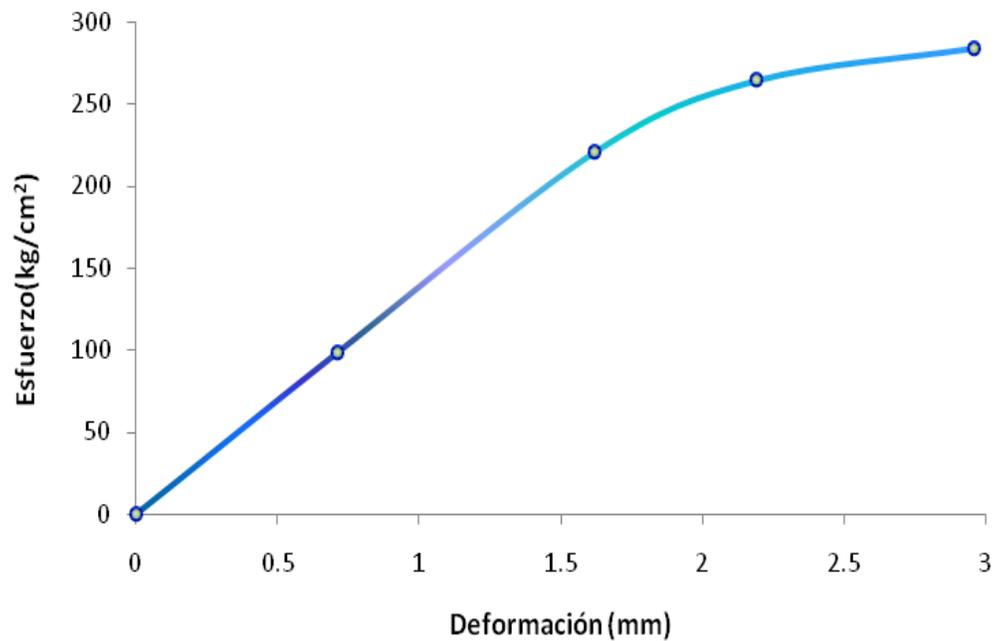
3.6.3 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 3

Tabla 3.29. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 3

Número de muestra	3	
Diámetro del cilindro	2.243	
Altura	4.36	
Área	3.95	
Carga (kg)	360	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	91.11	
Fuerza de compresión (psi)	1295.58	
Fuerza de compresión (MPa)	8.93	
Tipo de fractura	cortado	
Edad de la muestra (días)	28	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.30. Resultados de pruebas mecánicas para probeta 3

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformacion unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
20	125	0.71	0.16284404	98.6760313
40	280	1.62	0.37155963	221.03431
60	335	2.19	0.50229358	264.451764
80	360	2.96	0.67889908	284.18697

Gráfico 3.22. Esfuerzo/deformación probeta 3

El límite elástico termina en 1.62 Kg/cm² el esfuerzo proporcional a la deformación unitaria, y posteriormente rápidamente llega al punto de rotura.

Figura 3.6.



Medición de prueba mecánica en la Máquina Tinius Olsen para la probeta 2

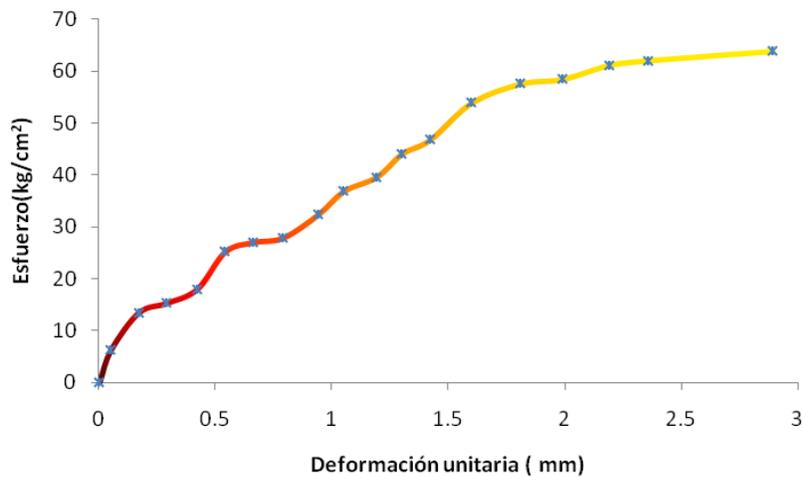
3.6.4 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 4

Tabla 3.31. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 4

Número de muestra	4.	
Diámetro del cilindro	1.19	
Altura	2.55	
Área	1.112	
Carga (kg)	78	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	70.143	
Fuerza de compresión (psi)	997.39	
Fuerza de compresión (MPa)	6.87	
Tipo de fractura	PANDEO	
Edad de la muestra (días)	24	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.32. Resultados de pruebas mecánicas para probeta 4

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformacion unitaria	Esfuerzo
0	0	0		0
20	7	0.05	0.019607843	6.29380409
40	15	0.17	0.066666667	13.486723
60	17	0.29	0.11372549	15.2849528
80	20	0.42	0.164705882	17.9822974
120	28	0.54	0.211764706	25.1752164
140	30	0.66	0.258823529	26.9734461
160	31	0.79	0.309803922	27.872561
180	36	0.94	0.368627451	32.3681353
200	41	1.05	0.411764706	36.8637097
220	44	1.19	0.466666667	39.5610543
240	49	1.3	0.509803922	44.0566286
260	52	1.42	0.556862745	46.7539732
280	60	1.6	0.62745098	53.9468922
300	64	1.81	0.709803922	57.5433517
320	65	1.99	0.780392157	58.4424665
340	68	2.19	0.858823529	61.1398112
360	69	2.36	0.925490196	62.038926
380	71	2.89	1.133333333	63.8371558

Gráfico 3.23. Esfuerzo/deformación probeta 4

La probeta presento pandeo por la inestabilidad elástica que provoca la deformación lateral del eje comprimido al producirse una determinada desproporción entre la fuerza de compresión y la esbeltez de la probeta, alcanzando un esfuerzo máximo de $70.143(\text{kg}/\text{cm}^2)$

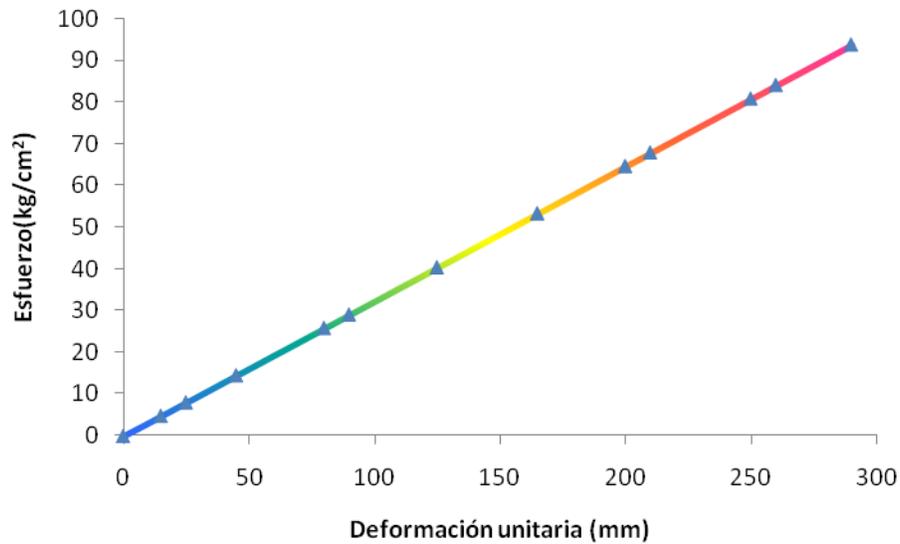
3.6.5 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 5

