



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA PEBD REFORZADOS CON PARTÍCULAS DE LIMADURA DE HIERRO

TRABAJO RECEPCIONAL EN LA MODALIDAD
DE:

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA
RODRIGO DANIEL AGUILAR AYALA

DIRECTORA DE TESIS
DRA. MIRIAM SÁNCHEZ POZOS



TOLUCA, EDO. MEX.

AGOSTO 2019

“Las oportunidades grandes nacen de
haber sabido aprovechar las pequeñas”
Bill Gates

AGRAD & DEDICATORIAS

Glosario de términos

Símbolo/ Siglas	Descripción	Unidades SI	Unidades FPS
PEBD	Poliétileno de baja densidad	N/A	N/A
PEAD	Poliétileno de alta densidad	N/A	N/A
%wt	Porcentaje en peso del refuerzo	%	%
RSU	Residuos sólidos urbanos	N/A	N/A
SEMARNAT	Secretaría de medio ambiente y recursos naturales	N/A	N/A
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	N/A	N/A
SEDESOL	Secretaría de desarrollo social	N/A	N/A
LMFI	Laboratorio de manufactura de la Facultad de ingeniería	N/A	N/A
ECOCE	Ecología y compromiso empresarial A.C.	N/A	N/A
MXN	Pesos mexicanos	\$	\$
IMPI	Instituto mexicano del plástico industrial	N/A	N/A
ASTM	Sociedad americana para pruebas y materiales	N/A	N/A
PEMEX	Petróleos mexicanos	N/A	N/A
δ	Deformación unitaria	%	%
I	Momento de inercia	kg*m ²	lb*ft ²
E.xx%wt	Módulo de elasticidad máximo teórico	Pa	psi
E	Energía	Joules	in-lb
F	Fuerza o carga	N	lb
G	Aceleración gravitacional	≈9.81m/s ²	≈386.2in/s ²
L	Longitud	m	in
m	Masa	kg	lb-s ² /in
W	Peso	N	lb
A	Área	m ²	in ²
G	Módulo de corte	Pa	psi
x, y, z	Coordenadas generales	m	in
σ	Módulo de fuerza	Pa	psi
τ	Esfuerzo cortante	Pa	psi
E	Módulo de Young	Pa	psi
r	Radio	m	in
α	Ángulo de salida	° / "	° / "
β	Ángulo de rebote	° / "	° / "
ρ	Densidad del material	kg/m ³	lb/ft ³
d	Diámetro de paso	m	in
HSD	Dureza Shore D	N/A	N/A
HZX	Zona de calentamiento	N/A	N/A
h.ent	Altura entallada	mm	in
P	Fuerza estática	N	lb
E.abs	Energía absorbida	N-m	lb-ft
H	Altura inicial de liberación	m	ft
R	Resiliencia	J/m ²	in-lb/ft ²

ÍNDICE	Pág.
AGRAD & DEDICATORIAS	III
GLOSARIO DE TÉRMINOS	IV
ÍNDICE DE GRÁFICAS	8
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	13
1.1 Materiales	13
1.2 Clasificación de los materiales	13
1.3 Residuos sólidos: Situación actual en México	13
1.4 Plásticos: Basura Mundial	17
1.5 ¿Qué son los materiales compuestos?	18
1.6 Clasificación de los materiales compuestos	19
1.6.1 Materiales compuestos en función de su matriz	19
1.6.2 Materiales compuestos en función de su refuerzo	20
1.7 Uso de materiales compuestos en ingeniería	20
1.7.1 Compuestos reforzados con partículas	22
1.7.2 Compuestos reforzados con fibras	23
1.8 Áreas de oportunidad para los materiales compuestos	24
1.9 Principales procesos de manufactura del plástico	25
1.10 Extrusión	27
1.10.1 Ventajas de la Extrusión	28
1.10.2 Restricciones de la Extrusión	29
1.10.3 Extrusión monohusillo	29
CAPÍTULO II. DISEÑO DE MATERIALES Y ANÁLISIS TEÓRICO	30
2.1 Aspectos teóricos del análisis mecánico	30
2.1.1 Normatividad: Probetas y ensayos mecánicos	30
2.1.2 Ensayo de tensión	30
2.1.3 Ensayo de impacto	32
2.1.4 Ensayo de dureza	35
2.1.5 Esfuerzo de Fluencia	37
2.1.6 Carga de fluencia	38
2.1.7 Módulo de Young	38
2.1.8 Deformación unitaria	39
2.1.9 Carga a la Rotura	40

2.2 Materiales e instrumentos	40
2.2.1 Muestreo para los ensayos	42
2.3 Formulación teórica del compuesto	43
2.3.1 Masa teórica de las probetas en función del %wt	43
2.3.2 Densidad teórica del compuesto	45
2.3.3 Módulo de elasticidad teórico del compuesto	47
2.4 Sistema de trabajo estandarizado	49
2.4.1 Reciclado del PEBD	50
2.4.2 Reciclado del PEBDR	50
2.5 Precauciones y advertencias del reciclado	51
CAPÍTULO III. EXPERIMENTACIÓN Y ENSAYOS MECÁNICOS	53
3.1 Moldes y probetas para ensayos mecánicos	53
3.1.1 Diseño y mecanizado del molde para probetas de tensión	53
3.1.2 Diseño y mecanizado del molde para probetas de impacto	54
3.2 Elaboración de probetas	55
3.2.1 Diseño de experimentos	56
3.2.2 Procedimiento	56
3.3 Ensayo mecánico de tensión	58
3.4 Ensayo mecánico de impacto (Charpy)	63
3.5 Prueba de Dureza (Shore D)	66
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
4.1 Ensayo de tensión	69
4.1.1. Análisis de las curvas características de tensión (PEBD-Fe).	71
4.1.2. Análisis de las curvas características de tensión (PEBDR-Fe).	72
4.1.3 Análisis PEBD-Fe contra PEBDR-Fe	73
4.1.4 Esfuerzo de Tracción	75
4.1.5 Carga de Fluencia	76
4.1.6 Módulo de Young	77
4.1.7 Deformación unitaria	78
4.1.8 Carga a la Rotura	80
4.2 Ensayo de impacto	81
4.2.1 Fuerza de ruptura de material	82
4.2.2 Energía absorbida	83
4.2.3 Resiliencia PEBD-Fe (R)	84
4.2.4 Resiliencia PEBDR-Fe (R)	84
4.3 Ensayo de dureza	86
4.4 Propiedades mecánicas de los materiales	87
4.5 Recomendaciones de manufactura, proceso e investigación a futuro	89
4.6 Conclusiones	93

BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS	99
Molde Tensión H	100
Molde Tensión M	101
Molde Impacto H	102
Molde Impacto M	103

Índice de gráficas

Gráfica 1 Densidad teórica del compuesto proyectada	47
Gráfica 2 - Módulo de elasticidad máximo y mínimo teórico proyectado	49
Gráfica 3- 100 %wt PEBDR, 0% wt Fe	59
Gráfica 4 - Gráfica comparativa de la prueba de impacto	66
Gráfica 5 - Dureza Shore por porcentaje de concentración %wt (PEBD-Fe)	67
Gráfica 6 - Dureza Shore por porcentaje de concentración %wt (PEBDR-Fe)	68
Gráfica 7 - Curva característica del compuesto 95 %wt PEBD, 5 %wt Fe	69
Gráfica 8 - Curva característica del compuesto 95 %wt PEBDR, 5 %wt Fe	69
Gráfica 9 - Curva característica del compuesto 90 %wt PEBD, 10 %wt Fe	69
Gráfica 10 - Curva característica del compuesto 90 %wt PEBDR, 10 %wt Fe	69
Gráfica 11 - Curva característica del compuesto 85 %wt PEBD, 15 %wt Fe	70
Gráfica 12 - Curva característica del compuesto 85 %wt PEBDR, 15 %wt Fe	70
Gráfica 13 - Curva característica del compuesto 80 %wt PEBD, 20 %wt Fe	70
Gráfica 14 - Curva característica del compuesto 80 %wt PEBDR, 20 %wt Fe	70
Gráfica 15 - Curva característica del compuesto 75 %wt PEBD, 25 %wt Fe	70
Gráfica 16 - Curva característica del compuesto 75 %wt PEBDR, 25 %wt Fe	70
Gráfica 17 - Familia de compuestos para el PEBD	71
Gráfica 18 - Familia de compuestos para el PEBDR	73
Gráfica 19 - Par de compuestos 5%wt Fe	74
Gráfica 20 - Par de compuestos 10%wt Fe	74
Gráfica 21 - Par de compuestos 15%wt Fe	74
Gráfica 22 - Par de compuestos 20%wt Fe	74
Gráfica 23 - Par de compuestos 25%wt Fe	75
Gráfica 24- Comparación del esfuerzo de tracción entre las familias del PEBD Vs PEBDR	76
Gráfica 25- Comparativa de carga de fluencia para las familias del compuesto	77
Gráfica 26 - Comparación Módulo de Young PEBD Vs PEBDR	78
Gráfica 27 - Deformación promedio presentada por el PEBD	79
Gráfica 28 - Deformación promedio presentada por el PEBDR	80
Gráfica 29 - Comparación Carga a la Rotura PEBD Vs PEBDR	81
Gráfica 30 Energía absorbida	85
Gráfica 31 Resiliencia en prueba de impacto	86
Gráfica 32 - Comparación de durezas entre las familias PEBD & PEBDR	87

Introducción

El aumento en el uso de materiales plásticos se deriva no sólo de su versatilidad, sino de una tendencia global de aumento en el uso de recursos por parte de la sociedad; la economía actual se sostiene en una dinámica de consumo constante, que provoca una gran presión sobre el planeta debido a la extracción de materias primas. En este contexto, no sólo se obtienen y transforman recursos naturales; también se genera una gran cantidad de residuos que la Tierra no puede asimilar. Tal es el caso de los plásticos y recordando que las dos grandes familias de los plásticos son los termoplásticos y los termofijos, invariablemente la posibilidad de reciclaje para cada material es dependiente de estas dos agrupaciones, teniendo claro que es más factible y práctico el reciclaje de termoplásticos, que no requieren más que tratamientos físico-mecánicos para reciclaje, en lugar de los termofijos que requieren procesos más complejos ya sean químicos, electromagnéticos, sistemas de vacío, entre otros.

El uso de termoplásticos en el contexto moderno es sin duda un caso excepcional de éxito en cuanto a la amplia gama de usos que pueden darse a partir de los diferentes tipos de preparación y manufactura. Uno de ellos es sin duda el polietileno (PE), termoplástico de la familia de los olefínicos¹, conformado por unidades repetitivas de etileno (Figura 1), se designa como LDPE (por sus siglas en inglés, Low Density Polyethylene) o PEBD, polietileno de baja densidad (Figura 2).

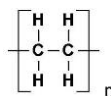


Figura 1. Estructura química del polietileno



Figura 2. Iconos del polietileno

El uso del polietileno ha sido ampliamente aceptado y adaptado a numerosas aplicaciones en el mercado mundial, debido a su buena resistencia química, ser inodoro, no tóxico, impermeable, dieléctrico y ligero; su uso de manera extendida data desde 1945, aislante dieléctrico para cables conductores. El proceso comercial que hizo posible su explotación (Catálisis Ziegler-Natta que hizo que

¹Polímero obtenido mediante la polimerización de olefinas.

el PE fuera un éxito) fue desarrollado en 1950 por los científicos Karl Ziegler y Giulio Natta (Karl 1963).

México es líder a nivel mundial del reciclaje en el PET, llegando hasta el 57.9% del total de la resina recuperada (ECOCE, 2015), colocándonos a niveles equiparables en reciclaje a los de Alemania o Japón. Sin embargo, el enfoque no es respecto al PET únicamente, debido a ello los niveles de reciclaje de los demás plásticos consumidos en el país están entre el 0.3 al 22%, claramente reflejados en la mala disposición de estos en los rellenos sanitarios (Vázquez, y otros 2014).

Aun siendo en México punteros a nivel mundial con el reciclaje del PET (Polietileno Tereftalato), en el caso del PEBD estamos con un bajo 2.78% del total de resina utilizada a nivel nacional, lo cual deja alrededor de 558,000 toneladas de PEBD sin acopio ni reciclaje al año (ECOCE 2015). Esto es alarmante.

Los compuestos de polímeros reforzados han probado ser materiales de ingeniería sumamente adaptables y flexibles en extensas aplicaciones; incluyendo la aeroespacial, aeronáutica, automotriz, construcción, productos básicos y deportes. Una ventaja probada es su aplicación en aeronaves de transporte civil, con reducciones en peso desde un 5% para un Boeing 757/767 (en los años 80) hasta un increíble 50% en el nuevo Boeing Dreamliner 787 (Sheikh-Ahmad 2009).

Tal es lo reportado por Vieira Zuccheratte & Braccini Freire en 2017 que utilizaron PET reforzado con hierro para obtener un incremento importante en las propiedades mecánicas. Por su parte, Rupinder Singh en 2016 realizó un trabajo previo de comparación entre el PEBD y el PEAD con concentraciones menores a 12 % de Fe (hierro), encontrando que la similitud en las propiedades de ambos materiales sujetos a diferentes condiciones de esfuerzo proporciona un aumento considerable en la resistencia mecánica de éstos y que las propiedades mecánicas obtenidas son mucho mayores que las de la matriz original (material virgen).

En el trabajo para el desarrollo de la presente tesis, se elaboraron dos materiales compuestos a base de PEBD y polietileno reciclado (PEBDR) ambos reforzados con partículas de Fe, lo cual permitió generar dos nuevos materiales con propiedades mecánicas muy superiores al PEBD y PEBDR respectivamente. Para la caracterización mecánica del polímero reforzado se ensayaron probetas de tensión e impacto para pruebas de acuerdo con las normas ASTM D 638-99 & ASTM D 6110-04 respectivamente.

El presente proyecto es una continuación del trabajo realizado por Rupinder Singh en 2016, con el enfoque de experimentación de porcentajes mayores de Fe, en este caso, 5, 10, 15, 20 y 25 %wt² ya que el reporta solo hasta un 10%wt, que permitirán conocer los límites mecánicos de estas nuevas concentraciones PEBD-Fe y PEBDR-Fe, además se hizo una comparación entre matrices PEBD y PEBDR. El presente trabajo tiene como base un sistema en 4 etapas (Ilustración 1), para la investigación y desarrollo que permitió cumplir los objetivos.

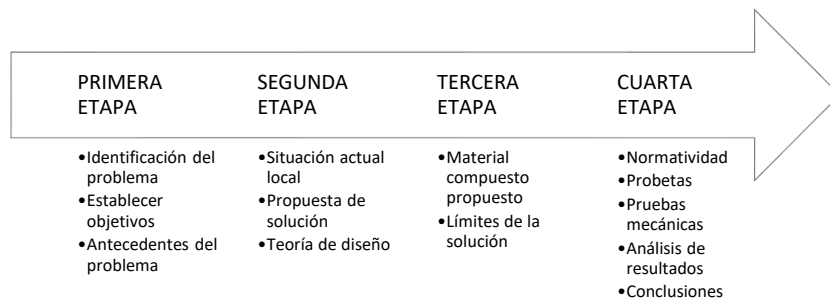


Ilustración 1. Metodología propuesta

² Porcentaje en peso: proporción relativa del elemento indicado respecto a la cantidad total de materia en la mezcla. También llamada porcentaje de masa (University of Southampton 2018).

Objetivo General

Caracterizar las propiedades mecánicas de un material compuesto (plástico/metal) a base de PEBD y PEBDR, generado a partir de productos reciclados de polietileno y hierro particulado, comparados con las propiedades mecánicas del plástico virgen.

Orientar los hallazgos al desarrollo de un material compuesto, proveniente de reciclados de las más de 558k toneladas de PEBD sin reciclaje, con nuevas propiedades mecánicas que le den valor agregado, como consecuencia de esto, fomentar la economía circular a una escala industrial (Ilustración 2).

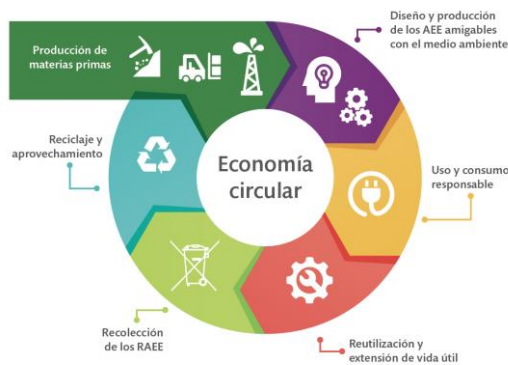


Ilustración 2 Diagrama de la economía circular (CNIEP 2019)

Alcances

El presente trabajo busca la caracterización mecánica de los compuestos obtenidos al modificar el valor %wt (porcentaje en peso) del refuerzo en 5%wt, 10%wt, 15%wt, 20%wt y 25%wt, para determinar su módulo de elasticidad, su resistencia al impacto y su dureza. Con base en los resultados, proponer una o varias aplicaciones para el material reciclado a base de desechos de PEBD con limadura de hierro.

Se utilizarán procesos de prueba estandarizados para la obtención de las diferentes características del material, así como el análisis de resultados correspondiente a los valores de interés.

CAPÍTULO I. Marco Teórico

1.1 Materiales

Se puede definir a un material como una porción de materia trabajada en su estado natural, ya sea de forma simple o en conjunto por el hombre para la fabricación de objetos en busca de un beneficio tecnológico o industrial. El proceso de elaboración que sufre cada material le confiere su microestructura, la cual propiamente determina su comportamiento físico, químico y mecánico (Anderson, y otros 1998).