Tabla 3.33 Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 5

Número de muestra	5	
Diámetro del cilindro	1.983	
Altura	3.94	
Área	3.0893	
Carga (kg)	290	
Esfuerzo máximo(kg/cm^2)	94.15	
Fuerza de compresión (psi)	1338.89	
Fuerza de compresión (MPa)	9.233	
Tipo de fractura	Cono y grieta	
Edad de la muestra (días)	24	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.34. Resultados de pruebas mecánicas para probeta 5

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformacion unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
20	15	0.14	0.03553299	4.85685272
40	25	0.31	0.0786802	8.09475453
60	45	0.5	0.12690355	14.5705581
80	80	0.69	0.1751269	25.9032145
100	90	0.89	0.22588832	29.1411163
120	125	1.14	0.2893401	40.4737726
140	165	1.37	0.34771574	53.4253799
160	200	1.62	0.41116751	64.7580362
180	210	1.87	0.47461929	67.995938
200	250	2.2	0.55837563	80.9475453
220	260	2.58	0.65482234	84.1854471
240	290	3.21	0.81472081	93.8991525

Gráfico 3.24. Esfuerzo/deformación probeta 5

En el gráfico 3.24 se muestra comportamiento completamente elástico hasta llegar al límite elástico soportando una carga de 94.15 kg en una área de la probeta de 3.0893 cm^2 , con un tipo de fractura de cono y grieta.

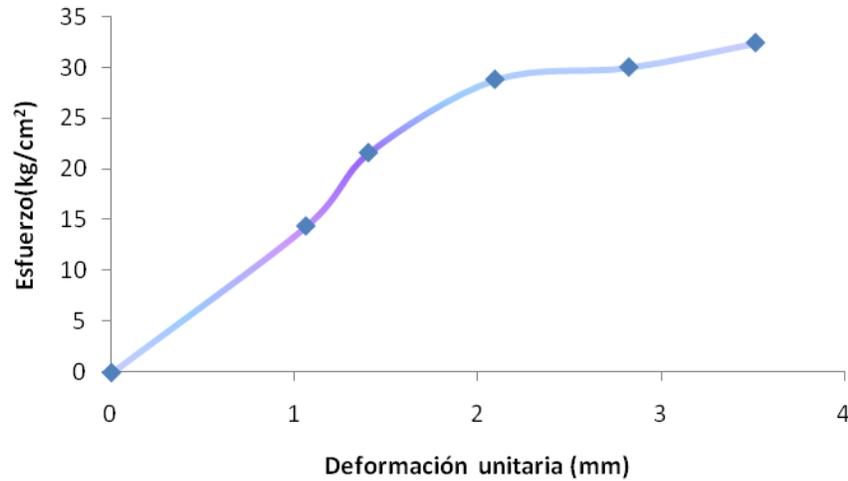
3.6.6 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 6

Tabla 3.35. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 6

Número de muestra	6	
Diámetro del cilindro	1.10	
Altura	1.34	
Área	1.3097	
Carga (kg)	20	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	15.270	
Fuerza de compresión (psi)	284.4	
Fuerza de compresión (MPa)	1.9613	
Tipo de fractura	cortado	
Edad de la muestra (días)	30	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.36 Resultados de pruebas mecánicas para probeta 6

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformacion unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
20	12	1.06	0.79104478	14.401771
40	18	1.4	1.04477612	21.6026564
60	24	2.09	1.55970149	28.8035419
80	25	2.82	2.10447761	30.0036895
120	27	3.51	2.61940299	32.4039847

Gráfico 3.25. Esfuerzo/deformación probeta 6

En la primera parte del gráfico 3.25, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria, encontrándose en la región elástica. La línea recta termina solo soportando 12 kg en donde es su límite elástico. La muestra se deforma hasta un máximo de 20 kg, hasta llegar a al punto de rotura. Mostrado un tipo de fractura cortado

Figura 3.7. Probetas de concreto polimérico con las pruebas mecánicas ya realizadas

Probetas de concreto polimérico con las pruebas mecánicas ya realizadas en donde se muestra el tipo de fractura es cortado y en las demás no se llegó hasta que se cortara completamente.



3.6.7 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 7

Tabla 3.37. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 7

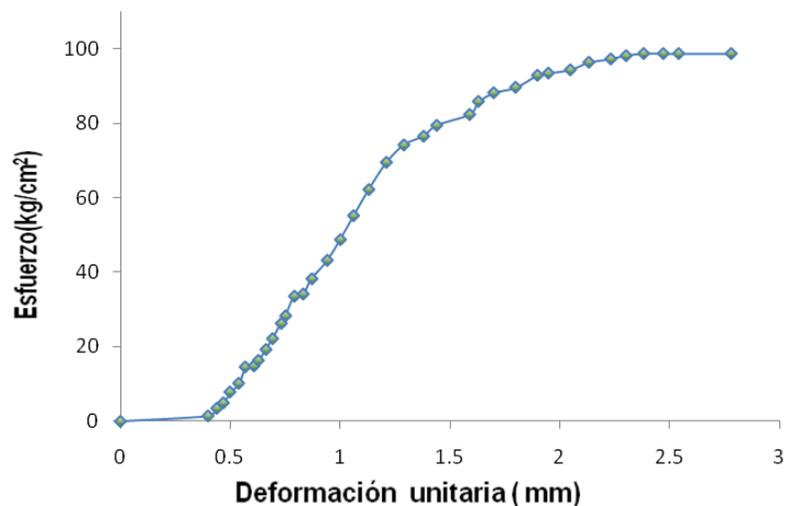
Número de muestra	7	
Diámetro del cilindro(cm)	1.173	
Altura(cm)	2.626	
Área(cm ²)	1.080	
Carga (kg)	206	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	98.71908347	
Fuerza de compresión (psi)	1403.7841	
Fuerza de compresión (MPa)	9.6810	
Tipo de fractura	cortado	
Edad de la muestra (días)	76	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.38. Resultados de pruebas mecánicas para probeta 7

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformación unitaria	Esfuerzo (kg/cm ²)
0	0	0	0	0
20	3	0.4	0.191687541	1.437656555
40	7	0.44	0.210856295	3.354531963
60	10	0.47	0.22523286	4.792188518
80	16	0.5	0.239609426	7.667501629
120	21	0.54	0.25877818	10.06359589
140	30	0.57	0.273154746	14.37656555
160	31	0.61	0.2923235	14.85578441
180	34	0.63	0.301907877	16.29344096
200	40	0.66	0.316284442	19.16875407
220	46	0.69	0.330661008	22.04406718
240	55	0.73	0.349829762	26.35703685

260	59	0.75	0.359414139	28.27391226
280	70	0.79	0.378582893	33.54531963
300	71	0.83	0.397751647	34.02453848
320	80	0.87	0.416920401	38.33750814
340	90	0.94	0.450465721	43.12969666
360	102	1	0.479218852	48.88032288
380	115	1.06	0.507971983	55.11016796
400	130	1.13	0.541517303	62.29845073
420	145	1.21	0.579854811	69.48673351
440	155	1.29	0.618192319	74.27892203
460	160	1.38	0.661322015	76.67501629
480	166	1.44	0.690075147	79.5503294
500	172	1.59	0.761957974	82.42564251
520	179	1.63	0.781126728	85.78017447
540	184	1.7	0.814672048	88.17626873
560	187	1.8	0.862593933	89.61392529
580	194	1.9	0.910515818	92.96845725
600	195	1.95	0.934476761	93.4476761
620	197	2.05	0.982398646	94.40611381
640	201	2.13	1.020736154	96.32298921
660	203	2.23	1.06865804	97.28142692
680	205	2.3	1.102203359	98.23986462
700	206	2.38	1.140540867	98.71908347
720	206	2.47	1.183670564	98.71908347
740	206	2.54	1.217215884	98.71908347
760	206	2.78	1.332228408	98.71908347

Gráfico 3.26. Esfuerzo/deformación probeta 7



El gráfico 3.26 muestra que conforme va transcurriendo los 20 segundos y se ejerce fuerza de compresión sobre la probeta. Se observa un ligero comportamiento plástico hasta alcanzar el punto de rotura a los 760 segundos con un esfuerzo máximo a la compresión de 98.71 (kg/cm²) además de un tipo de fractura cortado.

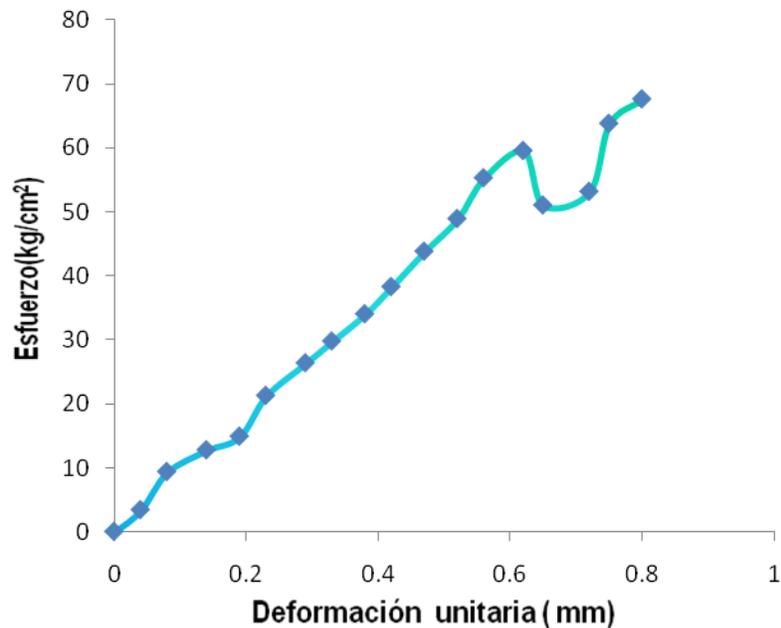
3.6.8 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 8

Tabla 3.27 Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 8

Número de muestra	8	
Diámetro del cilindro(cm)	1.173	
Altura(cm)	2.626	
Área(cm ²)	2.3506	
Carga (kg)	159	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	67.64162324	
Fuerza de compresión (psi)	961.8635	
Fuerza de compresión (MPa)	6.6333	
Tipo de fractura	Cono y grieta	
Edad de la muestra (días)	54	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.40 Resultados de pruebas mecánicas para probeta 8

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformación unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
20	8	0.04	0.017016761	3.403352113
40	22	0.08	0.034033521	9.359218311
60	30	0.14	0.059558662	12.76257042
80	35	0.19	0.080829613	14.88966549
120	50	0.23	0.097846373	21.27095071
140	62	0.29	0.123371514	26.37597888
160	70	0.33	0.140388275	29.77933099
180	80	0.38	0.161659225	34.03352113
200	90	0.42	0.178675986	38.28771127
220	103	0.47	0.199946937	43.81815845
240	115	0.52	0.221217887	48.92318662
260	130	0.56	0.238234648	55.30447184
280	140	0.62	0.263759789	59.55866198
300	120	0.65	0.276522359	51.05028169
320	125	0.72	0.30630169	53.17737676
340	150	0.75	0.319064261	63.81285212
360	159	0.8	0.340335211	67.64162324

Gráfico 3.27. Esfuerzo/deformación probeta 8

Al graficar deformación unitaria vs esfuerzo de deformación se observa comportamiento lineal y que es directamente proporcional dando un comportamiento elástico posteriormente muestra en dos puntos del grafico una zona plástica para después alcanzar rápidamente el punto de rotura. Con un Esfuerzo máximo a la compresión de 67.64162324 (kg/cm^2) en 360 segundos. Y un tipo de fractura de cono y grieta.

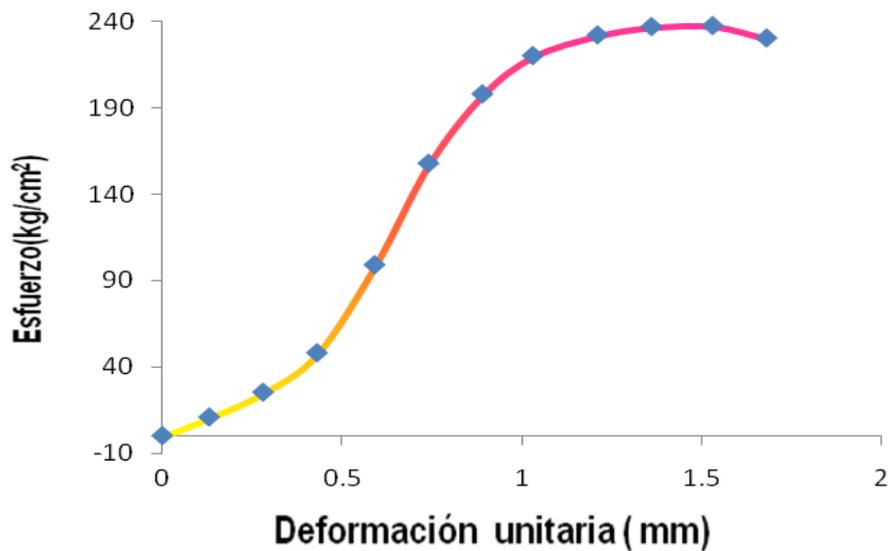
3.6.9 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 9

Tabla 3.41. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 9

Número de muestra	9	
Diámetro del cilindro(cm)	1.457	
Altura(cm)	2.644	
Área(cm^2)	1.667	
Carga (kg)	396	
Esfuerzo máximo(kg/cm^2)	237.5524	
Fuerza de compresión (psi)	5631.12	
Fuerza de compresión (MPa)	38.8343	
Tipo de fractura	Cono y grieta	
Edad de la muestra (días)	46	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.42. Resultados de pruebas mecánicas para probeta 9