1.2 Clasificación de los materiales

La identificación y selección de materiales no es propiamente un proceso sencillo, esto debido a su innumerable variedad. La elección radica en las propiedades que deberá tener el material en una aplicación específica, así como el proceso de fabricación. En la figura 3 se muestran las diferentes formas en que se puede clasificar un material. Los metales, polímeros, cerámicos y compuestos son las principales familias en que se dividen en subclasificaciones propias, de acuerdo con sus características físicas, químicas y mecánicas.

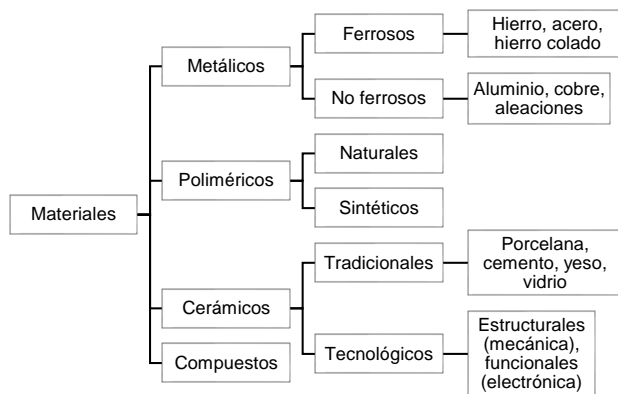


Figura 3. Clasificación de materiales adaptado de Smith y Hashemi (2006)

1.3 Residuos sólidos: Situación actual en México

La producción y el consumo de bienes y servicios generan inevitablemente algún tipo de residuos; pudiendo ser sólidos (orgánicos e inorgánicos), líquidos (incluidos los que están disueltos en aguas residuales) y los que escapan en forma de gases. Todos los anteriores, en función de su composición, cantidades

emitidas y manejo, pueden tener efectos muy diversos en la población y el ambiente.

Los residuos se definen formalmente como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, ubicados en recipientes o depósitos, y están sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR; DOF, 2003). Se clasifican, de acuerdo con sus características y orígenes, en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP) (SEMARNAT 2015).

Para los fines de este trabajo, los residuos de interés son los RSU, de los cuales se tiene mayor generación y disposición en hogares, industria, comercio, entre otros. Estos son la consecuencia de la eliminación de materiales que se utilizan en las actividades domésticas, por ejemplo, los envases o empaques de ciertos productos consumidos.

En 2012 la producción mundial de residuos sólidos urbanos se calculó en alrededor de 1 300 millones de toneladas diarias y se estima que podría crecer hasta los 2 200 millones para el 2025 (Hoornweg y P. 2012). En México la cifra más reciente, con datos del 2015, revela que la generación de RSU alcanzó las 53.1 millones de toneladas, lo que representó un aumento de 61.2 % respecto al año 2003 (SEMARNAT 2015).

Para tener una mejor idea de la cantidad de los RSU generados en México se clasifica por regiones a las entidades federativas. Es importante señalar que mientras más desarrollada económicamente está una zona, ésta genera mayor cantidad de residuos. En México existen cinco zonas geográficas principales, a continuación, se muestran sus niveles de generación:

- 1) Frontera Norte **16 %** (6 920.4 toneladas)
- 2) Sur **10 %** (4 372.7 toneladas)
- 3) Norte **11 %** (4 493.2 toneladas)
- 4) Ciudad de México **12 %** (4 949.4 toneladas)
- 5) Centro **51 %** (21 367.1 toneladas)³

Con los datos mostrados, en México se generaron aproximadamente 42 102.8 toneladas de RSU. Ahora, lo importante es saber la composición de estos residuos, debido a que existen diferentes maneras de categorizar el tipo de residuo generado, lo cual permite un mejor manejo y disposición. Para fines de desarrollo, mientras más económicamente este desarrollada una zona urbana el porcentaje de residuos inorgánicos será mayor en comparación con el de los orgánicos. Esta tendencia se ve claramente reflejada en países en vías de desarrollo que generan mayores residuos orgánicos, mientras que, en los países desarrollados, los residuos son principalmente inorgánicos, con una cantidad importante de productos manufacturados (Acurio y otros 1997). Así los residuos son una herramienta invaluable para poder analizar la situación socioeconómica de un país, mediante su comúnmente denominada “basura”.

Para comprender el papel de los polímeros en México es necesario analizar la clasificación de los RSU generados en el país. Tomando en cuenta que se tienen nueve clasificaciones de ellos, es más fácil comprender el nivel de desarrollo de nuestro país, en la tabla 1 se presentan la clasificación de los RSU y los porcentajes correspondientes de cada uno.

Tabla 1 Composición de los RSU en México³

Residuos de comida, jardines y materiales orgánicos similares.	52.4 %
Otro tipo de basura	12.1 %
Papel, cartón y derivados	13.8 %
Textiles	1.4 %
Plásticos	10.9 %
Vidrio	5.9 %
Aluminio	1.7 %
Metales Ferrosos	1.1 %
Otros metales no ferrosos	0.6 %

³ **FUENTE:** Dirección General de Equipamiento e Infraestructuras en Zonas Urbano-Marginadas. SEDESOL. MÉXICO. 2013

Como se observa, los plásticos representan 10.9 % del total de los RSU, si tomamos en cuenta el anterior cálculo de 42 102.8 toneladas, significa que 4 589.2 toneladas fueron de plásticos. Hoy existen seis principales tipos de plásticos que se utilizan como empaques y envases para comercializar productos en el mercado en función de su facilidad de reciclaje (Tabla 2):

Tabla 2 Principales plásticos en el mercado

Polietileno tereftalato	PET
Polietileno de alta densidad	PEAD
Polietileno de baja densidad	PEBD
Policloruro de vinilo	PVC
Polipropileno	PP
Poliestireno	PS

FUENTE: (NatGeo 2018)

A partir de la información recopilada en diversos informes de diferentes asociaciones se tiene un estimado de los miles de toneladas por tipo de resina destinada a envases y embalajes, en la tabla 3 se muestra el concentrado del porcentaje acopiado para su reciclaje con respecto al Consumo Nacional Aparente (CNA) y el porcentaje acopiado respecto al uso para envases y embalajes.

Tabla 3 Recolección post-consumo de los principales plásticos en la industria.

Miles de toneladas	PEAD	PVC	PEBD	LLDPE	PP	PS	Total	%
CNA de resina promedio	820	512	574	412	1 138	487	3 943	100
CNA Envases y embalajes	363	4	254	183	504	216	1 524	38
Residuo Plástico acopiado	182	2	16	146	61	2	837	18
% de residuo plástico Acopiado Respecto a CNA Promedio	22 %	0.4 %	3 %	35 %	5 %	0.4 %	21 %	
% de residuo plástico Acopiado Respecto a CNA Envases y embalajes	50 %	50 %	6 %	80 %	12 %	1 %	---	

ADAPTADO DE:

Plan Nacional Privado Colectivo de Manejo de Residuos de Envase Post-Consumo de PET, PEAD, y otros. ECOCE. 2015

Observando lo anterior, de toda la resina utilizada en la industria en el año 2015, 38 % se destinó a envases y embalajes; mientras que, de toda la resina utilizada, apenas se acopió el 21% para su tratamiento y reciclaje. Además, observamos que los plásticos con mayor porcentaje de acopio respecto a la producción

nacional son el PEAD con 22% y el Polietileno Lineal con 35%; sin embargo, si tomamos solo lo destinado a envases y embalajes, los plásticos con mayor recolección son nuevamente el polietileno lineal con 80%, el PEAD con 50% y se anexa el PVC con otro 50%. Por el contrario, la información que se tiene para el PEBD es que en el mejor caso de recolección es de tan solo 6%, lo cual indica que es un mercado que no ha sido explotado para la disponibilidad existente.

1.4 Plásticos: Basura Mundial

China es el principal productor de plásticos, seguido de Europa, Norte América e Indo-Asia. Dentro de Europa, más de dos tercios de la demanda de plásticos se concentran en cinco países: Alemania (24.9%), Italia (14.3%), Francia (9.6%), Reino Unido (7.7%) y España (7.4%). (Plastics Europe Market Research Group 2018)

Existen muchos tipos de plásticos aunque el mercado está dominado por cuatro tipos principales (UNEP 2016): polietileno (PE) (ej: bolsas de plástico, láminas y películas de plástico, contenedores (incluyendo botellas), microesferas de cosméticos y productos abrasivos); polyester (PET) (ej: botellas, envases, prendas de ropa, películas de rayos X, etc.); polipropileno (PP) (ej: electrodomésticos, muebles de jardín, componentes de vehículos, etc.); y cloruro de polivinilo (PVC) (ej: tuberías y accesorios, válvulas, ventanas, etc.).

La mayor parte de los plásticos se emplean en la fabricación de envases, es decir, en productos de un solo uso. En concreto en Europa la demanda de plásticos para envases fue del 39% en 2013 y en España ascendió al 45% (Plastics Europe 2015).

Como se puede apreciar en la tabla 4, los plásticos tardan demasiado tiempo para ser degradados en el medio ambiente, de tal modo son considerados la basura del océano.

Tabla 4 - Plásticos: Cuanto tiempo tardan en degradarse

Aplicación	Tiempo	El mismo tiempo que hace que...
Hilo de pesca	± 600 años	Colón llegó a América (1492)
Botella	± 500 años	Hernán Cortés llega a Tenochtitlán (1547)
Cubiertos	± 400 años	Galileo Galilei dijo: "la Tierra es redonda" (1630)

Encendedor	100 años	Se inició la revolución mexicana (1910)
Vaso	65-75 años	Se crea el IMSS (1943)
Bolsa	55 años	Gustavo Díaz Ordaz es elegido presidente de México (1964)
Suela de zapato	10-20 años	1er celular con pantalla a color (2000)
Colilla	1-6 años	Renuncia del Papa Benedicto XVI (2013)
Globo	6 meses	Año nuevo (2018)

ADAPTADO DE:
Plásticos en los océanos – Datos, comparativa e impactos. GREENPEACE ESPAÑA. 2016

1.5 ¿Qué son los materiales compuestos?

Un material compuesto está conformado por la combinación de dos o más materiales para obtener una combinación de sus propiedades. Esta definición es muy generalizada y pueden verse envueltos también aleaciones minerales, metálicas, plásticas entre otros. La idea de los compuestos no fue inventada por los humanos, es más bien algo que se encuentra en la naturaleza, por ejemplo, la madera que es una combinación de fibras de celulosa en una matriz natural de pegamento llamada lignina. Otro ejemplo son los exoesqueletos de invertebrados, como tarántulas, escorpiones, hormigas, entre otros; estos también son considerados material compuesto en el cual pueden estar conformados por matrices de quitina y en algunos casos se presentan refuerzos de carbonato de calcio. Científicos han encontrado que las fibras de las telarañas (cadenas de L-Glicina, L-Alanina y L-Prolina) son tan fuertes como las fibras sintéticas, llegando a ser hasta 5 veces más resistente por unidad de masa en comparación al Kevlar o al acero (Römer y Scheibel 2008). En India, Grecia y otros países a partir de la edad de bronce, cascara vegetales y paja han sido mezcladas con barro para construir casas, la adición de estos materiales y fibras le proporcionan un mejor desempeño mecánico al barro.

Dado que los materiales compuestos combinan matrices (comúnmente resinas) con fibras o partículas de refuerzo, las propiedades del material compuesto resultan en la adición de las propiedades de cada uno de sus componentes.

Las propiedades de un material compuesto están determinadas por lo siguiente:

- Las propiedades del refuerzo.
- Las propiedades de la matriz.
- Su relación entre la cantidad de refuerzo y resina-matriz en el material (%wt).

- La distribución y orientación del refuerzo en la matriz.

La mayoría de los materiales compuestos poseen una alta resistencia mecánica al mismo tiempo que una baja densidad, esto favorece su aplicación para la fabricación de estructuras y dispositivos resistentes y a la vez livianos; debido a que al utilizar una matriz polimérica se logra una baja densidad; mientras que el refuerzo aporta la resistencia mecánica, en función del peso el material es menor comparado al 100% del refuerzo (Callister 1996).

En el diseño de este tipo de materiales se ha visto un problema considerable en relación con los altos costos y fabricación compleja, por lo que su aplicación en la práctica se ha visto contenida muchas veces debido a estos factores, a pesar de los beneficios en su uso.

1.6 Clasificación de los materiales compuestos

En la figura 4 se muestra un esquema simple para clasificar los materiales compuestos que, en esencia, consta de tres divisiones: reforzados con partículas, reforzados con fibras y estructurales.

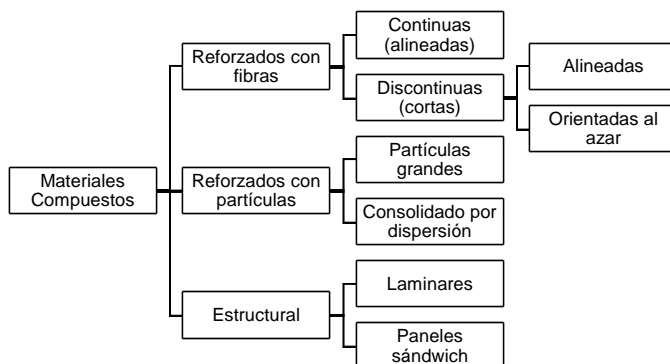


Figura 4. Clasificación de los materiales compuestos adaptado de Callister, 1996.

1.6.1 Materiales compuestos en función de su matriz

Existe una clasificación de los materiales compuestos en función de la naturaleza de su matriz:

- Compuestos de matriz polimérica: son los más comunes. También se les conoce como plásticos (polímeros) reforzados. La matriz es un polímero junto con una variedad de partículas o fibras según sea el caso, tales

como las de vidrio, las de carbono, metálicas, las aramídicas para su refuerzo.

- Compuestos de matriz metálica: su uso es cada vez mayor en la industria automotriz. Están conformados de manera laminar por metales livianos, el aluminio, como matriz y fibras de refuerzo como el carburo de silicio.
- Compuestos de matriz cerámica: se utilizan para aplicaciones en altas temperaturas. Están formados por una matriz cerámica y un refuerzo ya sea de fibras cortas, particulados o whiskers⁴ de carburo de silicio o nitruro de boro.

1.6.2 Materiales compuestos en función de su refuerzo

Es en la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad o característica que la matriz no posee. Comúnmente el refuerzo se utiliza para incrementar la rigidez y resistencia mecánica, pero también se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión, y en casos más recientes para aplicaciones piezo-eléctricas.

El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras, en general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz, o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra.

En la mayoría de los compuestos reforzados con fibras estas son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el compuesto debe ser utilizado a temperaturas elevadas, también la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. Por lo que la resistencia y el módulo específicos de la fibra son características importantes (Jones 1975).

1.7 Uso de materiales compuestos en ingeniería

Los materiales compuestos han sido rutinariamente diseñados y fabricados para aplicaciones donde su alto desempeño mecánico y su bajo peso, son necesarios.

⁴Monocristales cerámicos diminutos con bajos o nulos defectos de milímetros de largo y micras de diámetro.

Estos ofrecen grandes ventajas sobre los materiales de ingeniería convencionales las cuales se enlistan a continuación:

- Proveen capacidades para la integración por partes, muchos elementos metálicos pueden ser reemplazados por componentes de material compuesto.
- Los materiales compuestos tienen un alto valor de rigidez específica como se muestra en la tabla 5, los materiales compuestos (sombreados) ofrecen la rigidez del acero, pero con un quinto del peso del metal, así como también la misma rigidez del aluminio, pero a la mitad del peso.
- La resistencia específica de un material compuesto es alta, por este motivo las aeronaves y los automóviles pueden moverse más rápido, pero con una mayor eficiencia de combustible. La resistencia específica está situada típicamente en el rango de 3 a 5 veces más que el acero y aleaciones de aluminio. Por estos altos valores de resistencia y rigidez específica los materiales compuestos son más ligeros que sus contrapartes metálicas.
- Ofrecen gran viabilidad para el empleo de diseño para manufactura y diseño para ensamble. Estas técnicas ayudan a minimizar el número de partes en un producto y por lo tanto reducen el tiempo de ensamble y uniones de elementos.
- Se pueden fabricar productos bajo técnicas de inyección y formado de alta precisión, lo cual elimina muchas de las operaciones mecánicas necesarias cuando se utilizan metales u otros materiales en ingeniería lo cual reduce los costos y tiempos de fabricación (Gay 2014).

Tabla 5 Propiedades de algunos materiales en ingeniería

Material	Densidad ρ ($\frac{g}{cm^3}$)	Módulo de tensión E (GPa)	Módulo de fuerza σ (GPa)	Módulo específico (E/ ρ)	Esfuerzo específico (σ/ρ)	Max temperatura de servicio (°C)
Hierro, grado 20	7	100	0.14	14.3	0.02	230-300
Acero AISI 1045 rolado en caliente	7.8	205	0.57	26.3	0.073	500-650
Vidrio S/epoxy al 45%	1.81	39.5	0.87	21.8	0.48	80-215
Carbón/epoxy al 61%	1.59	142	1.73	89.3	1.08	80-215

ADAPTADO DE:

Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering. Mazumdar Sanjay. CRC Press. 2001.

1.7.1 Compuestos reforzados con partículas

Este tipo de compuestos se subdividen en reforzados con partículas grandes y consolidadas por dispersión como se mostró en la figura 4. Esta diferenciación es fundamental; el término “grande” se utiliza debido a que el comportamiento e interacción entre la matriz-partícula no se genera a nivel atómico o molecular, sino más bien se describe mediante medios continuos. En la mayoría de los particulados, la fase dispersa es considerablemente más dura y resistente que la matriz, debido a esto lo que sucede es que la fase dispersa tiende a restringir el movimiento de la matriz alrededor de las partículas. En otras palabras, para el caso de partículas grandes (Figura 6) la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales absorben un porcentaje importante de la carga, el grado de reforzamiento o mejora de la matriz debido a la fase dispersa, depende de la correcta adhesión y fuerza de cohesión en la intercara matriz-partícula (Callister 1996).

Para el caso de los consolidados por dispersión (Figura 5) las partículas son normalmente mucho más pequeñas: los diámetros efectivos están en el rango de 0.1-100 μm . Las interacciones matriz-partícula para estos materiales consolidados sí ocurre a nivel atómico o molecular; la mejora en propiedades mecánicas sucede debido a que si bien la matriz recibe la mayor parte de la carga, las diminutas partículas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones, dando una restricción considerable a la deformación plástica de tal manera que se incrementa la resistencia a la tracción, límite elástico y la dureza (Smith y Hashemi 2006).

Figura 5. Material consolidado por dispersión

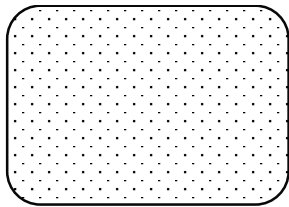
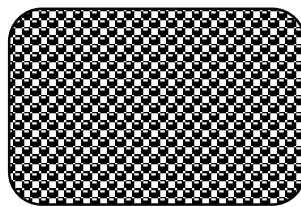


Figura 6. Material con partículas grandes



Como ejemplo de un caso de compuesto con partículas grandes es el hormigón, en este caso las fases matriz y dispersa son cerámicas. La estructura de este consta de un agregado de partículas (comúnmente grava y arena) unidas entre sí por cementos portland (Construcción de edificios) o asfáltico (pavimento) como se muestra en la figura 7.

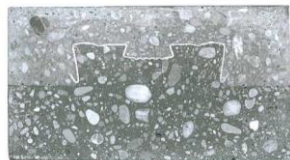


Figura 7. Hormigón con sus fases matriz-partícula

Para este trabajo el tipo utilizado es un compuesto consolidado por dispersión, debido al tamaño del hierro particulado utilizado tiene un tamaño del rango descrito anteriormente, así, el aspecto del material será como el descrito.

1.7.2 Compuestos reforzados con fibras

En términos tecnológicos los materiales con fases dispersas en forma de fibras son los más destacados; a menudo se diseñan con la finalidad de conseguir

elevada resistencia y rigidez a baja densidad. Los materiales compuestos reforzados con fibras se subclasifican por longitud de fibra (Callister 1996).

Las principales funciones de las fibras en un material compuesto son:

- Distribuir la carga: en un material compuesto de aplicación estructural desde el 70 % hasta el 90 % de la carga es soportada por las fibras.
- Proveer de resistencia, fuerza, estabilidad térmica y otras propiedades estructurales al compuesto.
- Proveer de conductividad o aislamiento eléctrico, dependiendo de lo que se busque con el compuesto.

1.8 Áreas de oportunidad para los materiales compuestos

Los materiales compuestos ofrecen múltiples beneficios, sin embargo, se tienen las siguientes situaciones específicas en las cuales todavía existe un campo de mejora:

- El costo es elevado en comparación con el acero y el aluminio. Por lo menos de entre 5 a 20 veces más caro que el aluminio y acero en relación con su peso. Por ejemplo, la fibra de vidrio tiene un costo de entre \$18 MXN hasta \$780 MXN por kg, el costo de la resina epoxi para su aplicación es aproximadamente de \$60 por kg; mientras que la fibra de carbón preimpregnada con resina varía entre \$480.00 MXN hasta \$1 200.00 MXN por kg; por el contrario, el costo del acero varía desde \$50.00 MXN hasta \$2 000.00 MXN por kg y el aluminio entre \$2.50 MXN y \$18.00 MXN el kg. Lo anterior es una clara señal de que la apuesta en materiales reciclados puede ser la clave para el abaratamiento de costos de los materiales compuestos.
- Resistencia a los solventes, resistencia a los ataques químicos, agrietamiento por fatiga, ya que este depende del polímero elegido. Algunos polímeros tienen baja resistencia al estrés ambiental.
- Los métodos clásicos de diseño para productos de metal dependen del uso de la maquinaria y de los manuales de tratamiento para metales, diseños y bases de datos de las características de los diferentes metales las cuales son ampliamente conocidas y estudiadas, así como de fácil disposición y aplicación. Sin embargo, esto no sucede con los materiales compuestos debido a la aún escasa información, libros, artículos y bases

de datos con las características de las diferentes combinaciones existentes.

- La resistencia a la temperatura de los compuestos depende de la resistencia a la temperatura de la matriz. Debido a que se usan en gran medida matrices poliméricas que dictan las propiedades térmicas del compuesto final. La tabla 6 muestra las temperaturas máximas para uso continuo de estos y otros polímeros (Chiellini y Solaro 2003).

Tabla 16 Temperaturas máximas de uso continuo para termoplásticos y termofijos.

Material	Máxima temperatura de uso continuo (°C)
TERMOFIJOS	
Viniléster	60-150
Poliéster	60-150
Fenoles	70-150
Epoxi	80-125
Cianato esteres	150-250
Bismaldeidos	230-320
TERMOPLÁSTICOS	
Polietileno	50-80
Polipropileno	50-75
Acetal	70-75
Nylon	75-100
PPS	70-120
PEEK	120-220
Teflón	120-250

ADAPTADO DE:
Biodegradable Polymers and Plastics. Chiellini, Emo; Solaro, Roberto. USA: Kluwer Academic.2003. p.395.
<http://www.ensinger.es/es/>, Ficha técnica de materiales. México

1.9 Principales procesos de manufactura del plástico

Todo proceso de manufactura de cualquier termoplástico involucra las siguientes etapas: plastificación, moldeado o conformado, y enfriamiento. En la ilustración 2 se aprecia el diagrama que envuelve dichas operaciones básicas.

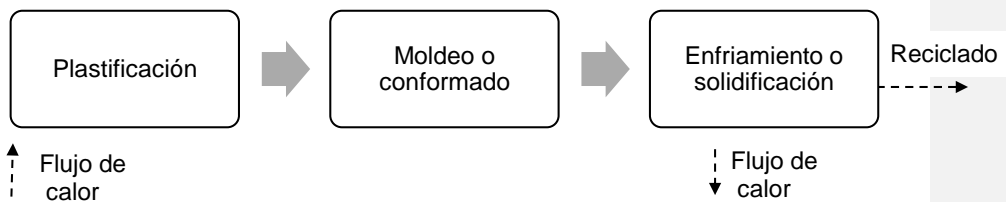


Ilustración 3. Etapas en el procesamiento de polímeros termoplásticos

La alta viscosidad de los polímeros en el moldeo origina altos esfuerzos cortantes en el proceso, lo que da lugar a una gran disipación térmica. Esto puede ser usado positivamente al reducir la cantidad de calor que se debe añadir para su trabajo, sin embargo, se requieren altas presiones y la necesidad de emplear maquinaria ampliamente robusta.

Dado que los termoplásticos se comportan como fluidos no newtonianos al estar fluyendo, la viscosidad de éstos disminuye al aumentar la velocidad de deformación, lo cual es ventajoso en procesos que requieren alta resistencia mecánica, como lo son (estirado de fibras, soplado de película, soplado de botellas, etc.).

Explicadas las bases para el entendimiento de su manufactura, es necesario mencionar los principales procesos de manufactura, así como lo más importante de su tecnología.

- Extrusión: Proceso continuo para la fabricación de materiales de sección constante, tales como: tubos, perfiles, planchas, etc. El material es forzado mediante un tornillo giratorio a través de una apertura con el perfil deseado, llamado dado de extrusión. Una vez el material está fuera del dado, puede ser enfriado para mantener esa forma o tener procesos subsecuentes.
- Moldeo por inyección: Uno de los más comunes para artículos de plástico, el material es conducido a una máquina inyectora, la cual lo plastifica y luego lo inyecta mediante un sistema hidráulico-neumático a través de un tornillo helicoidal hacia una cavidad cerrada llamada molde. El molde presenta la forma de la pieza deseada, el plástico se solidifica en el molde para después ser retirado.

- Moldeo por soplado: Proceso utilizado para producir objetos huecos, con una sola apertura de menor tamaño que el diámetro mayor del objeto, lo más usual son las botellas. Este método está basado en el antiguo arte del vidrio soplado.
- Calandrado: Proceso empleado para fabricar filmes o películas de plástico. Se hace pasar la materia prima a través de una combinación de rodillos calientes. La configuración más usual es de 4 rodillos con 3 pasos de material.
- Termoformado: En este proceso, una lámina de plástico es calentada y suavizada. Por medio de vacío o presión externa, la lámina es ajustada y tensada a un molde con el perfil deseado, dicha lamina es enfriada en el molde para que adopte completamente su forma. Los moldes pueden ser cóncavos o convexos (Torres García 2009).

A continuación, se describe con mayor detalle el proceso utilizado para la fabricación de las probetas el cual fue extrusión y posterior moldeo por compresión.

1.10 Extrusión

Es un proceso continuo, en el que la resina es fundida por la acción de la temperatura y fricción. Es forzada a pasar por un dado que le proporciona una forma definida y enfriada finalmente para evitar deformaciones no deseadas. Se fabrican por este proceso: tubos, perfiles, películas, mangueras, lámina, filamentos y pellets.

Básicamente, una extrusión consta de un eje metálico central con álabes helicoidales llamado husillo o tornillo, instalado dentro de un cilindro metálico revestido con una camisa de resistencias eléctricas. Independientemente del tipo de extrusión que se quiera analizar, todos guardan similitud hasta llegar al dado del extrusor como se muestra en la figura 8.

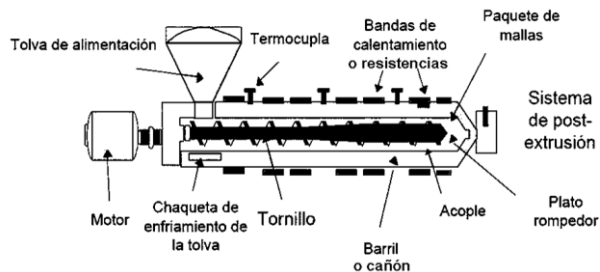


Figura 8. Partes principales de un extrusor (IMPI 1997)

En la imagen anterior, en el extremo izquierdo se encuentra la tolva de alimentación, generalmente de forma cónica, que almacena la resina a usar. Debajo de ella se encuentra un orificio de entrada de materia prima (garganta), en ese mismo extremo se encuentra el sistema de accionamiento del husillo, compuesto por un motor (acoplamiento) y un sistema de reducción de velocidad (caja de engranes).

En la sección media del extrusor se puede observar que el husillo atraviesa el barril prácticamente de izquierda a derecha. Los extrusores pueden contar con un solo tornillo (monohusillo) o con tornillos (doble husillo) en el barril (Figura 9). En esta sección se hallan las resistencias eléctricas, encargadas de calentar la resina mientras esta avanza por el barril, que usualmente varía su sección transversal de mayor a menor para así generar una mayor presión y fricción con la resina y de esta manera poder llevarla a su temperatura de transición vítrea. Por último, se tiene el dado que es el que le dará la forma a la resina extruida (Ramos 1993).

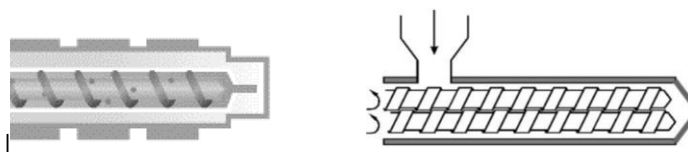


Figura 9. Extrusor monohusillo (izquierda), extrusor doble husillo (derecha). (Da tu opinión 2011)

1.10.1 Ventajas de la Extrusión

Con este proceso se generan productividades altas y es el más importante para la obtención de formas plásticas en grandes volúmenes. Su operación es de las

más sencillas, ya que, una vez establecidas las condiciones de trabajo, la producción continúa sin problemas siempre y cuando no exista un disturbio o afectación mayor del proceso. El costo de la maquinaria para extrusión es moderado, en comparación con la maquinaria para los procesos de inyección, soplado o calandrado, y con una buena flexibilidad para cambios de productos sin necesidad de hacer inversiones mayores.

1.10.2 Restricciones de la Extrusión

La restricción principal es que los productos obtenidos por extrusión deben tener una sección transversal constante en cualquier punto de su longitud (tubo, lámina) o ser periódica (tubería corrugada). Quedan fuera la posibilidad de obtener formas irregulares o no uniformes. La mayor parte de los productos obtenidos de una línea de extrusión requieren procesos posteriores con el fin de habilitar y acondicionar debidamente el artículo, tales son el sellado y el cortado, obtención de bolsas a partir de película tubular o la formación de uniones para tuberías (IMPI 1997).

1.10.3 Extrusión monohusillo

En un extrusor monohusillo la rotación del husillo no es, por sí sola, capaz de transportar el material hacia adelante. De hecho, si el material que se encuentra en el interior del barril se adhiere al husillo, el material dará vueltas junto con el husillo, sin moverse hacia adelante.

Para ser transportado hacia adelante, el material no debe girar junto con el husillo, o al menos debe girar a una menor velocidad que el husillo. La única fuerza que puede evitar que el material dé vueltas junto con el husillo, por tanto, hacer que el material avance a lo largo del barril, es la fuerza de arrastre o fricción entre el material y la superficie interna del barril. A mayor fricción menor rotación del material junto con el husillo y por tanto más movimiento hacia adelante (Ramos 1993).

CAPÍTULO II. Diseño de materiales y análisis teórico

2.1 Aspectos teóricos del análisis mecánico

2.1.1 Normatividad: Probetas y ensayos mecánicos

El presente trabajo evalúa las propiedades mecánicas de un material compuesto mediante ensayos de tensión, impacto y dureza, permitiendo así su caracterización bajo el uso de las siguientes normas:

- *ASTM D6110* Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics
- *ASTM D638* Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
- *ASTM D2240* Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness

Estas normas son esenciales para el desarrollo y fabricación de especímenes (probetas), ya que son las guías oficiales que regulan las características geométricas que deben tener dichos especímenes que posteriormente serán analizados, así como los lineamientos para realizar los ensayos de manera estandarizada y el uso de ecuaciones para fines comparativos.

Para la realización de la prueba de impacto se utilizó el equipo que se encuentra en el laboratorio de metrología en la facultad de ingeniería de la UAEMex.

Mientras que, para el ensayo de tensión y dureza, se realizaron en la Unidad Académica Profesional de Santiago Tianguistenco de la UAEMex, en el laboratorio de pruebas.

2.1.2 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión, también llamado tracción mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza F , que se conoce como carga, el avance para dicha carga es medido comúnmente en mm/min y se continúa con la prueba hasta que la probeta llega a la fractura (Figura 10).

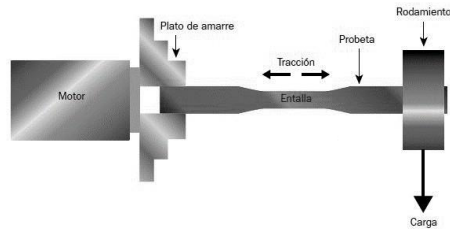


Figura 10. Detalles para el ensayo de tracción

Esta prueba permite determinar diversas características de materiales elásticos como son:

- Esfuerzo de fluencia.
- Carga de fluencia.
- Módulo de Young.
- Deformación unitaria.
- Carga a la rotura.

De la información más relevante de esta prueba es la denominada curva tensión-deformación, que muestra el alargamiento entre dos puntos de la probeta en función de la carga aplicada a la misma; en general se presentan cuatro zonas principales de análisis mecánico, tal como se muestra en la figura 11 y se describen a continuación.

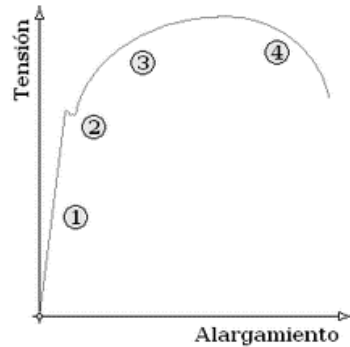


Figura 11. Curva tensión-deformación

1. Deformaciones elásticas: las deformaciones en esta zona tienen la característica de que, al retirarse la carga aplicada, la probeta regresará a su forma original. De esta zona es posible determinar el módulo de Young, característico de cada material.

2. Fluencia o cedencia: es el momento en el que la probeta sufre una deformación brusca sin incremento de la carga aplicada. No todos los materiales presentan este fenómeno, en algunos la transición entre elástico y plástico del material no se aprecia de forma clara.
3. Deformaciones plásticas: si la carga es retirada de la probeta, esta solo recuperará parcialmente su forma, quedando deformada permanentemente. Estas deformaciones son más notorias que en la zona elástica.
4. Estricción: una vez iniciadas las deformaciones plásticas se llegará al punto donde las concentraciones se ubicarán en la parte central de la probeta debido a su geometría, apreciándose como una notable reducción en su sección transversal. Estas deformaciones continuarán hasta el punto en el que la probeta se rompa por esta zona. El descenso en la curva se generó debido a que la sección transversal disminuye y el material ya no presenta la misma restricción al movimiento que antes. El ensayo se termina al momento de la rotura, a partir de lo cual se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción (Ortiz 2007).