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformación unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
20	18	0.13	0.077971044	10.79599077
40	42	0.28	0.167937634	25.19064513
60	80	0.43	0.257904224	47.9821812
80	165	0.59	0.353868586	98.96324873
120	263	0.74	0.443835176	157.7414207
140	330	0.89	0.533801766	197.9264975
160	367	1.03	0.617770583	220.1182563
180	387	1.21	0.725730491	232.1138016
200	395	1.36	0.81569708	236.9120197
220	396	1.53	0.917659216	237.511797
240	384	1.68	1.007625805	230.3144698

Gráfico 3.28. Esfuerzo/deformación probeta 9

La muestra que soporto mayor fuerza de compresión fue esta soportando 396 Kg en un área de 1.667cm² mostrando en el gráfico un comportamiento completamente plástico durante todo el grafico hasta alcanzar el punto de rotura.

3.6.10 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 10

Tabla 3.43. Datos y Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 10

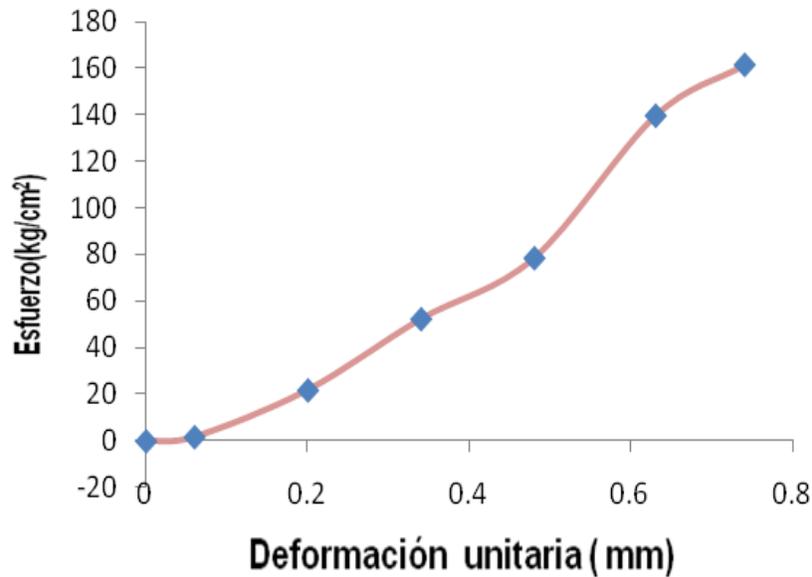
Número de muestra	10	
Diámetro del cilindro(cm)	1.208	
Altura(cm)	2.464	
Área(cm ²)	1.1461	
Carga (kg)	185	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	161.4161419	
Fuerza de compresión (psi)	2295.3369	
Fuerza de compresión (MPa)	15.8295	
Tipo de fractura	Cono y grieta	
Edad de la muestra (días)	46	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.44. Resultados de pruebas mecánicas para probeta 10

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformación unitaria	Esfuerzo
0	0	0	0	0
20	2	0.06	0.052351181	1.745039372
40	25	0.2	0.174503937	21.81299215
60	60	0.34	0.296656693	52.35118117

80	90	0.48	0.418809449	78.52677176
120	160	0.63	0.549687402	139.6031498
140	185	0.74	0.645664568	161.4161419

Gráfico 3.29. Esfuerzo/deformación probeta 10



La probeta se deforma hasta un máximo de 185 kg, mostrando un muy ligero comportamiento plástico, ya que no es directamente proporcional la deformación unitaria al esfuerzo, hasta llegar a al punto de rotura. Mostrado un tipo de fractura cono y grieta.

3.6.11 Datos, resultados obtenidos y análisis de las pruebas mecánicas para la probeta 11

Tabla 3.45. Resultados obtenidos de las pruebas mecánicas para la probeta 11

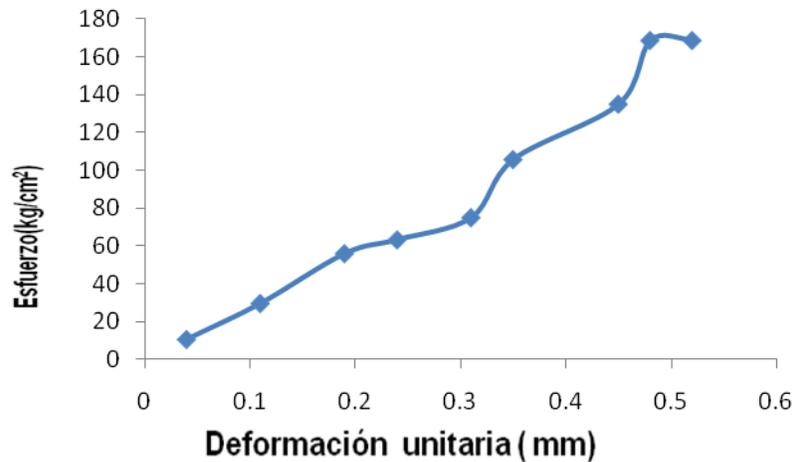
Número de muestra	11.	
Diámetro del cilindro(cm)	0.931	
Altura(cm)	2.085	
Área(cm ²)	0.680	
Carga (kg)	115	
Esfuerzo máximo(kg/cm ²)	168.9303	
Fuerza de compresión (psi)	2402.6154	
Fuerza de compresión (MPa)	16.5664	
Tipo de fractura	Cono y grieta	
Edad de la muestra(días)	46	
Defectos de la muestra		

Tabla 3.46. Datos y Resultados de pruebas mecánicas para probeta 11

Tiempo(seg)	Carga(Kg)	Deformación	Total de deformación unitaria	Esfuerzo
0	7	0.04	0.058758369	10.28271458
20	20	0.11	0.161585515	29.37918451
40	38	0.19	0.279102253	55.82045057
60	43	0.24	0.352550214	63.1652467
80	51	0.31	0.45537736	74.91692051
120	72	0.35	0.514135729	105.7650642
140	92	0.45	0.661031652	135.1442488
160	115	0.48	0.705100428	168.9303109

180	115	0.52	0.763858797	168.9303109
-----	-----	------	-------------	-------------

Gráfico 3.30. Esfuerzo/deformación probeta 11



La probeta alcanza un puntote rotura en una carga de 115 kg, con un comportamiento plástico. Mostrado un tipo de fractura cono y grieta.

En caso de la probeta 10 se le agregó un exceso de catalizador lo que provocó que se generara más polimerización de la resina y por lo tanto no hubiese suficientes enlaces que dieran flexibilidad al concreto y al observar la probeta se ven pequeños orificios.

Conclusiones

*"Nadie en este mundo posee la verdad absoluta. Es solamente un atributo de Dios. Todo lo que conocemos es una verdad relativa."
Gandhi, el Mahatma, [1869-1948]*

El objetivo general de esta tesis es elaborar concreto polimérico a base de PET reciclado se logro satisfactoriamente alcanzando una fuerza de compresión de 38.8343 MPa con un porcentaje de 10 % de la resina número 6, de viscosidad de 600(Pa/s), utilizando la composición de agregado grueso de 45% y de agregado fino de 32% con una edad de la probeta de 46 días.