2.1.3 Ensayo de impacto

El ensayo dinámico es realizado para evaluar la capacidad de resistencia de materiales a las cargas de impacto (tenacidad) y determinar su tendencia a la destrucción frágil. Entre estos ensayos los más conocidos son los ensayos a flexión con muestras ranuradas. La velocidad de deformación, en el caso de los ensayos dinámicos, supera varios órdenes a la velocidad de deformación de los ensayos estáticos.

Para la realización de este ensayo se utiliza un péndulo Charpy, con una energía disponible de 2.94 MPa ($30 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$). El esquema de la prueba se muestra en la Figura 12.

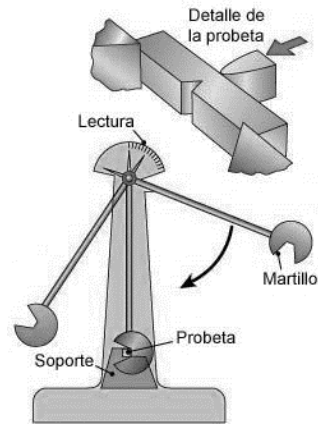


Figura 12. Esquema de prueba Charpy (Ortega 2009)

La probeta se coloca de manera horizontal en un patrón especial que garantiza la colocación centrada de la misma, en el cual la muesca queda alineada con la zona de impacto del péndulo. El impacto se realiza en el lado contrario de la muesca, en un plano perpendicular al eje longitudinal de la probeta.

El péndulo tiene una altura y ángulo (α) iniciales definidos, al retirarse el seguro de fijación, el péndulo cae libremente por efecto de la gravedad aplicando un impacto a la muestra, que la flexiona y fractura, posterior a ello el péndulo sigue su trayectoria y en relación con el eje vertical del péndulo Charpy con un ángulo β (Figura 13). Mientras más pequeño sea este ángulo, mayor será la energía absorbida por el material en prueba mediante la flexión y fractura de éste. Una vez impactada la probeta, se toma el registro arrojado por la caratula de la máquina la cual nos permite conocer la energía absorbida por el impacto.

Se usó el péndulo en el rango de energía potencial disponible de 30 kgf a una altura vertical (h) para la caída del péndulo de 500 mm, ángulo de lanzamiento $\alpha=78^\circ$ y una longitud del pivote al centro de masa (L) de 0.634m (Figura 13), haciendo los cálculos correspondientes para conocer la energía potencial de la máquina (Ecuación 1), se tiene:

$$\text{Joule (J)} = \text{Fuerza} * \text{Distancia}$$

$$J = N * m \quad (1)$$

Se tienen unidades de kgf, por tal motivo se multiplica por el valor de la gravedad para obtener la fuerza disponible en Newtons (N) al momento del impacto (Ecuación 2).

$$N = \text{kgf} * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \quad (2)$$

$$N = (30 \cdot \text{kgf}) * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 294.3 \cdot \text{N}$$

Y para obtener la energía potencial disponible retomamos la ecuación 1.

$$J = (294.3 \cdot \text{N}) * (0.5 \cdot \text{m})$$

$$J = 147.1 \text{ N} \cdot \text{m} = 147.1 \cdot \text{J}$$

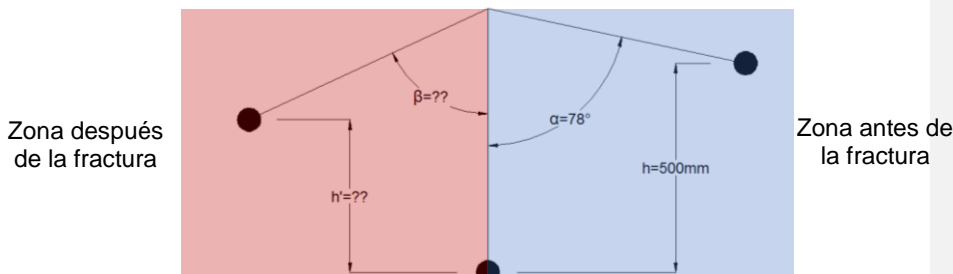


Figura 13. Cálculo de alturas resultantes

La energía absorbida en el impacto por la probeta usualmente se calcula como la diferencia de alturas inicial y final del péndulo la cual es directamente proporcional por los kgf de la masa, esto supone, obviamente despreciar algunas pérdidas por rozamiento.

Es necesario conocer la inercia que presenta la barra para el análisis de impacto, por lo cual se tiene la ecuación 3:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{3} \quad (3)$$

$$I = \frac{12.7\text{mm} \cdot (10.16\text{mm})^3}{12} = \frac{13319.4\text{mm}^4}{12} = 1109.5\text{mm}^4$$

Considerando que el área de trabajo de la probeta será la sección entallada, el cálculo se genera con base en la figura 14, tomando como nuestra altura funcional la altura entallada.

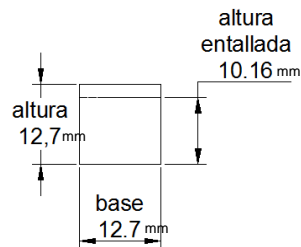


Figura 14. Dimensiones de sección probeta impacto

2.1.4 Ensayo de dureza

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación con el método particular que se utiliza para la determinación de su valor. De esta manera algunas definiciones son:

- Resistencia a la inserción permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración).
- Absorción de energía bajo cargas de impacto o dinámicas (dureza por rebote).
- Resistencia a la abrasión (dureza por desgaste).
- Resistencia al rayado (dureza por rayado).

Independientemente de las definiciones enlistadas, en general, se entiende por dureza la propiedad que tienen los materiales de resistir la penetración de un indentador bajo carga (Gonzales; Palazon, 1973). En este sentido definiremos dureza como la *resistencia de un material a la deformación plástica localizada*. Es importante resaltar que los valores obtenidos por un método no deben ser comparados con los obtenidos por cualquier otro método de medición de dureza, pero pueden ser empíricamente correlacionados. De hecho, existen tablas que correlacionan distintos tipos de dureza con valores de resistencia en tensión de distintos materiales. Debido a lo anterior, cuando el durómetro Shore A obtiene lecturas superiores a 90°, se recomienda el empleo del durómetro Shore D, que dispone de una punta cónica y de un resorte más rígido. Ambos métodos están

descritos en la norma española UNE 53130, la americana ASTM D2240 y la alemana DIN 53505. Se muestra en la tabla 7 la clasificación por tipo de material a probar para la elección del tipo de prueba.

Tabla 7 Tipo de ensayo Shore acorde al material de interés

Shore A <i>DIN 53505</i>	IRHD ⁵ <i>ASTM D 1415</i>	Shore D <i>DIN 7619-1</i>
100	100	62
95	95	46
90	90	39
85	85	33
80	80	29
75	74	25
70	68	22
65	64	19
60	62	16
55	54	14
50	49	12
45	44	10
40	39	8
35	35	7
30	28	6
Elastómeros compactos y celulares	Elastómeros compactos	Poliuretanos, PTFE rígido, PP, PEBD y elastómeros muy duros

ADAPTADO DE:

(CPI PRODYSOL s.f.), Apartado para Durezas Shore, <https://www.cpisefa.com/dureza-shores/>

Para la determinación de la dureza de los plásticos, Albert Shore desarrolló en 1915 un procedimiento sumamente sencillo: Se presiona contra el objeto de ensayo un lápiz metálico endurecido sostenido por un resorte con una forma definida. Según la profundidad de la impresión, dicho material será más o menos duro. Este procedimiento está descrito en la norma DIN ISO 7619-1:2012.

En la actualidad se utilizan dos tipos de aparatos: Instrumentos de medición mecánicos con indicador de arrastre e instrumentos de medición electrónicos. Para el ensayo de dureza del presente trabajo se utilizó un durómetro para prueba Shore D electrónico Marca Mitutoyo conforme a la ASTM D2240 (Figura 15).

⁵Graduación Internacional de dureza de goma



Figura 15. Durómetro Shore D

Como se mencionó anteriormente, la determinación de la dureza de un material no es cuantitativa sino cualitativa, debido a que depende totalmente de las características propias del material, en el caso de los materiales compuestos por dispersión es básico comprender que la dispersión de las partículas de Fe en la matriz de PEBD y PEBDR no es realmente homogénea y que existirán zonas con grados ligeramente por arriba o por abajo del promedio del total. Por tal motivo se procedió a tomar la dureza en tres zonas diferentes de la probeta, en la Figura 16 se ilustran las tres áreas para la toma de la dureza, las cuales en las tablas de resultados (Tablas 3.6 y 3.7) se registraron para sacar el promedio por porcentaje de concentración. b

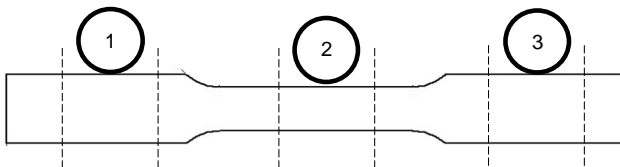


Figura 16. Zonas para la toma de dureza

2.1.5 Esfuerzo de Fluencia

Indicación del esfuerzo máximo que se puede desarrollar en un material sin causar una deformación plástica. Es el esfuerzo en el que un material exhibe una deformación permanente especificada y es una aproximación práctica de límite elástico. El límite elástico convencional está determinado a partir de un diagrama carga-deformación. Se trata del esfuerzo que corresponde a la intersección de la curva de carga-deformación y una línea paralela a la parte aproximadamente lineal del diagrama por una deformación especificada. El desplazamiento de los

metales suele especificarse como un 0.2 %; es decir, la intersección de la línea de desplazamiento y el eje de esfuerzo σ está en la deformación 0.2 %. Normalmente, la deformación de los plásticos es el 2% (ASTM E8-04 2004).

2.1.6 Carga de fluencia

La carga de fluencia es la fuerza presentada en el momento cuando la probeta empieza a deformarse sin una proporción lineal y comienza a partir de este punto la deformación plástica. Hay que tener en cuenta que esta característica depende mucho del material a probar, así como la sensibilidad de los aparatos con los que se está midiendo. Para materiales vírgenes la deformación plástica que sufren es a partir del 2 %, mientras que para la mayoría de los metales ronda del 0.2 % al 1.1 %, debido a lo anterior para el caso de los plásticos la reducción en su sección transversal es un factor determinante para su carga la fluencia, ya que esta les permite una mayor adaptabilidad a los esfuerzos presentados en el material (Dowling 2007).

2.1.7 Módulo de Young

Se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. Si el esfuerzo es una tensión o una compresión, el módulo se denomina módulo de Young y tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión (materiales rígidos), siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico. Tanto el módulo de Young como el límite elástico son naturalmente distintos para los diversos materiales.

El hecho de que la variación de deformación unitaria sea directamente proporcional a la variación de esfuerzo, siempre que no se sobrepase el límite elástico, se conoce como ley de Hooke (Meirovitch 1976), gráficamente a la recta tangente (Figura 17) en cada punto de la zona elástica en la gráfica tensión-deformación (σ - ϵ) obtenida del ensayo de tensión.

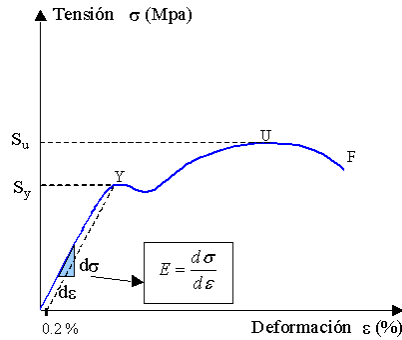


Figura 17. Interpretación gráfica del Módulo de Young

En muchos casos el módulo de elasticidad es constante durante la zona elástica del material, indicando un comportamiento lineal del mismo (ley de Hooke). La ley de Hooke establece que, en un material elástico sometido a una única fuerza en una dirección, la deformación longitudinal unitaria (ϵ) en dicha dirección es proporcional a la tensión aplicada (σ) resultante de dicha fuerza (Hibbeler 1998):

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

El módulo de elasticidad indica la rigidez de un material: cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad.

2.1.8 Deformación unitaria

La deformación (δ) se refiere a los cambios dimensionales de un miembro estructural cuando este se encuentra sometido a cargas externas (Figura 18). Estas deformaciones son analizadas para elementos estáticos cargados axialmente, por lo que las cargas de interés son las de tensión o compresión.

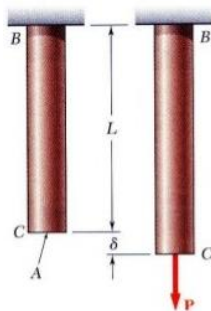


Figura 18. Elemento estático deformado por un esfuerzo axial

La deformación unitaria (ϵ) se puede definir como la relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, la cual permitirá determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos ya sean de tensión o compresión axial (Gonzales; Palazon, 1973).

2.1.9 Carga a la Rotura

Se le denomina Carga a la rotura a la máxima tensión que un material soporta bajo tensión, antes que su sección transversal se genere una contracción de manera significativa. Comúnmente esta se obtiene por ensayos de tensión, registrando el esfuerzo producido en el material, así como la deformación sufrida por el mismo, esto genera la curva esfuerzo-deformación (Figura 11) que en el punto más alto de esta se encuentra la tensión de rotura. Es una propiedad intensiva, por lo tanto, su valor no depende del tamaño de la muestra, sino de otros aspectos, como lo son la preparación del material, la presencia o no de defectos superficiales o internos, temperatura del medio ambiente, así como del material en sí (Ortiz 2007).

2.2 Materiales e instrumentos

Para el desarrollo y diseño de materiales, se tiene que considerar varios factores; como lo son la cantidad de probetas a probar, los materiales base, los procesos de producción utilizados y proceso de fabricación.

Se utilizó PEBD virgen marca PEMEX, PEBD reciclado facilitado por una empresa fabricante de bolsa de polietileno, limadura de hierro facilitada por el Laboratorio de Manufactura de la Facultad de Ingeniería (LMFI), extrusor de husillo simple marca BRABENDER®, prensa hidráulica marca CARVER®, solera de $\frac{3}{4}$ " de duraluminio (para la elaboración de moldes), recipiente para mezclar, báscula electrónica y agitador (Tabla 8 y 9).

Tabla 8 Propiedades generales y mecánicas de los materiales

Material	Presentación	Marca	Prop. Mecánicas
PEBD virgen	Pellets	PEMEX	E.PEBD= 0.225 GPa ρ . PEBD= 0.92 g/cm ³ v. PEBD = 0.29
PEBD reciclado	Pellets	Donación	E.PEBDR= 0.325GPa ρ . PEBDR= 1.183 g/cm ³ v. PEBDR = 0.31
Limadura de hierro	Particulado	NA	E. Fe= 190 GPa ρ . Fe= 7.87 g/cm ³









			v. Fe = 0,29
Aluminio 6061	Solera ¾"	La paloma	ρ. Al6061= 2.7 g/cm ³ HBW=100-120 Límite elástico=225MPa

FUENTE: (Callister 1996), (La Paloma s.f.)

Para la determinación de la densidad, el PEBD virgen cuenta con amplia literatura para conocer su valor, por otro lado, el PEBDR depende exclusivamente de los lotes de reciclado de los que proviene, por tal razón se generó un cálculo simple para determinar su densidad. Se conoce el volumen de las probetas, por lo que solo hace falta determinar la masa al 100% de PEBDR y realizando la división de masa/volumen se determina su densidad, con lo anterior se tomó el registro de la báscula granataria tomando una lectura de 10.06 g, por lo que queda:

$$\rho_{\text{PEBDR}} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{10.06\text{g}}{8.5\text{cm}^3} = 1.183 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Tabla 9 Equipo utilizado

Instrumento/Equipo	Marca	Imagen	Instrumento/Equipo	Marca	Imagen
Extrusor mono husillo	Brabender®		Vasos medidores	N/A	N/A
Máquina universal de tensión	Instron®		Recipientes para mezcla	N/A	N/A
Prensa hidráulica	Carver®		Guantes aislantes	N/A	
Máquina para prueba de impacto Charpy	N/A		Lentes de seguridad	N/A	
Báscula granataria	Labessa		Calibrador vernier	Mitutoyo	

La importancia de la correcta formulación radica en el hecho de buscar un sistema reproducible y replicable de los compuestos estudiados en futuras aplicaciones, uno de estos puntos es el muestreo a fin de realizar nuestros diferentes ensayos, los cuales nos proporcionan la información necesaria para conocer a nuestro material.

2.2.1 Muestreo para los ensayos

El muestreo para el número de probetas a realizar es extraído de las normas *ASTM D6110 “Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics”*, *ASTM D638-99 “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”*, *ASTM D2240 “Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness”* y Rupinder Singh *“Waste management by recycling of polymers with reinforcement”*. Para fines de la presente investigación se trabajó con los números mínimos de probetas solicitadas por los anteriores mencionados. Por lo anterior se tratará de caracterización piloto, por lo que para trabajos posteriores será necesaria extender el número de probetas a someter para obtener resultados mas generalizados a los compuestos. En la tabla 10 se muestran las probetas minimas utilizadas en los que se baso el muestro para este trabajo.