La fuerza de compresión obtenida en las probetas respecto a la reportada es muy buena ya que el concreto polimérico reportado no solo tiene el concreto sino también varilla lo cual le da más resistencia

La muestra con menor resistencia fue la probeta número 6 debido a que la composición de la resina no contenía suficientes enlaces que le aportaran flexibilidad a la resina, además la cantidad de los agregados tampoco fueron adecuados, formando poco esparcimiento de la resina, obteniendo una resistencia a la compresión de 1.9613 MPa con una edad de 30 días.

Las propiedades mecánicas dependen del grado de entrecruzamiento de los componentes de la resina obtenida de la polimerización del TPA con ácido sebásico, anhídrido maleico y etilenglicol, para la obtención del poliéster insaturado.

Por medio de las diferentes viscosidades obtenidas de las resinas se alcanzo diferente grado de entrecruzamiento y fue posible controlar la intensidad de entrecruzamiento variando la proporción de los ácidos saturados e insaturados.

Las muestras fueron evaluadas de acuerdo a las especificaciones de la ASTM.

El endurecimiento de la resina se incrementa con la edad de curado.

Anexos

ANEXO A**Resistencia del concreto**

Esta gobernada por un esfuerzo limitante usualmente esta entre 100×10^{-6} y 200×10^{-6} en tensión.

El valor real depende del método de prueba y el nivel de resistencia del concreto, a mayor resistencia menor deformación final. Los valores correspondientes de la deformación compresiva alcanzan alrededor de 2×10^{-3} para un concreto de 70MPa (10000 lb/in^2 a 4×10^{-3} para un concreto de 14MPa 2000 lb/in^2 . el análisis estructural se usa comúnmente el valor de 3.5×10^{-3} .

ANEXO B**PROPIEDADES DEL PET**

PROPIEDADES FISICAS	OBSERVACIONES
Gravedad específica	
Amorfo	1.33 Kg/m ³
Cristalino	1.38 Kg/m ³
Densidad	1.35-1.40 kg/cm ³
Peso molecular	24,000-32,000 Kg/mol
Punto de fusión	280°C (virgen) 250-265°C (comercial)
Temperatura de descomposición	290°C
Viscosidad intrínseca	0.8±0.02 dl/g
Absorción de agua	equilibrio (%) < 0,7 en 24 horas (%) 0,1
Índice refractivo	1,58 – 1,64
Índice de oxígeno límite	(%) 21
Resistencia a la radiación	buenas

PROPIEDADES QUIMICAS	OBSERVACIONES
Resistencia a hidrocarburos	buena
Resistencia a ácidos débiles a temperatura ambiente	buena
Resistencia a álcalis débiles a temperatura ambiente	buena
Resistencia a productos químicos definidos	consultar
Efecto de los rayos solares	lo afectan ligeramente
Aprobado para contacto con alimentos	si
Comportamiento a la combustión	arde con mediana dificultad
Propagación de llama	mantiene la llama
Comportamiento al quemarlo	gotea
Color de la llama	amarillo anaranjado tiznado
Olor al quemarlo	aromático dulce

PROPIEDADES OPTICAS	OBSERVACIONES
Transmisión de luz	(%) 89
Refracción	1,576

PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Peso específico	kg/m ³	D-792	53479	1.39
Resistencia a la tracción.(fluencia / rotura)	Pa	D-638	53455	900 / --

Resistencia a la compresión (1 y 2 % def)	Pa ⁻¹	D-695	53454	260 / 480
Resistencia a la flexión	Pa	D-790	53452	1450
Resistencia. al choque sin entalla	Pa	D-256	53453	> 50
alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	15
Modulo de elasticidad (tracción)	Pa	D-638	53457	37000
dureza	shore d	D-2240	53505	85 - 87
Coficiente de roce estático s/acero		D-1894		--
Coficiente de roce dinámico s/acero		D-1894		0.20
Resistencia. al desgaste por roce				muy buena

PROPIEDADES ELECTRICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Constante dieléctrica a 60 hz		D-150	53483	3,4
Constante dieléctrica a 1 khz		D-150	53483	3,3
Constante dieléctrica a 1 mhz		D-150	53483	3,2
Absorción de humedad al aire	%	D-570	53472	0,25
Resistencia superficial	Ohm	D-257	53482	> 10 a la 14
Resistencia volumétrica	Ohms-cm	D-257	53482	> 10 a la 15
Rigidez dieléctrica	Kv/mm	D-149		22

PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Calor especifico	Kcal/Kg.°C	C-351		0.25
Temp. de flexión b/carga (18.5kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
Temp. de uso continuo en aire	°C			-20 a 110

Temp. de fusión	°C			255
Coeficiente. de dilatación lineal de 23 a 100°C	por °C	D-696	52752	0.00008
Coeficiente. de conducción térmica	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

ANEXO C

Pruebas a la flama³⁶

Algunos elementos como los metales alcalinos y alcalinotérreos al proporcionarles cierto tipo de energía (en este caso calorífica) una parte de ésta la absorben y la ceden como energía luminosa dando coloraciones diferentes que en el caso del espectro electromagnético comprendido en el rango visible (longitud de onda de 400 – 700 nm) van de violeta a rojo.

La temperatura del mechero Bunsen en algunos casos es suficiente para vaporizar algunos elementos. Esto provoca cambios en los niveles energéticos del átomo, la flama excita a los electrones de las capas exteriores del átomo mandándolos a niveles superiores de energía, al regresar a su nivel normal, la energía absorbida se desprende en forma de ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda y cuya frecuencia es proporcional a las diferencias de energía

ANEXO D

Granulometría del agregado fino y grueso.³⁷

La importancia de la granulometría de los agregados (grava) es que de la cantidad presente en la mezcla de concreto dependerán las propiedades de los diferentes tipos de concretos, mayor estabilidad volumétrica, resistencia, y por esto conviene

que los agregados sean adecuados para una mayor trabajabilidad. Hormigón.- mezcla natural de Agregado Fino y Agregado Grueso. La granulometría del hormigón consiste en la distribución del tamaño de sus partículas .Y esta se determina haciendo pasar una muestra representativa de hormigón por una serie de tamices ordenados, de mayor a menor. Cada uno de estos pesos retenidos se expresa como porcentaje (retenido) del peso total de la muestra.

El agregado fino deriva de la desintegración natural o artificial de las rocas. Comúnmente son en arena natural o piedra triturada, en su mayoría, partículas menores que 5mm. El agregado triturado artificial se produce triturando roca de cantera, piedra bola, guijarros, o grava de gran tamaño. El agregado fino debe cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo. Como son resistencia y tipo de granulometría.

- Tamaño máximo: Es el menor tamiz por el que se pasa toda la muestra.
- Tamaño máximo nominal: El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, la malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño.

ANEXO E

GRAVIMETRIA.³⁸

A la pérdida de peso que experimenta una muestra de al ser expuesta a la temperatura de ebullición del agua a presión atmosférica hasta obtener peso constante, se denomina “sólidos totales” o “materia seca”. La materia seca.se cuantifica el porcentaje de humedad de la muestra midiendo que la diferencia aritmética entre el peso inicial de la muestra, expuesto a la temperatura de

ebullición del agua, y el peso constante obtenido de materia seca, se debe al agua libre evaporada bajo las condiciones experimentales establecidas.

ANEXO F

Las probetas de concreto polimérico tienen características diferentes de acuerdo a la composición del concreto polimérico, cuando son sometidas a la compresión de las cuales son descritas a continuación:

Probetas.

Ensayo a la flexión se denomina al consistente en someter a un esfuerzo en el mismo sentido a un cuerpo prismático apoyado en sus dos extremos y cargado en los dos tercios del tramo comprendido entre los dos apoyos.^{20, 21}. El concreto es un producto o una masa endurecida de materiales heterogéneos, esta sujeto a la influencia de numerosas variables¹. Generalmente este medio es el producto de la reacción química del cemento y del agua. Sin embargo esta definición abarca una amplia gama de productos. También hay concretos hechos con diferentes componentes, como cenizas, escoria de alto horno, fibras así como también de polímeros. Estos polímeros químicamente son inertes que tienen resistencias compresivas, y de tensión. No obstante, los polímeros tienen un alto modulo de elasticidad mas bajo y un flujo plástico mas alto.

Moldes.

Los moldes son de material de forma cilíndrica de 10 centímetros por 5 centímetros de diámetro, están contruidos de un material no absorbente ni atacable por la pasta de cemento. (Tiene la rigidez suficiente para no admitir deformaciones sobre el moldeo de las probetas ni durante el manipuleo de estas.

El cilindro se hizo de acuerdo a las especificaciones de la norma. De manera que la parte cilíndrica de las medidas especificadas con la abertura longitudinal, los bordes coincidieran perfectamente y presentaran un cierre hermético al ajustar las grapas de los pernos adecuados.

Los moldes ocupados fueron de las siguientes medidas:

Figura 4.1. Partes del molde para concreto



ANEXO G

* El estireno debe purificarse de la siguiente manera:

A) ELIMINACIÓN DEL INHIBIDOR

B) SECADO

C) OBTENCIÓN DEL MONÓMERO

A. ELIMINACIÓN DEL INHIBIDOR

El inhibidor usualmente es hidroquinona o terbutilpirocatecol

1. Preparar una disolución de NaOH al 5%
2. Colocar partes iguales de NaOH g del monómero en un embudo de separación
3. Mezclar y agitar y esperar a que se separen
4. La fase acuosa mas pesada es drenada

5. Estas operaciones pueden repetirse 2 o 3 veces
6. Posteriormente lavar el monómero con agua destilada hasta que el papel ph muestre que la base ha sido eliminada

B. SECADO

1. Agregar sulfato de sodio anhidro para secar el monómero
2. Agitar esperar aproximadamente 30 minutos y filtrar

C. OBTENCION DEL MONOMERO

1. Activar alúmina calentándola por 3 horas a 80 °C
2. Preparar una columna con alúmina (trióxido de aluminio)
3. Hacer pasar el monómero por la columna para eliminar el calor obtenido
4. El monómero obtenido debe ser una disolución completamente transparente
5. NOTA: EL MONÓMERO AL QUE SE LE DA ESTE TRATAMIENTO DEBE SER GUARDADO EN EL REFRIGERADOR.

ANEXO H

COMPACTACIÓN DEL CONCRETO

La masa del concreto fresco, al colocarse en el molde tiene espacios de diferentes tamaños, debido al aire atrapado. Si se le permite endurecer en esta situación el concreto no será uniforme y por lo tanto, débil, y en consecuencia no tendrá suficiente resistencia, además de su apariencia será defectuosa.

La compactación es el proceso de eliminación del aire atrapado. Para lograr la consolidación se le saca el aire como se indica en la norma ACI 309 (American

Concrete Institute) por método manual, con una varilla y por medio de pisoneo, esto obliga a las partículas gruesas a acomodarse y ayuda a las burbujas de aire a subir hacia la superficie.

Para la elaboración de las probetas de concreto polimérico se necesita arena y grava (agregado fino y grueso) de los cuales se describe su importancia a continuación:

ANEXO I

Espectrofotometría infrarroja.⁶

Dentro del espectro electromagnético se encuentra la luz infrarroja que se divide en tres zonas; infrarrojo cercano, medio y lejano. Por medio de ella es posible detectar la energía vibracional de los enlaces de una molécula, que está por encima del cero absoluto. Dado que se encuentran en el mismo rango de frecuencia absorbe las distintas frecuencias que constituyen la molécula.

Al irradiar luz infrarroja sobre una molécula, se obtiene como resultado, la luz absorbida por los constituyentes de la molécula, estos seguirán vibrando a la misma frecuencia, pero como ya absorbieron energía tendrán una amplitud de vibración más grande. La luz que no es absorbida por la molécula es transmitida desde la muestra a un detector para determinar las frecuencias que fueron absorbidas. Cada una de estas absorciones características de energía corresponde al movimiento vibracional de los átomos en la molécula. Las frecuencias que fueron absorbidas y mandadas a la computadora, para ser interpretadas en un espectro que es interpretada en absorbancia o transmitancia en función de un número de bandas.

CROMATOGRAFIA DE PLACA FINA

Es una técnica de separación, identificación, purificación de una mezcla de dos o más compuestos. Esta se basa en la preparación de una capa uniforme sobre un

soporte este será la fase estacionaria y del eluyente la fase móvil. De la polaridad de la molécula depende la elección del eluyente, para una adecuada separación de los componentes que la constituyen la molécula.

La cromatografía de capa fina actúa de la siguiente manera, el eluyente ascenderá, por capilaridad, por la placa y arrastrará los componentes a lo largo de ésta produciendo “manchas” de los componentes.

Los componentes pueden ser revelados con luz UV, con vapores de yodo, sulfato

ANEXO J

Deformación unitaria y esfuerzo.

El esfuerzo se define aquí como la intensidad de las fuerzas componentes internas distribuidas que resisten un cambio en la forma de un cuerpo. El esfuerzo se define en términos de fuerza por unidad de área. Existen tres clases básicas de esfuerzos: tensivo, compresivo y corte.

La deformación se define como el cambio de forma de un cuerpo, el cual se debe al esfuerzo, al cambio térmico, al cambio de humedad o a otras causas. En conjunción con el esfuerzo directo, la deformación se supone como un cambio lineal y se mide en unidades de longitud. En los ensayos de torsión se acostumbra medir la deformación cómo un ángulo de torsión entre dos secciones especificadas.