Tabla 10 Muestreo de los trabajos base

ESCRITO	PROB DE TENSIÓN (MIN)	PROB DE TENSIÓN (MIN)	PROB DE DUREZA (MIN)
ASTM 6110	4	NA	NA
ADTM D638	NA	3	NA
ASTM D2240	NA	NA	3 puntos de dureza
RUPINDER SINGH	4	4	NE

Con los datos anteriores, el presente trabajo genera una caracterización piloto para ambas familias de compuestos, lo anterior debido a que no se generan tantas probetas de prueba para establecer parámetros estadísticos más rigurosos para las propiedades finales de los compuestos, por lo que se sugiere que para trabajos futuros se elabore una mayor cantidad de probetas para que ya pueda ser documentada como una caracterización completa de los materiales.

2.3 Formulación teórica del compuesto

Para la formulación y predicción teórica de las propiedades mecánicas del compuesto particulado, se utilizó la denominada “regla de mezclas” que es la sumatoria de las propiedades (densidad, dureza, índice de refracción, módulo de elasticidad, etc.) por la fracción volumétrica del constituyente, que nos permite predecir de manera teórica las propiedades antes mencionadas (Askeland y Phulé 2004). Se recurrió a lo expuesto previamente en la literatura, recordando que se tendrán 5 diferentes concentraciones para la formulación del compuesto, tanto con PEBD y PEBDR. A continuación, se muestra la fórmula general para la regla de mezclas (Ecuación 4).

$$C = C_m \cdot f_m + C_r \cdot f_r \quad (4)$$

Donde:

C_m =Característica a evaluar matriz

C_r =Característica a evaluar refuerzo

f_m = Fracción volumétrica matriz

f_r = Fracción volumétrica refuerzo

2.3.1 Masa teórica de las probetas en función del %wt

Como la fabricación de las probetas se genera en lotes completos, se establecieron los porcentajes de concentración deseados en peso (%wt) los cuales son 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de material. Debido a lo anterior se tienen los siguientes cálculos para el mezclado de material para verter en el extrusor por cada porcentaje mostrados en la tabla 11. Tomando en consideración que cada probeta de tensión tiene un volumen total aproximado de 8.5 cm³, y la probeta de impacto un volumen total aproximado de 20.27 cm³; considerando mermas del proceso y alimentación de la extrusión.

Con la ecuación 5 se define la masa que se requiere agregar a la mezcla de polietileno, tomando en cuenta la densidad del material, el porcentaje en peso y el volumen de la probeta a llenar, de igual manera la ecuación 6 genera el mismo cálculo solo que para la limadura de hierro.

$$PEBD_{\%wt} = \rho_{PEBD} * (1 - \%wt) * V_{prob} \quad (5)$$

$$FE_{\%wt} = \rho_{FE} * \%wt * V_{prob} \quad (6)$$

Donde:

%wt =Porcentaje de concentración

ρ_{PEBD} = Densidad del PEBD
 ρ_{Fe} = Densidad de la limadura de hierro
 V_{prob} = Volumen de la probeta

Tabla 11 Masa a mezclar de los materiales con base en su densidad para probetas de tensión e impacto

Probetas de tensión al 0 %wt
$PEBD.100\% = \rho_{PEBD} * (100 - 0 \%wt) * V_{prob} = 7.82g$ $PEBDR.100\% = \rho_{PEBDR} * (100 - 0 \%wt) * V_{prob} = 10.06g$ $Fe.0\% = \rho_{Fe} * (0 \%wt) * V_{prob} = 0.0g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 7.82g Masa aproximada total probeta PEBDR = 10.06g
Probetas de tensión al 5 %wt
$PEBD.95\% = \rho_{PEBD} * (100 - 5 \%wt) * V_{prob} = 7.43g$ $PEBDR.95\% = \rho_{PEBDR} * (100 - 5 \%wt) * V_{prob} = 9.55g$ $Fe.5\% = \rho_{Fe} * (5 \%wt) * V_{prob} = 1.15g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 8.58g Masa aproximada total probeta PEBDR = 10.7g
Probetas de tensión al 10 %wt
$PEBD.90\% = \rho_{PEBD} * (100 - 10 \%wt) * V_{prob} = 7.04g$ $PEBDR.90\% = \rho_{PEBDR} * (100 - 10 \%wt) * V_{prob} = 9.05g$ $Fe.10\% = \rho_{Fe} * (10 \%wt) * V_{prob} = 2.30g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 9.33g Masa aproximada total probeta PEBDR = 11.34g
Probetas de tensión al 15 %wt
$PEBD.85\% = \rho_{PEBD} * (100 - 15 \%wt) * V_{prob} = 6.65g$ $PEBDR.85\% = \rho_{PEBDR} * (100 - 15 \%wt) * V_{prob} = 8.55g$ $Fe.15\% = \rho_{Fe} * (15 \%wt) * V_{prob} = 3.44g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 10.09g Masa aproximada total probeta PEBDR = 11.99g
Probetas de tensión al 20 %wt
$PEBD.80\% = \rho_{PEBD} * (100 - 20 \%wt) * V_{prob} = 6.26g$ $PEBDR.80\% = \rho_{PEBDR} * (100 - 20 \%wt) * V_{prob} = 8.04g$ $Fe.20\% = \rho_{Fe} * (20 \%wt) * V_{prob} = 4.59g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 10.85g Masa aproximada total probeta PEBDR = 12.63g
Probetas de tensión al 25 %wt
$PEBD.75\% = \rho_{PEBD} * (100 - 25 \%wt) * V_{prob} = 5.87g$ $PEBDR.75\% = \rho_{PEBDR} * (100 - 25 \%wt) * V_{prob} = 7.54g$ $Fe.25\% = \rho_{Fe} * (25 \%wt) * V_{prob} = 5.74g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 11.60g Masa aproximada total probeta PEBDR = 13.28g
Probetas de impacto al 0 %wt
$PEBD.100\% = \rho_{PEBD} * (100 - 0 \%wt) * V_{prob} = 18.65g$ $PEBDR.100\% = \rho_{PEBDR} * (100 - 0 \%wt) * V_{prob} = 23.98g$ $Fe.0\% = \rho_{Fe} * (0 \%wt) * V_{prob} = 0.0g$

Masa aproximada total probeta PEBD = 18.65g Masa aproximada total probeta PEBDR = 23.98g
Probetas de impacto al 5 %wt
PEBD.95% = $\rho \cdot \text{PEBD} \cdot (100 - 5 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 17.72g$ PEBDR.95% = $\rho \cdot \text{PEBDR} \cdot (100 - 5 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 22.78g$ Fe.5% = $\rho \cdot \text{Fe} \cdot (5 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 2.74g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 20.45g Masa aproximada total probeta PEBDR = 25.52g
Probetas de impacto al 10 %wt
PEBD.90% = $\rho \cdot \text{PEBD} \cdot (100 - 10 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 16.78g$ PEBDR.90% = $\rho \cdot \text{PEBDR} \cdot (100 - 10 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 21.58g$ Fe.10% = $\rho \cdot \text{Fe} \cdot (10 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 5.47g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 22.25g Masa aproximada total probeta PEBDR = 27.05g
Probetas de impacto al 15 %wt
PEBD.85% = $\rho \cdot \text{PEBD} \cdot (100 - 15 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 15.85g$ PEBDR.85% = $\rho \cdot \text{PEBDR} \cdot (100 - 15 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 20.38g$ Fe.15% = $\rho \cdot \text{Fe} \cdot (15 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 8.21g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 24.06g Masa aproximada total probeta PEBDR = 28.59g
Probetas de impacto al 20 %wt
PEBD.80% = $\rho \cdot \text{PEBD} \cdot (100 - 20 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 14.92g$ PEBDR.80% = $\rho \cdot \text{PEBDR} \cdot (100 - 20 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 19.18g$ Fe.20% = $\rho \cdot \text{Fe} \cdot (20 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 10.95g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 25.86g Masa aproximada total probeta PEBDR = 30.13g
Probetas de impacto al 25 %wt
PEBD.75% = $\rho \cdot \text{PEBD} \cdot (100 - 25 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 13.99g$ PEBDR.75% = $\rho \cdot \text{PEBDR} \cdot (100 - 25 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 17.98g$ Fe.25% = $\rho \cdot \text{Fe} \cdot (25 \%wt) \cdot V \cdot \text{prob} = 13.68g$
Masa aproximada total probeta PEBD = 27.66g Masa aproximada total probeta PEBDR = 31.67g

2.3.2 Densidad teórica del compuesto

La densidad de un material compuesto es función de las densidades de los materiales constituyentes y de sus proporciones en volumen usando la regla de mezclas. Los cálculos realizados para cada %wt propuesto con base en la ecuación 7 se muestran en la Tabla 12. (Tsai 1988).

$$\rho = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m \quad (7)$$

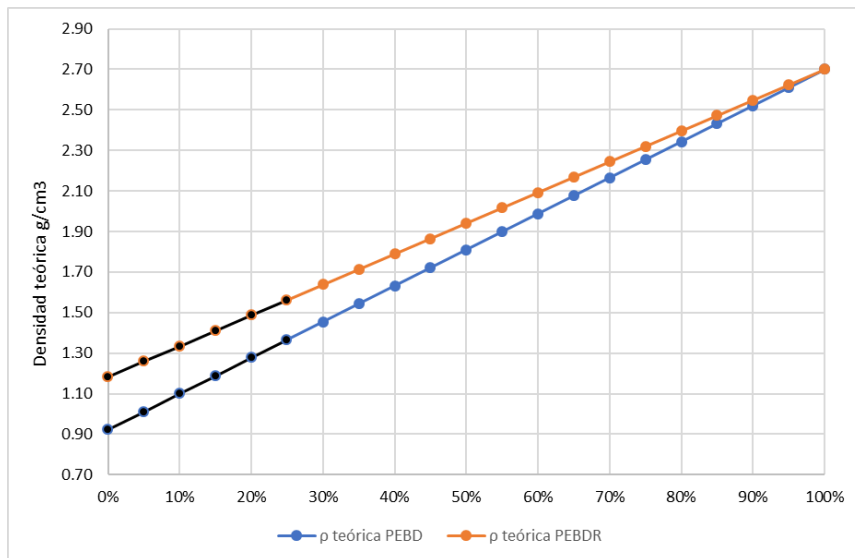
Donde:

ρ_r =densidad refuerzo
 ρ_m =densidad matriz
 V_r = fracción volumétrica refuerzo
 V_m = fracción volumétrica matriz

Tabla 12 Cálculo de la densidad teórica final del compuesto

Densidad teórica del compuesto base PEBD	ρ_t
$\rho_{.0\%wt} = \rho_{\text{PEBD}} * 100\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 0\%wt$	$\rho_{.0\%wt} = 0.92 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.5\%wt} = \rho_{\text{PEBD}} * 95\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 5\%wt$	$\rho_{.5\%wt} = 1.011 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.10\%wt} = \rho_{\text{PEBD}} * 90\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 10\%wt$	$\rho_{.10\%wt} = 1.10 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.15\%wt} = \rho_{\text{PEBD}} * 85\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 15\%wt$	$\rho_{.15\%wt} = 1.19 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.20\%wt} = \rho_{\text{PEBD}} * 80\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 20\%wt$	$\rho_{.20\%wt} = 1.28 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.25\%wt} = \rho_{\text{PEBD}} * 75\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 25\%wt$	$\rho_{.25\%wt} = 1.37 \text{ g/cm}^3$
Densidad teórica del compuesto base PEBDR	ρ_t
$\rho_{.0\%wt} = \rho_{\text{PEBDR}} * 100\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 0\%wt$	$\rho_{.0\%wt} = 1.18 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.5\%wt} = \rho_{\text{PEBDR}} * 95\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 5\%wt$	$\rho_{.5\%wt} = 1.26 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.10\%wt} = \rho_{\text{PEBDR}} * 90\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 10\%wt$	$\rho_{.10\%wt} = 1.33 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.15\%wt} = \rho_{\text{PEBDR}} * 85\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 15\%wt$	$\rho_{.15\%wt} = 1.41 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.20\%wt} = \rho_{\text{PEBDR}} * 80\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 20\%wt$	$\rho_{.20\%wt} = 1.49 \text{ g/cm}^3$
$\rho_{.25\%wt} = \rho_{\text{PEBDR}} * 75\%wt + \rho_{\text{Fe}} * 25\%wt$	$\rho_{.25\%wt} = 1.56 \text{ g/cm}^3$

Donde V_f , es la fracción volumétrica del refuerzo respecto a la matriz. Como podemos ver, la tabla 2.4, analizando que conforme la presencia del hierro aumenta, la densidad combinada del compuesto también lo hace, de tal manera tenemos una densidad teórica máxima para nuestro compuesto PEBD de $\rho_{\text{PEBD}.25 \%wt} = 1.37 \text{ g/cm}^3$ y $\rho_{\text{PEBDR}.25 \%wt} = 1.56 \text{ g/cm}^3$ (Gráfica 1). Cabe mencionar que en dicha gráfica se observan las concentraciones teóricas hasta un 100%wt Fe, sin embargo, para la realización de este trabajo solo se generaron probetas hasta un 25%wt Fe. Se remarcan en negro el rango al cual aplica el presente trabajo.



Gráfica 1 Densidad teórica del compuesto proyectada

2.3.3 Módulo de elasticidad teórico del compuesto

El módulo de elasticidad teórico (Ecuación 8 y 9) sirve para relacionar el módulo de elasticidad de la matriz con la fracción de volumen de las fases constituyentes de refuerzo. Dicha ecuación predice que el valor del módulo elástico tendrá un máximo dado por:

$$E_{cmax} = E_m * V_m + E_r * V_r \quad (8)$$

Al mismo tiempo se puede determinar un módulo de elasticidad mínimo dado por:

$$E_{cmin} = \frac{E_m E_r}{E_r V_m + E_m V_r} \quad (9)$$

Donde:

Er = Módulo de elasticidad refuerzo

Em= Módulo de elasticidad matriz

Vr = fracción volumétrica refuerzo

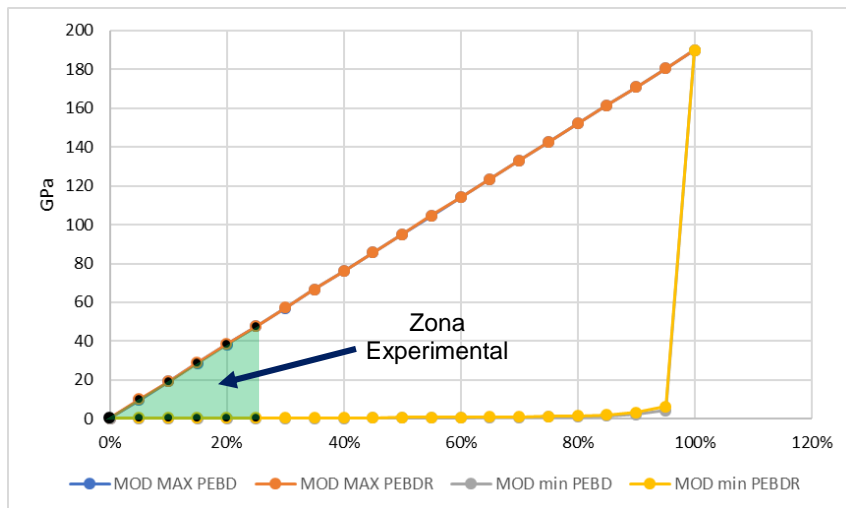
Vm= fracción volumétrica matriz

Los valores obtenidos se presentan en la tabla 13, para los valores esperados del módulo de elasticidad del compuesto, en este caso se hace la proyección gráfica a partir del 26 %wt Fe hasta el 100 %wt Fe para poder visualizar el comportamiento teórico a concentraciones mayores en el PEBD (Gráfica 2), sin embargo, las que se abarcan en este trabajo son únicamente hasta un 25 %wt

Fe. La zona verde en la gráfica marca el área donde se puede encontrar el módulo de elasticidad final del compuesto, recordando que se depende la buena dispersión de las partículas en la matriz.

Tabla 13 Cálculo del módulo de elasticidad máximo teórico del compuesto

Módulo de elasticidad máximo teórico	E-MAX PEBD
$E_{.5\%wt} = E_{PEBD} * 95\%wt + E_{Fe} * 5\%wt$	$E_{.5\%wt} = 9.7 \text{ GPa}$
$E_{.10\%wt} = E_{PEBD} * 90\%wt + E_{Fe} * 10\%wt$	$E_{.10\%wt} = 19.2 \text{ GPa}$
$E_{.15\%wt} = E_{PEBD} * 85\%wt + E_{Fe} * 15\%wt$	$E_{.15\%wt} = 28.7 \text{ GPa}$
$E_{.20\%wt} = E_{PEBD} * 80\%wt + E_{Fe} * 20\%wt$	$E_{.20\%wt} = 38.2 \text{ GPa}$
$E_{.25\%wt} = E_{PEBD} * 75\%wt + E_{Fe} * 25\%wt$	$E_{.25\%wt} = 47.7 \text{ GPa}$
Módulo de elasticidad máximo teórico	E-MAX PEBDR
$E_{.5\%wt} = E_{PEBDR} * 95\%wt + E_{Fe} * 5\%wt$	$E_{.5\%wt} = 9.8 \text{ GPa}$
$E_{.10\%wt} = E_{PEBDR} * 90\%wt + E_{Fe} * 10\%wt$	$E_{.10\%wt} = 19.3 \text{ GPa}$
$E_{.15\%wt} = E_{PEBDR} * 85\%wt + E_{Fe} * 15\%wt$	$E_{.15\%wt} = 28.8 \text{ GPa}$
$E_{.20\%wt} = E_{PEBDR} * 80\%wt + E_{Fe} * 20\%wt$	$E_{.20\%wt} = 38.3 \text{ GPa}$
$E_{.25\%wt} = E_{PEBDR} * 75\%wt + E_{Fe} * 25\%wt$	$E_{.25\%wt} = 47.7 \text{ GPa}$
Módulo de elasticidad mínimo teórico	E-MAX PEBD
$E_{.5\%wt} = \frac{E_{PEBD}E_{Fe}}{E_{Fe}*95\%wt + E_{PEBD}*5\%wt}$	$E_{.5\%wt} = 0.24 \text{ GPa}$
$E_{.10\%wt} = \frac{E_{PEBD}E_{Fe}}{E_{Fe}*90\%wt + E_{PEBD}*10\%wt}$	$E_{.10\%wt} = 0.25 \text{ GPa}$
$E_{.15\%wt} = \frac{E_{PEBD}E_{Fe}}{E_{Fe}*85\%wt + E_{PEBD}*15\%wt}$	$E_{.15\%wt} = 0.26 \text{ GPa}$
$E_{.20\%wt} = \frac{E_{PEBD}E_{Fe}}{E_{Fe}*80\%wt + E_{PEBD}*20\%wt}$	$E_{.20\%wt} = 0.28 \text{ GPa}$
$E_{.25\%wt} = \frac{E_{PEBD}E_{Fe}}{E_{Fe}*75\%wt + E_{PEBD}*25\%wt}$	$E_{.25\%wt} = 0.30 \text{ GPa}$
Módulo de elasticidad mínimo teórico	E-MAX PEBDR
$E_{.5\%wt} = \frac{E_{PEBDR}E_{Fe}}{E_{Fe}*95\%wt + E_{PEBDR}*5\%wt}$	$E_{.5\%wt} = 0.34 \text{ GPa}$
$E_{.10\%wt} = \frac{E_{PEBDR}E_{Fe}}{E_{Fe}*90\%wt + E_{PEBDR}*10\%wt}$	$E_{.10\%wt} = 0.36 \text{ GPa}$
$E_{.15\%wt} = \frac{E_{PEBDR}E_{Fe}}{E_{Fe}*85\%wt + E_{PEBDR}*15\%wt}$	$E_{.15\%wt} = 0.38 \text{ GPa}$
$E_{.20\%wt} = \frac{E_{PEBDR}E_{Fe}}{E_{Fe}*80\%wt + E_{PEBDR}*20\%wt}$	$E_{.20\%wt} = 0.41 \text{ GPa}$
$E_{.25\%wt} = \frac{E_{PEBDR}E_{Fe}}{E_{Fe}*75\%wt + E_{PEBDR}*25\%wt}$	$E_{.25\%wt} = 0.43 \text{ GPa}$



Gráfica 2 - Módulo de elasticidad máximo y mínimo teórico proyectado

2.4 Sistema de trabajo estandarizado

De la investigación realizada, es importante mencionar que para la propuesta de un material que en el futuro puede ser aprovechado a escala industrial es imprescindible poder generar los parámetros de trabajo estandarizado para poder tener reproducibilidad del material obtenido en la caracterización en su aplicación final. Para las 2 familias propuestas se tienen como parámetros base: las RPM's del extrusor, las temperaturas del husillo, temperatura del molde, presiones y ciclos en la prensa hidráulica.

El principal factor de trabajo de los plásticos es la Temperatura de transición vítrea (T_g); el cual es el punto en el calentamiento de un material vítreo en el cual se funde y puede ser moldeado a los fines que se necesite, por encima de la temperatura T_g el polímero se torna gomoso y adquiere cierta elasticidad con una capacidad de deformación plástica sin fractura, lo anterior es exclusivo de los termoplásticos mas no de los termoestables (Mathot 1994).

Una vez el PEBD fundido y mezclado la limadura, se procede a vaciar directamente el hilo extruido al molde, por lo que también es necesario calentar previamente el molde para que no ocurra una solidificación repentina del material, que no permitiría llenar adecuadamente la cavidad completa del molde

y por ende produciría una probeta con cavidades que no sería apta para los ensayos.

2.4.1 Reciclado del PEBD

Para el PEBD virgen se tiene en la literatura una temperatura de trabajo $T_g=145^{\circ}\text{C}$ (IMPI 1997), sin embargo se debe tomar en consideración que al momento de generar un material compuesto, no solo se está vertiendo el polímero para su extrusión, sino que en este caso al agregar la limadura de hierro a la tolva de alimentación, este debido a su capacidad calorífica tiende a robar un poco de la energía suministrada en la extrusión, por lo que se realizó una serie de pruebas para obtener la temperatura adecuada de trabajo para que se pudiera compensar la energía robada por la limadura y que el PEBD llegará a su T_g para su correcta extrusión. Dichas temperaturas son $HZ1=165^{\circ}\text{C}$, $HZ2=175^{\circ}\text{C}$, $HZ3=175^{\circ}\text{C}$ y $HZ4=180^{\circ}\text{C}$.

Para el sistema de prensado se estableció una temperatura de molde de 115°C en un sistema de 2 etapas, la primera a una presión de 950kgf por 150 segundos, pasando a la segunda etapa a una presión de 700kgf por 60 segundos; una vez terminadas las etapas se deja enfriar el molde a temperatura ambiente por 300 segundos para desmoldar la probeta.

2.4.2 Reciclado del PEBDR

Mientras que para el PEBD reciclado no se tiene una literatura amplia y extensa para determinar su T_g óptima, lo anterior ocurre porque el PEBDR depende del material base de reciclaje, el cual puede variar en los aditivos presentes (colorantes, plastificantes, estabilizadores, etc.), como en el caso anterior se debe considerar la energía calorífica que tomará la limadura de hierro en la extrusión, y sumado al factor anterior, todos los químicos añadidos al PEBDR afectan también el desempeño del material ya que generan un material más elástico y gomoso para trabajar y como resultado; mayores temperaturas de trabajo para compensar la limadura y los aditivos presentes. Dichas temperaturas son $HZ1=200^{\circ}\text{C}$, $HZ2=220^{\circ}\text{C}$, $HZ3=220^{\circ}\text{C}$ y $HZ4=235^{\circ}\text{C}$.

En este caso el prensado se estableció una temperatura de molde de 135°C también en 2 etapas, la primera a una presión de 1200kgf por 150 segundos, pasando a la segunda etapa a una presión de 900kgf por 60 segundos; una vez

terminadas las etapas se deja enfriar el molde a temperatura ambiente por 300 segundos para desmoldar la probeta.

Como se observa con los datos anteriores el PEBDR requiere mayor energía para poder fundirlo y moldearlo, así como mayor capacidad de presión en las probetas, ya que el material fundido es muy similar a una goma que complica el proceso de prensado, por lo que no se debe dejar que el material se enfríe para poder verterlo adecuadamente en los moldes

2.5 Precauciones y advertencias del reciclado

Una de las situaciones que se deben considerar al trabajar con la transformación de termoplásticos es su composición química, conforme a lo anterior el trabajarlos a temperaturas altas puede provocar la generación de gases y/o radicales nocivos para la salud. Se recomienda ampliamente cuando se trabaja con el extrusor el uso de cubrebocas, para impedir la aspiración directa de dichos agentes que pueden perjudicar la salud del individuo que lo está trabajando.

Este hecho está comprobado porque estos gases no son solo potencialmente dañinos a la salud del ser humano, sino que también son considerados de efecto invernadero, por lo que su emisión genera problemas ambientales. Entre los principales gases de desecho están las trazas de metano y etileno, estas tasas de emisión aumentan con el tiempo, es decir mientras más envejecido este un plástico más gases traza producirá; por ende, el PEBDR sería el de mayor cuidado en su manejo y reciclaje.

Como se muestra en la Ilustración 4, los el PEBD virgen y el PEBD envejecido presentan grandes emisiones de los anteriores gases a una exposición atmosférica, la cual sometidas a las temperaturas del reciclaje se pueden ver ampliamente incrementadas.

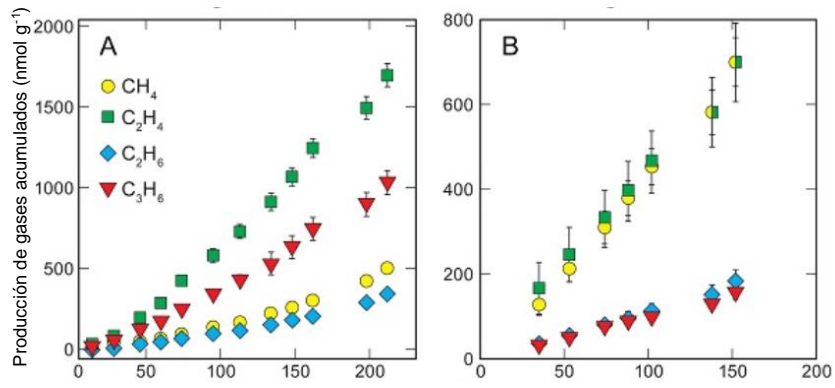


Ilustración 4 Emisión de gases para el PEBD (A) y PEBDR (B) (Royer, y otros 2018)

CAPÍTULO III. Experimentación y ensayos mecánicos

3.1 Moldes y probetas para ensayos mecánicos

3.1.1 Diseño y mecanizado del molde para probetas de tensión

Para el desarrollo del molde para la probeta de tensión se abarcó la planeación, diseño, fabricación y uso; se tomó en cuenta la norma *ASTM D638-99 "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics"* la cual establece los parámetros para el diseño del molde para probetas de tensión, pruebas y análisis de resultados.

Para su diseño las dimensiones que se consideraron para la probeta son como se muestra en la figura 19, en la cual de acuerdo con la norma se tiene un plástico moldeado no rígido en el cual se busca que en la prueba a la fractura se de en la sección media de la probeta debido a la dislocación de material anteriormente mencionada, para la norma este tipo de probeta corresponde al tipo I.

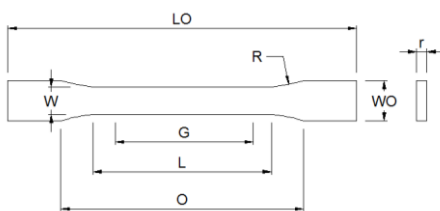


Figura 19. Probeta para plásticos

Dimensiones de probeta tipo I	
Cota	Dimensión
W	13±0.5mm
L	57±0.5mm
WO	19±6.4mm
LO	165mm
G	50±0.25mm
O	115±5mm
r	3.2±1mm

Figura 20. Medidas de la probeta normalizadas
ADAPTADO DE: (ASTM 1999)

El molde consiste en una solera de Duraluminio pre rectificada de $\frac{3}{4}$ " de espesor como base (cavidad) y otra como tapa (corazón), las medidas de ambas soleras eran de 195 x 101 mm.

Para el mecanizado de estos se pidió apoyo al Laboratorio de Manufactura de la Facultad de Ingeniería (LMFI), al laboratorio se le entregaron los planos que se encuentran en los anexos los cuales vienen identificados como Molde Tensión H (Cavidad, ver anexo A) y Molde Tensión M (Corazón, ver anexo B), se mecanizaron en un CNC por parte del LMFI. Como se muestra en la figura 21 el molde utilizado para fabricar las probetas de tensión.



Figura 21. Molde para probeta de tensión

En la figura 22 se puede observar el material vertido, comprimido y enfriado en la cavidad del molde listo para ser desmoldado.



Figura 22. Molde de tensión vaciado con material

3.1.2 Diseño y mecanizado del molde para probetas de impacto

Para esta prueba se necesitó tomar las medidas estándar para las probetas que eran las indicadas con respecto al modelo de la máquina basándose en la Norma *ASTM 6110-04 "Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics"*. Para esta norma se considera la forma básica para espécimen de prueba, la cual se muestra en la figura 23. En la figura 24 se muestran las medidas para el diseño del molde estandarizadas.

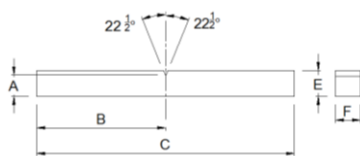


Figura 23. Especimen básico para prueba de Impacto Charpy

Dimensiones de probeta de impacto	
Cota	Dimensión
A	10.16mm
B	63.5mm
C	127mm
D	0.25Rmm
E	12.7mm
F	12.7mm

Figura 24. Dimensiones estandarizadas
ADAPTADO DE: (ASTM 2004)

De igual manera se pidió apoyo al LMF I para su mecanizado, los planos para dichos moldes se encuentran en los anexos Molde Impacto H (Cavidad, ver

anexo C) y Molde Impacto M (Corazón, ver anexo D); los moldes se diseñaron para que funcionen en modo de vertido y compresión del material, considerando el equipo disponible para hacer las probetas (extrusor y prensa hidráulica).

Como se puede observar en la figura 25 el molde para las probetas de impacto se diseñó de tal manera que se pudieran tener 2 probetas al mismo tiempo de 1 vaciado, lo anterior es debido a la necesidad de eficientar los materiales y recursos disponibles para la realización de la parte experimental de esta investigación.



Figura 25. Molde de probetas de impacto

Por último, en la figura 26 se muestran 2 probetas de impacto ya extraídas del molde y aprobada para su uso.



Figura 26. Probetas de impacto

3.2 Elaboración de probetas

Se realizaron diferentes muestras las cuales fueron 4 probetas para cada concentración. Es importante elegir las probetas de mayor calidad con el menor número de defectos e imperfecciones que puedan afectar el rendimiento en la prueba (Figura 27).



Figura 27. Probetas terminadas de PEBD al 100%

3.2.1. Diseño de experimentos

Para la elaboración de nuestro compuesto fue necesario generar primero las relaciones de nuestra materia prima a fin de generar la mezcla que nos servirá para poder generar las probetas tanto de tensión como de impacto. Para motivos de este trabajo se muestra la tabla 14, que muestra la cantidad de probetas que se realizarán para llevar a cabo las pruebas mencionadas, las cantidades elegidas para fabricar cada %wt para cada tipo de plástico están consideradas en investigaciones anteriores, relacionadas a materiales compuestos particulados (plástico-metal), Rupinder Singh (2016), Ehsan Azarsa (2013) y Rupinder & Ranvijay (2016).

Tabla 14. Cantidad de probetas a fabricar por %wt y tipo de probeta.

	Probetas de tensión					Probetas de impacto				
	5%wt	10%wt	15%wt	20%wt	25%wt	5%wt	10%wt	15%wt	20%wt	25%wt
PEBD- FE	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3
PEBDR- FE	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3

3.2.2 Procedimiento

1. Diseño y construcción de moldes
2. Preparación de materiales (PEBD, PEBDR, Fe particulado e instrumentos)
3. Precalentamiento del extrusor.
4. Pesaje de los materiales para cada concentración.
5. Calentamiento de los moldes en la prensa hidráulica. (Tensión e impacto)
6. Vertido de materiales en la tolva de alimentación.
7. Inicio de la extrusión con el molde listo para ser vaciado.

8. Una vez vaciado el molde se cierra con su mitad.
9. Colocación del molde en la prensa e inicio de prensado.
10. Una vez finalizado el ciclo de prensado se deja reposar 5 minutos el molde a temperatura ambiente.
11. Se abre el molde con cuidado y se retira la probeta enfriada.
12. Se generan las probetas correspondientes a cada concentración (Tabla 3.1).
13. Realizar ensayos mecánicos con las probetas terminadas.

Para la creación de dichas probetas (Figura 28) se utilizó una extrusora marca Brabender® con 4 zonas de calentamiento (HZ1= Alimentación, HZ2= Compresión, HZ3= Fundición y HZ4= Dosificación), localizada en el laboratorio de termofluidos en la FIUAEMex (Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México), las condiciones de operación fueron 2 principales, una para trabajar el PEBD y otra para el PEBDR.



Figura 28. Probetas aceptadas para la prueba

Como inicio, el PEBD al ser un material sin ningún agregado la temperatura establecida para las 4 zonas de temperatura del extrusor fue (HZ1= 165°C, HZ2= 175°C, HZ3= 175°C, HZ4= 180°C) a una velocidad de 43 rpm para el vaciado al molde; por otro lado el PEBDR presentó mayores complicaciones de trabajo en el extrusor, lo anterior ocasionado por la gran cantidad de aditivos, colorantes, estabilizadores presentes, por lo que requirió una mayor temperatura de trabajo, las cuales fueron (HZ1= 200°C, HZ2= 220°C, HZ3= 220°C, HZ4= 235°C) a una velocidad de trabajo de 48 rpm. Todo lo anterior se basó en experimentación previa no adjunta en este trabajo para establecer las condiciones óptimas para la extrusión de ambos plásticos, debido a la escasa información de los

parámetros requeridos para trabajar e PEBDR y tener un mayor control en la elaboración de las probetas.

3.3 Ensayo mecánico de tensión

Terminadas todos los ensayos de tensión (Figura 29) se procede a trabajar con los datos obtenidos en la prueba (Fuerza-desplazamiento) y trabajarlos a fin de obtener nuestra curva Esfuerzo-deformación con las ecuaciones 9 y 10:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}(\text{espesor} \times \text{anchura})} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (9)$$

$$\text{Deformación} = \frac{\text{Desplazamiento}}{\text{Longitud calibrada}} \quad \varepsilon = \frac{L_F - L_0}{L_0} \quad (10)$$

Una vez generados los cálculos tanto de esfuerzo como de deformación para cada material probado, se realiza un comparativo entre las diferentes relaciones, en el capítulo 4 se presentan los análisis a las gráficas comparativas de los diferentes %wt que se trabajaron.