Cuando la deformación se define como el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal de un cuerpo, el cual va acompañado por un cambio de esfuerzo, se denomina deformación unitaria debida a un esfuerzo. Es una razón o número no dimensional, y es, por lo tanto, la misma sin importar las unidades expresadas, su cálculo se puede realizar mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon = e / L$$

Donde,

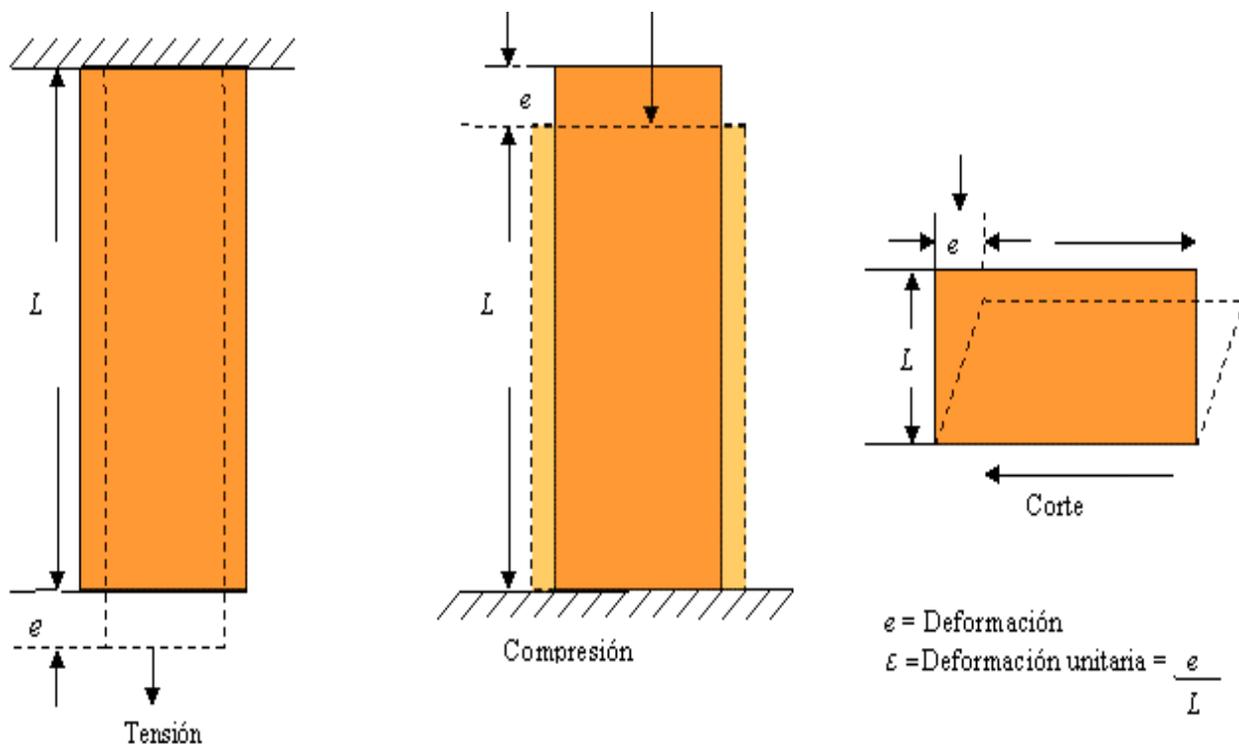
ε : es la deformación unitaria

e : es la deformación

L : es la longitud del elemento

En la figura 4.2 se describe la deformación unitaria cuando un cuerpo es sometido a esfuerzo tensivo o compresivo en una dirección dada, no solo ocurre deformación en esa dirección (dirección axial) sino también deformaciones unitarias en direcciones perpendiculares a ella (deformación lateral). Dentro del rango de acción elástica la compresión entre las deformaciones lateral y axial en condiciones de carga uniaxial (es decir en un solo eje) es denominada relación de Poisson. La extensión axial causa contracción lateral, y viceversa

Figura 4.2. Deformación unitaria.



ANEXO K

Ley potencia.

La ley potencia aplicada en la reología es la relación matemática entre viscosidad-corte.

$$\ln \eta = \ln K + (n-1) \ln \dot{\gamma}$$

Donde: K y n son constantes.

Para fluidos newtonianos, $n = 1$ y $K = \eta_n = \eta_o$ (constante ideal de la viscosidad), para fluidos no newtonianos $n < 1$ y para fluidos dilatante $n > 1$

$\dot{\gamma} = d\gamma/dt$ rango de corte. Esta ley modela los fluidos newtonianos cuando n es igual a uno, y cuando n es menor que uno, representa a fluidos dilatantes. Como se explica a continuación en cada tipo de fluidos.

Las unidades de la viscosidad en el SIU (sistema internacional de unidades) son *Pas*. Así, para conocer el comportamiento viscoso de un líquido es necesario determinar el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación. Estas cantidades dependen del área de contacto, de la fuerza necesaria para mover la placa superior a una velocidad constante v y del espaciamiento entre las placas. En este análisis se considera que se mantienen las mismas condiciones termodinámicas de presión, volumen y temperatura.

Al gráfico del esfuerzo de corte y la rapidez de deformación se le conoce como curva de flujo o reograma.

ANEXO L

MECÁNICA DE FRACTURA.²²

La mecánica de la fractura tiene por objeto el análisis del comportamiento de una estructura fisura da cuando se somete a sollicitaciones mecánicas.

En términos generales, las fracturas pueden clasificarse de acuerdo con la energía que requieren en frágiles (con poca energía) o dúctiles (con mucha energía). La rotura frágil se produce de forma repentina afectando a una superficie ortogonal a las tracciones aplicadas; el diagrama de tensiones-deformaciones es esencialmente recto. En una rotura dúctil se producen deslizamientos permanentes debidos a las tensiones tangenciales que deforman plásticamente el material antes de que se produzca la rotura.

Módulo de compresión o volumen

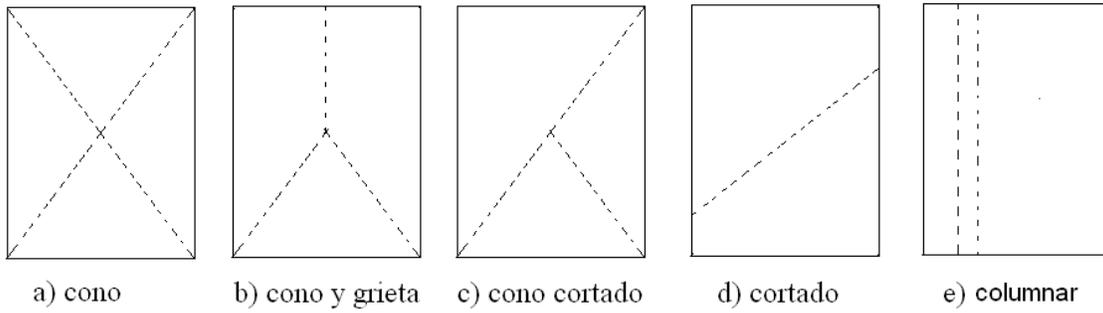
A la deformación causada por la presión hidrostática, que se ejerce con igual intensidad en todas direcciones, se le denomina deformación volumétrica $v/V=e_v$ donde V es el volumen original y v el cambio de volumen. Al modulo se le llama módulo de volumen o de compresión K .

$$\tau_v = e_v \times K$$

τ_v Es la presión hidrostática y e_v es la deformación volumétrica relativa.