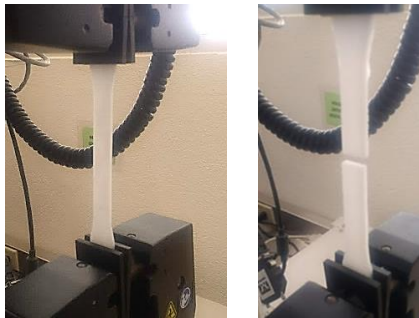
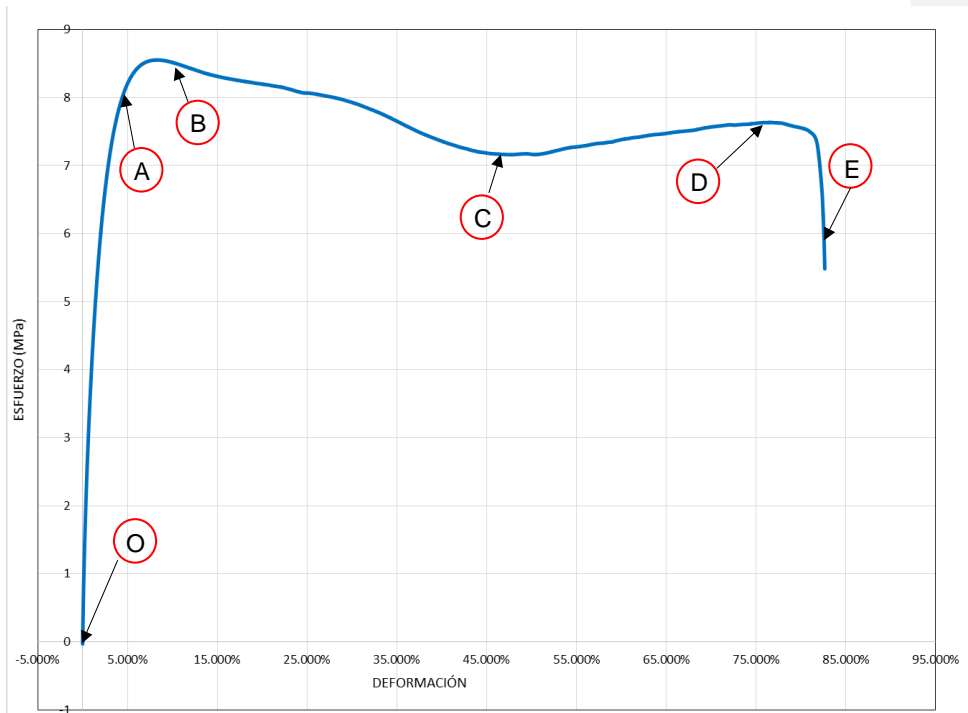


Figura 29. Probeta de tensión durante y al terminar la prueba

La prueba de tensión se llevó a cabo en una máquina universal INSTRON a una velocidad de 3 mm/min siendo este un procedimiento cuasi estático. Las gráficas 4 a la 11 fueron las obtenidas y generadas por el software de la máquina universal la cual permite generar grupos de prueba para una comparación óptima de resultados.



Gráfica 3- 100 %wt PEBDR, 0% wt Fe

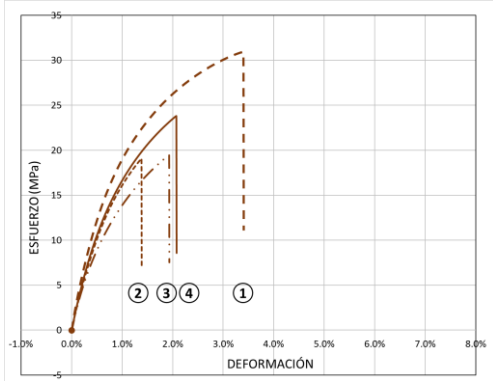
La gráfica 3 corresponde a una probeta de proporción 100% PEBDR Y 0% Fe, con el cual podemos distinguir puntos y zonas clave en este tipo de análisis esfuerzo deformación, a continuación, se describen brevemente.

- El diagrama empieza con una línea recta **O-A**, en esta región el esfuerzo y la deformación son proporcionales, se dice entonces que el comportamiento del material es lineal (zona de deformación elástica). Después del punto **A** ya no existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación presentados; por lo que al esfuerzo en el punto **A** se denomina límite de proporcionalidad. Al incrementar la carga más allá del de dicho límite, la deformación empieza a aumentar más rápidamente por cada incremento de esfuerzo.
- La curva esfuerzo-deformación asume luego una pendiente cada vez más pequeña hasta que en el punto **B** sufre una inflexión y ahora se genera

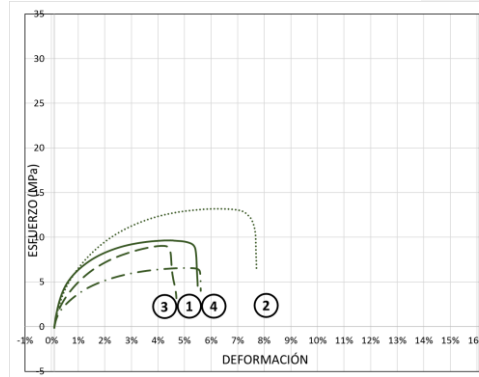
una pendiente negativa a partir de este punto. En este momento el material comienza a presentar un alargamiento considerable, con un decrecimiento en el esfuerzo presente en el material hasta el punto **C** (zona de plasticidad perfecta o fluencia) debido a que el polímero se vuelve perfectamente plástico lo cual se refleja en el incremento a su deformación sin el incremento de la carga aplicada. El esfuerzo en este punto **B** se le denomina esfuerzo de cedencia.

- Después de sufrir una gran deformación en la zona de fluencia **B-C**, el material empieza a mostrar un endurecimiento por deformación. Durante este periodo, el material sufre cambios en su estructura polimérica molecular, lo que origina un incremento en la resistencia del material a futuras deformaciones. Por tanto, los alargamientos posteriores requerirán un incremento en la carga de tensión para generarse; y el diagrama esfuerzo-deformación toma una pendiente positiva en el tramo **C-D**.
- Finalmente, la carga alcanza su valor máximo, ya en la fase plástica, y el esfuerzo correspondiente (Punto **D**) se denomina esfuerzo último. El alargamiento posterior de la probeta viene acompañado de una reducción considerable en la carga y finalmente una fractura en el punto **E** (Hibbeler 1998).

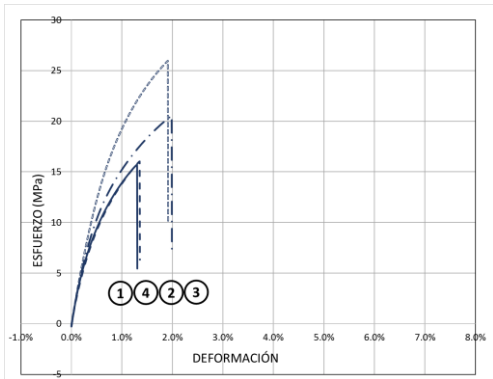
A continuación, se muestran las gráficas 4-13, resultantes del ensayo de tensión de las 4 probetas correspondientes a las concentraciones mencionadas anteriormente, toda la información más relevante se agrupa en la tabla 15. Para homologación y un mayor entendimiento se estableció como deformación máxima para el PEBD 8%, mientras que para el PEBDR un 16%; de igual manera para comparar directamente %wt Fe contra otro el esfuerzo soportado es igual por par de compuestos.



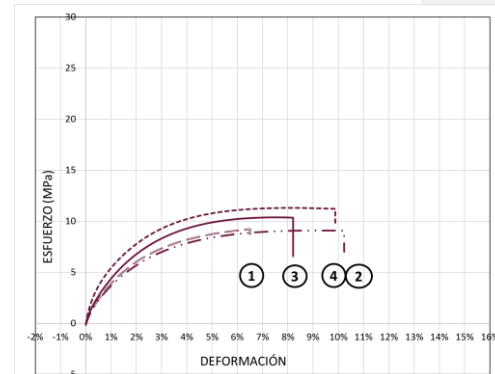
Gráfica 4 - Familia del compuesto 95 %wt PEBD, 5 %wt Fe



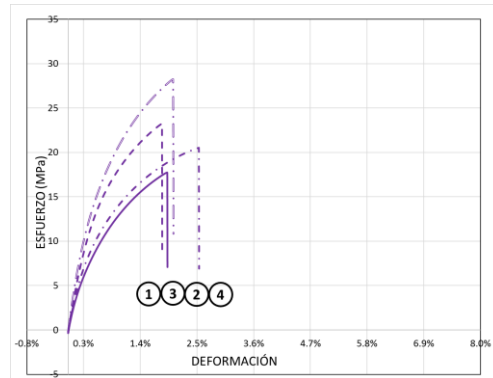
Gráfica 5 -Familia del compuesto 95 %wt PEBDR, 5 %wt Fe



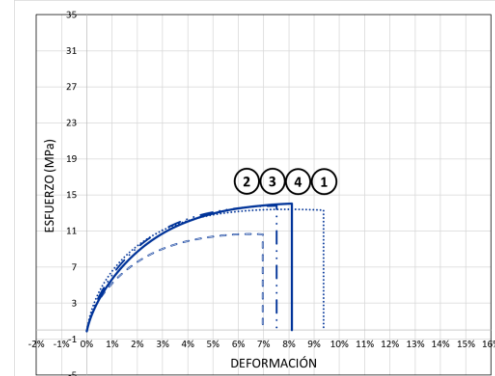
Gráfica 6 - Familia del compuesto 90 %wt PEBD, 10 %wt Fe



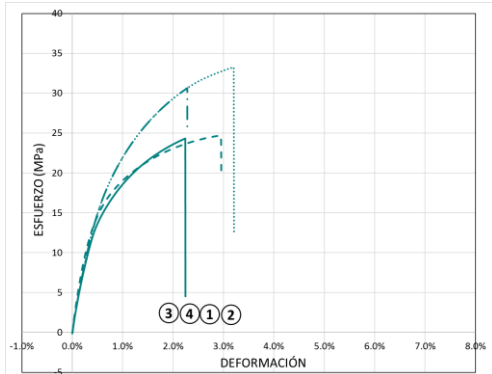
Gráfica 7 - Familia del compuesto 90 %wt PEBDR, 10 %wt Fe



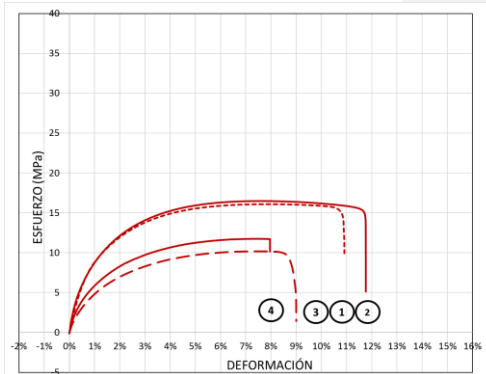
Gráfica 8 - Familia del compuesto 85 %wt PEBD, 15 %wt Fe



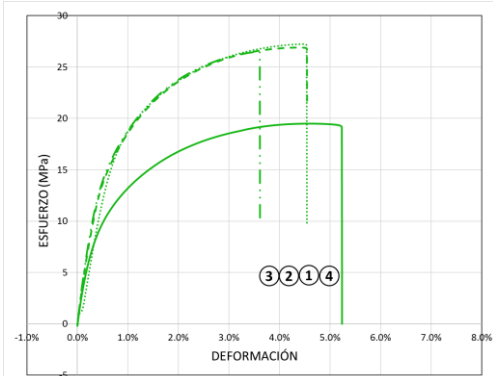
Gráfica 9 - Familia del compuesto 85 %wt PEBDR, 15 %wt Fe



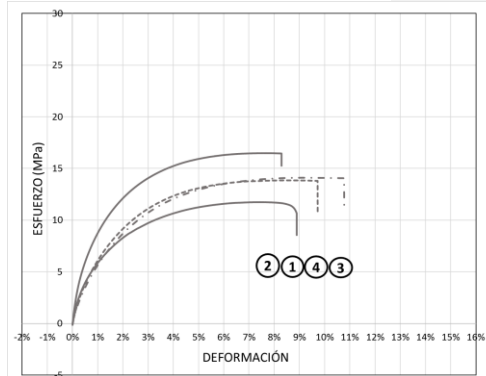
Gráfica 10 - Familia del compuesto 80 %wt PEBD, 20 %wt Fe



Gráfica 11 - Familia del compuesto 80 %wt PEBDR, 20 %wt Fe



Gráfica 12 - Familia del compuesto 75 %wt PEBD, 25 %wt Fe



Gráfica 13 - Familia del compuesto 75 %wt PEBDR, 25 %wt Fe

Tabla 15. Concentrado de la prueba de tensión

CARACTERÍSTICA	PEBD				
	5%wt Fe	10%wt Fe	15%wt Fe	20%wt Fe	25%wt Fe
Límite inferior de deformación	1.50%	1.35%	1.80%	2.20%	3.60%
Límite superior de deformación	3.50%	2%	2.60%	3.40%	5.30%
Límite inferior del esfuerzo último	17MPa	16MPa	17MPa	24MPa	18MPa
Límite superior del esfuerzo último	31MPa	26MPa	27MPa	33MPa	26MPa
CARACTERÍSTICA	PEBDR				
	5%wt Fe	10%wt Fe	15%wt Fe	20%wt Fe	25%wt Fe
Límite inferior de deformación	3.40%	6.50%	7%	7.90%	8.20%
Límite superior de deformación	7.40%	10%	9.50%	11.7	10.60%
Límite inferior del esfuerzo último	6.5MPa	9MPa	10MPa	10MPa	11.5MPa
Límite superior del esfuerzo último	13MPa	11MPa	14MPa	16.5MPa	16.5MPa

Para todas las gráficas es fácil identificar la repetitividad que se obtuvo con las pruebas realizadas, se puede apreciar que sus comportamientos son

coincidentes con cada familia, con la diferencia que entre el PEBD y el PEBDR la forma de la curva al momento de la ruptura es notablemente diferente, esto es en la forma de la caída (Figuras 30 y 31).

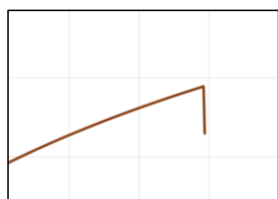


Figura 30. Caída Ángulo -->Ruptura Frágil

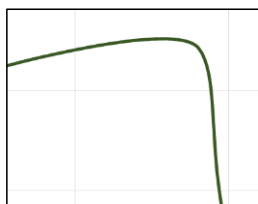


Figura 31. Caída Curva --> Ruptura Dúctil

Lo anterior es debido a la capacidad inerte de la matriz polimérica de reacomodar sus fibras mientras la deformación se presenta, en los materiales frágiles el material tiene muy poca capacidad de adaptarse por lo que llegado a su límite sufre una ruptura casi instantánea, por otro lado los materiales dúctiles (Figura 32) tienen una mayor capacidad de adaptación al esfuerzo, por lo que su falla comienza a ceder más lentamente hasta que sufre la ruptura (IMAC 2015).



Figura 32. Probeta de tensión 90%PEBDR-10%wt Fe con cedencia dúctil

3.4 Ensayo mecánico de impacto (Charpy)

Las probetas realizadas se ensayaron mediante los lineamientos marcados en la norma *ASTM D6110*. Cabe mencionar que para la realización de la prueba se utilizó la modalidad Charpy (Figura 33). Para el desarrollo experimental se utilizó una máquina que cubriera dicha requisición, ubicada en el laboratorio de metrología (Figura 34) de la Facultad de ingeniería, UAEMex. Como se mostró en la tabla 14 se fabricaron 3 probetas para cada concentración, así como probetas al 100 %wt PEBD para tener un valor de referencia en el análisis de resultados.

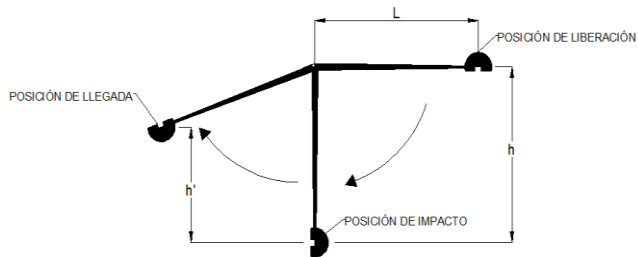


Figura 33. Diagrama de péndulo Charpy



Figura 34. Máquina para el ensayo de impacto

Las probetas fabricadas y aceptadas por cada concentración (figura 35), fueron seleccionadas después de varios lotes fabricados para obtener las de mayor calidad. Los criterios más importantes son que no haya zonas huecas, burbujas, indicaciones lineales, fracturas o cualquier otro defecto que afecte el rendimiento de la probeta.

Es fácil identificar las fabricadas con PEBD virgen, así como las de PEBD reciclado debido a la coloración de estas, sin embargo, aspectos como la textura son prácticamente iguales entre ambas combinaciones.



Figura 35. Probeta de impacto

Tabla 16. Dimensiones y datos probeta impacto.