A continuación se muestra en la figura 6 las diferentes tipos de fractura para las pruebas mecánicas en las probetas de concreto a) cono, en donde se corta de extremo a extremo a extremo en forma de cruz; b) cono y grieta en donde se corta del centro a los extremos en forma de y; c) cono en donde se corta en un solo extremo y la mitad del otro extremo cortando; d) cortado tal como lo indica su nombre se corta horizontalmente a alguna altura de la probeta; e) columnar se corta de extremo a extremo como lo indica su nombre de manera vertical.

Figura 4.3. Diferentes tipos de fractura para las pruebas mecánicas.



Bibliografía

- 1) Morton-Jones, D. H, *Procesamiento de plásticos*. México, Limusa Noriega Editores, 1993
- 2) A.M. Neville y J. Brooks, *tecnología del concreto*, Trillas, México 1998.
- 3) <http://www.packaging.enfasis.com/notas/11230-Disminuye-demanda-mundial-del-PET> (29 Febrero 2010)
- 4) David W. Brooks and Geoff A. Giles, *PET Packaging Technology*, CRC Press Canada, 2002
- 5) Revista Ambiente Plástico Por: **Mónica Conde**
Jan 22, 2007
- 6) http://www.ambienteplastico.com/suscriptores/article_698.php
- 7) Enciclopedia del Plástico, Instituto Mexicano del Plástico Industrial, Tomo 3, Capítulo 29, páginas 119-159, México D. F., 2000.
- 8) ANIQ (Asociación Nacional de la Industria Química, AC), 1999. *Anuario estadístico de la industria química mexicana*. México.
- 9) R. Davis and C. H. J. Wells, *Spectral Problems in Organic Chemistry*, Chapman & Hall, New York, 1984.
- 10) ANIQ (Asociación Nacional de la Industria Química, AC), 2001. *Anuario estadístico de la industria química mexicana*. México. ANIQ.
- 11) ECOCE /www.ecoce.org.mx (05 Febrero 2010)
- 12) María del Carmen Núñez Santiago, *Introducción a la Reología*, Instituto Politécnico Nacional, México 2001
- 13) Miguel Uribe Velasco, *Los polímeros, Síntesis degradación y reología*, Instituto Politécnico Nacional, México 1996.
- 14) X. A. Domínguez, *Experimentos de Química Orgánica*, Limusa, México D. F. 1984
- 15) Philis S. Bailey JR, *Química Orgánica, Practice Hall*, California University, 1998.
- 16) Utpal R. Vaidya Vikas M. Nadkarni, *Unsaturated Polyester Resins from Poly(ethylene terephthalate) Waste. Synthesis and Characterization*, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 26:198-202(1987).

- 17) Douglas A. Skoog Principios de Análisis instrumental, Mc-Graw-Hill, 5^{ta} Edición, 1992, Madrid España
- 18) Abdel-Azim, Aiman M, Recycled Flexible Resins in Concrete, Polymer Journal, 29:21-24 (1997).
- 19) K. S. Rebeiz, M. ASCE, S. P. Serhal, and A. P. Craft, Properties of Polymer Concrete Using Fly Ash Journal of Materials in Civil Engineering, 16:15-19(2004).
- 20) Annual Book of ASTM Standards 2000 Volumen 4.05 Section 4 Construction ASTM C 1077 Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Contrition and Criteria for Laboratory Evaluation.
- 21) Annual Book of ASTM Standards 2000 Volumen 4.05 Section 4 Construction ASTM práctica C125
- 22) Cheng-Ho Chen, Chun-Yean, Studies of glycolisis of Ply (ethylene terephthalate) Recycled from Postconsumer Soft-Drink Bottles. I. Influences of Glycolysis Conditions, Journal of Applied Polymer Science 80:943-948(2001).
- 23) Annual Book of ASTM Standards 2000 Volumen 4.05 Section 4 Construction ASTM C138 Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of concrete
- 24) Annual Book of ASTM Standards 2000 Volumen 4.02 Section 4 Construction C 192/C 192-M-98 Standartd Practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory.
- 25) K. S. Rebeiz, M. ASCE, and A. P. Craft, Polymer Concrete Using Coal Fly Ash Journal of Energy Engineering, 128:62-73(2002).
- 26) Annual Book of ASTM Standards 2000 Volumen 4.05 Section 4 Construction C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens.
- 27) Annual Book of ASTM Standards 2000 Volumen 4.02 Section 4 Construction C 39/39M-99 Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- 28) http://www.mincetur.gob.pe/comercio/ueperu/consultora/docs_taller/Parte_2_Présentacion_Taller_Uso_de_Envases_yEmbalajes_Mod_compatibilidad.pdf

- 29) Santiago Sánchez López, Aditivos para Material Plástico, antioxidantes y Estabilizadores UV, LIMUSA México 1996.
- 30) Jose R. Barcelo, Diccionario terminológico de Química, 2da edición, México 1976, Alambra.
- 31) S. R. Shukla, K. S. Kulkarni, Depolymerizaion of Poly (ethylene terephthalate) Waste, Journal of Applied Polymer Science 85:1765-17170(2002).
- 32) Mohammad L. Hassan, Abd-Alla M. A. Nada, Utilization of Lignocellulosic Fibers in Molded Polyester Composites, Journal of Applied Polymer Science, 87:653-660 (2003)
- 33) Joao Marciano Laredo dos Reis, Mechanical Characterization of Fifer Reinforced Polymer Concrete, Materials Research, 8:357-360(2005).
- 34) Antonio Sánchez Solís, Octavio Manero Brito, Polymers in Concrete, Publication PS-40 ACI, Detroit 1973, pp. 283-294, 347-358.
- 35) Jane Proszek Gorninski, Denise C. Dal Molinb, Claudio S. Kazmierczak, Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete, Cement and Concrete Research,34:2091–2095(2004).
- 36) Shirirner, Identificación Sistemática de Compuestos Orgánicos, Ed. Limusa 7ma Ed. 1987
- 37) ACI (American Concrete Institute) 309, Práctica recomendable para compactación del concreto, IMCC (International Management And Construction Corporation), A.C. 1974.
- 38) Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, “Breaking Frontiers and Barriers in Engineering: Education, Research and Practice” 21-23(2006).
- 39) S Guhanathan and M Saroja Devi, Effect of environmental stress on the mechanical properties of surface treated fly-ash/polyester particulate composite, Polymer International, 51:289-296(2002)
- 40) S. Al –Malaika et all, Chemistri and Thechnology of polymer Additives,

- 41) D. J. Suh, Park, K.h. Yoon, Polymer The properties of unsaturated polyester based on the glycolzed poly(ethylene tereftálato) with various glycol compositions 41:461-466(2000).
- 42) Guoxi Xi, Maixi Lu, Chen Sun, Study on depolymerisation of waste polyethylene terephthalate into monomer of bis(2-hidroxyethyl terephthalate), polymer degradation and stability 87:117-120(2005).
- 43) E. Pretsch, determinación estructural de compuestos orgánicos, Masson, 2002, España
- 44) Lange`s Handbook of chemistry, Mc-Graw-Hill, 12 Edición,1973