Característica	Dimensión
L	127mm
H	12.7mm
E	10.16mm
h.ent	2.54mm
Inercia Entalle	1090.5mm ⁴
Material	PEBD & PEBDR
Área de trabajo	129mm ²
Ángulo de la muesca	45°



Figura 36. Dimensiones probeta impacto

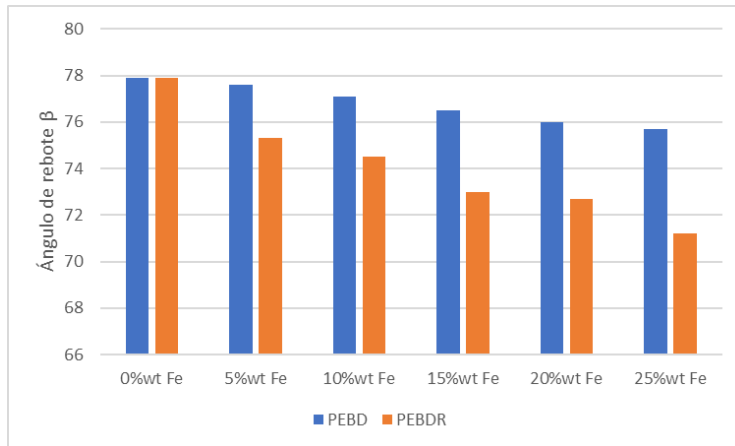
La tabla 17 muestra el ángulo de impacto β en función de la concentración del compuesto, estos datos se concentran en la tabla 18 e ilustrados en la gráfica 14.

Tabla 17. Ángulo de impacto β registrado de la prueba

PEBD-Fe					
0%wt	5%wt	10%wt	15%wt	20%wt	25%wt
β	β	β	β	β	β
78	77.5	77.7	77	76	75.6
78	77.6	77	76	76	75.7
77.9	77.6	76.5	76.5	76	76
77.9	77.6	77.1	76.5	76.0	75.7
PEBDR-Fe					
0%wt	5%wt	10%wt	15%wt	20%wt	25%wt
β	β	β	β	β	β
78	75	74	72	74	72.5
78	75.5	74.9	72	72	73
77.8	75.3	74.6	75	72	68
77.9	75.3	74.5	73.0	72.7	71.2

Tabla 18. Promedios ángulo de impacto β

Promedio del ángulo de rebote β	PEBD (β)	PEBDR (β)
0%wt Fe	77.9	77.9
5%wt Fe	77.6	75.3
10%wt Fe	77.1	74.5
15%wt Fe	76.5	73
20%wt Fe	76	72.7
25%wt Fe	75.7	71.2



Gráfica 4 - Gráfica comparativa de la prueba de impacto

Tal como se observa, para el PEBD y el PEBDR tienen un ángulo de rebote que va disminuyendo mientras él %wt Fe aumenta; sin embargo, el que presenta una reducción más significativa es el PEBDR lo cual indica que su capacidad para absorber energía en el impacto va incrementando por encima del PEBD.

3.5 Prueba de Dureza (Shore D)

Para este ensayo, la dureza se midió en todas las probetas sometidas a la prueba de Tensión, sin tomar en cuenta las de concentraciones al 0%wt de Fe, ya que para esos casos solo se consideró el promedio de 2 probetas. La toma de la lectura (Figura 37) se realiza después de 3 segundos debido a que se debe considerar la recuperación elástica del material.



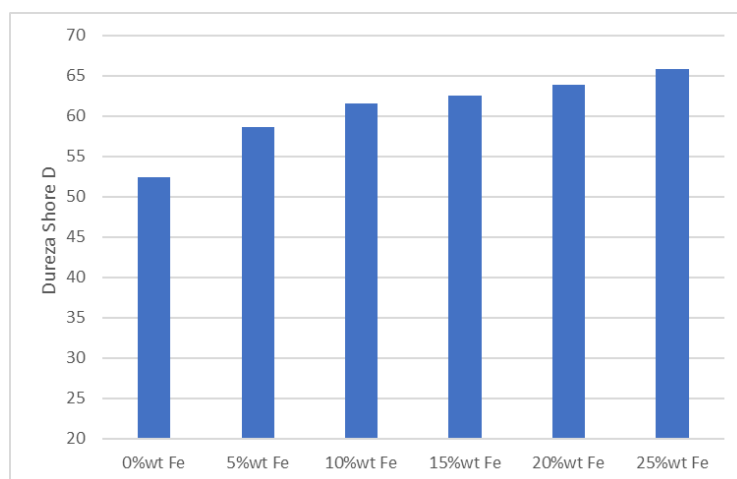
Figura 37. Toma de dureza para las probetas de Tensión

Una vez concluida la toma de dureza, se procedió a realizar una tabla para concentrar los datos y de esta manera poder calcular la dureza promedio por porcentaje de concentración %wt. Como se muestra a continuación se separa

por PEBD (Tabla 19) y PEBDR (Tabla 20) las mediciones obtenidas para las probetas, posterior a ello se muestran las Gráficas 15 y 16 de las durezas promedio para poder analizar cuantitativamente los resultados obtenidos.

Tabla 19. Durezas obtenidas por las familias PEBD-Fe

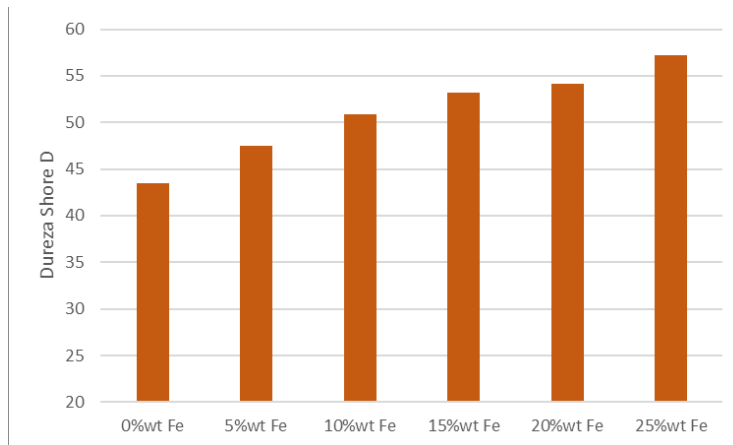
5%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3	10%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Probeta 1	60	60	62	Probeta 1	61	62	62
Probeta 2	58	52	52	Probeta 2	66	61	63
Probeta 3	61	53	63	Probeta 3	61	63	63
Probeta 4	60	52	65	Probeta 4	61	55	61
15%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3	20%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Probeta 1	64.1	62.9	65	Probeta 1	62	62.9	65
Probeta 2	67	63	68	Probeta 2	67	63	68
Probeta 3	60	53	61	Probeta 3	64	65	61
Probeta 4	62	63	61	Probeta 4	62	63	64
25%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3				
Probeta 1	66	54	67				
Probeta 2	67	67	69				
Probeta 3	68	67	67				
Probeta 4	68	63	67				



Gráfica 5 – Dureza Shore por porcentaje de concentración %wt (PEBD-Fe)

Tabla 20. Durezas obtenidas por las familias PEBDR-Fe

5%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3	10%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Probeta 1	49	46	47	Probeta 1	47	50	52
Probeta 2	48	49	49	Probeta 2	50	50	53
Probeta 3	47	47	48	Probeta 3	53	54	55
Probeta 4	48	48	47	Probeta 4	48	48	51
15%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3	20%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Probeta 1	52	53	53	Probeta 1	52	56	53
Probeta 2	55	53	53	Probeta 2	55	53	54
Probeta 3	52	52	52	Probeta 3	56	56	55
Probeta 4	54	52	52	Probeta 4	53	53	53
25%wt Fe	Zona 1	Zona 2	Zona 3				
Probeta 1	58	58	60				
Probeta 2	58	56	55				
Probeta 3	58	58	57				
Probeta 4	55	57	56				

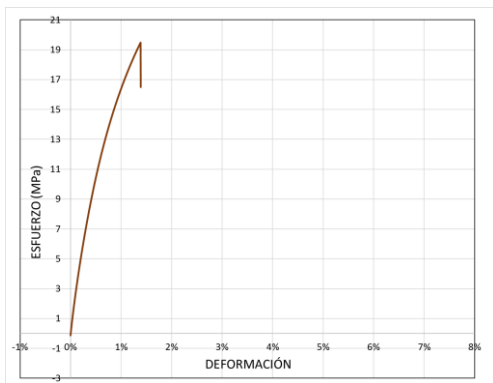


Gráfica 6 – Dureza Shore por porcentaje de concentración %wt (PEBDR-Fe)

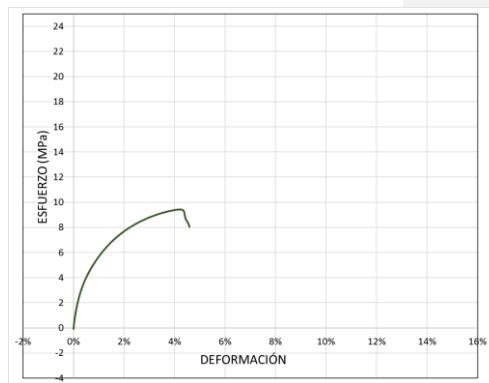
CAPÍTULO IV. Análisis de resultados

4.1 Ensayo de tensión

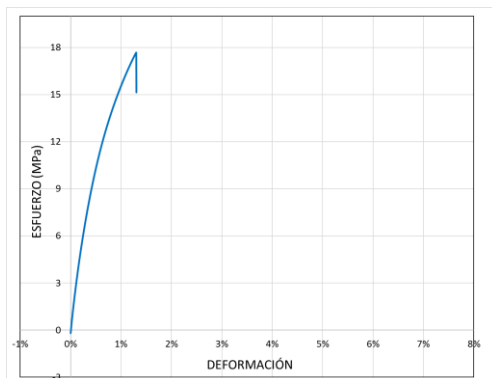
Para el análisis de los resultados obtenidos en este ensayo se debe recordar que se tuvieron 4 probetas de prueba por cada concentración de %wt Fe, se procedió a realizar una curva promedio del compuesto y con este método dar una curva característica por familia para tener un método que sea fácilmente comparable para la posterior referencia con las demás concentraciones. Lo anterior se muestra concentrado en las gráficas 17-26 así como en la tabla 21.



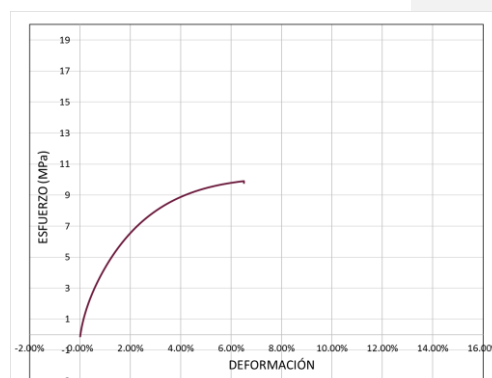
Gráfica 7 – Curva característica del compuesto 95 %wt PEBD, 5 %wt Fe



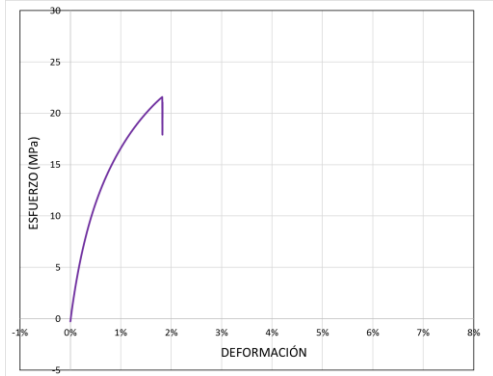
Gráfica 8 – Curva característica del compuesto 95 %wt PEBDR, 5 %wt Fe



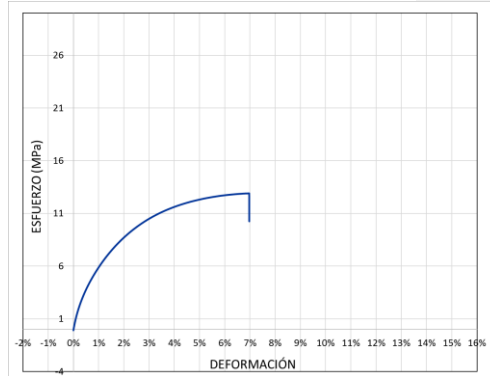
Gráfica 9 - Curva característica del compuesto 90 %wt PEBD, 10 %wt Fe



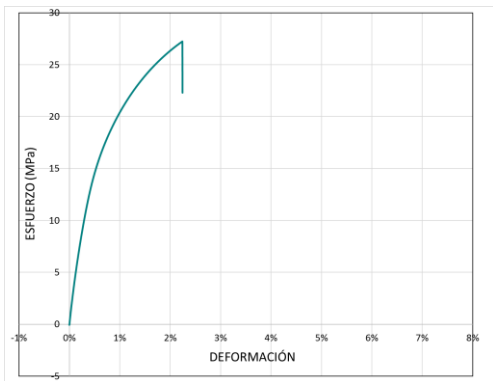
Gráfica 10 - Curva característica del compuesto 90 %wt PEBDR, 10 %wt Fe



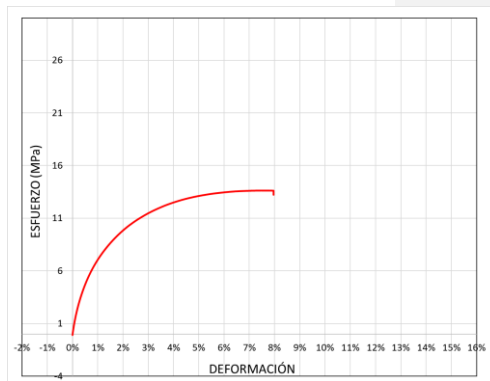
Gráfica 11 - Curva característica del compuesto 85 %wt PEBD, 15 %wt Fe



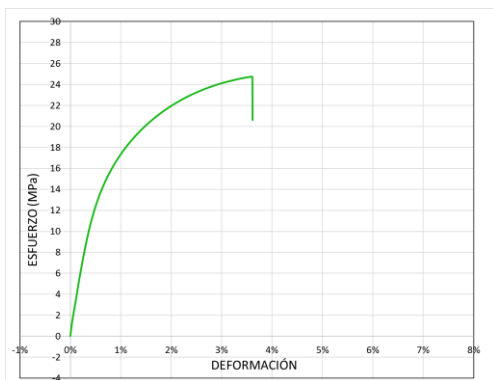
Gráfica 12 - Curva característica del compuesto 85 %wt PEBDR, 15 %wt Fe



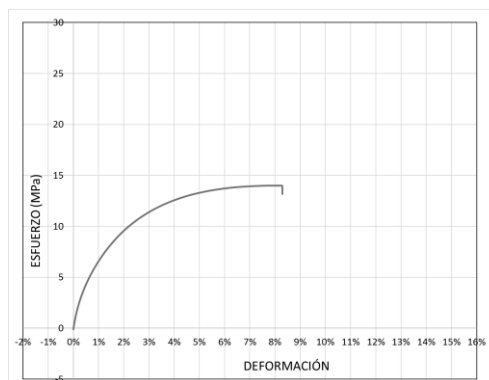
Gráfica 13 - Curva característica del compuesto 80 %wt PEBD, 20 %wt Fe



Gráfica 14 - Curva característica del compuesto 80 %wt PEBDR, 20 %wt Fe



Gráfica 15 - Curva característica del compuesto 75 %wt PEBD, 25 %wt Fe



Gráfica 16 - Curva característica del compuesto 75 %wt PEBDR, 25 %wt Fe

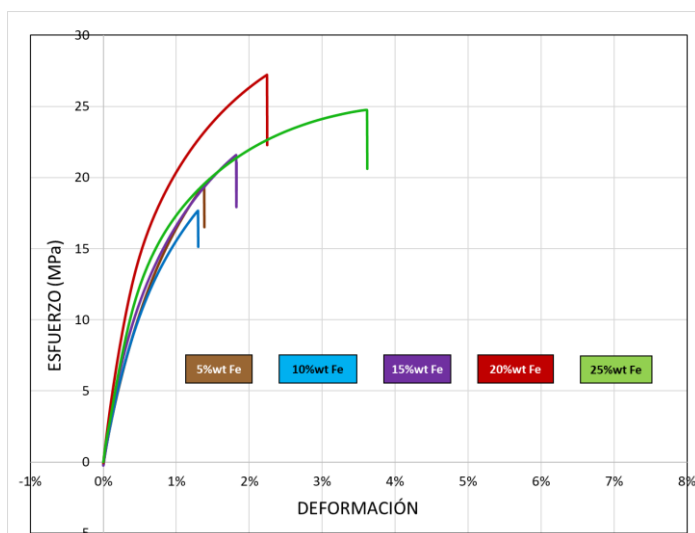
Tabla 21. Concentrado de curvas características.

CARACTERÍSTICA	PEBD				
	5%wt Fe	10%wt Fe	15%wt Fe	20%wt Fe	25%wt Fe
Esfuerzo último de tensión	18MPa	17.7MPa	23MPa	27MPa	25MPa
Deformación promedio	1.3%	1.3%	1.8%	2.2%	3.6%
CARACTERÍSTICA	PEBDR				
	5%wt Fe	10%wt Fe	15%wt Fe	20%wt Fe	25%wt Fe
Esfuerzo último de tensión	9.8MPa	10MPa	13MPa	14MPa	14MPa
Deformación promedio	4.5%	6.5%	7.0%	8.0%	8.2%

Con los datos obtenidos es fácilmente observar la mejora que genera el compuesto a mayor concentración de %wt Fe, teniendo una mejora del 38% en el esfuerzo último para el PEBD reforzado y de 42% para el PEBDR; mientras que en su capacidad de deformación el PEBD obtiene una mejora del 64% y por otro lado el PEBDR aumenta 83%.

4.1.1. Análisis de las curvas características de tensión (PEBD-Fe).

Para continuar con el análisis de los resultados obtenidos de la prueba de tensión, se muestran las gráficas para la familia de los compuestos utilizando el PEBD (Gráfica 27).

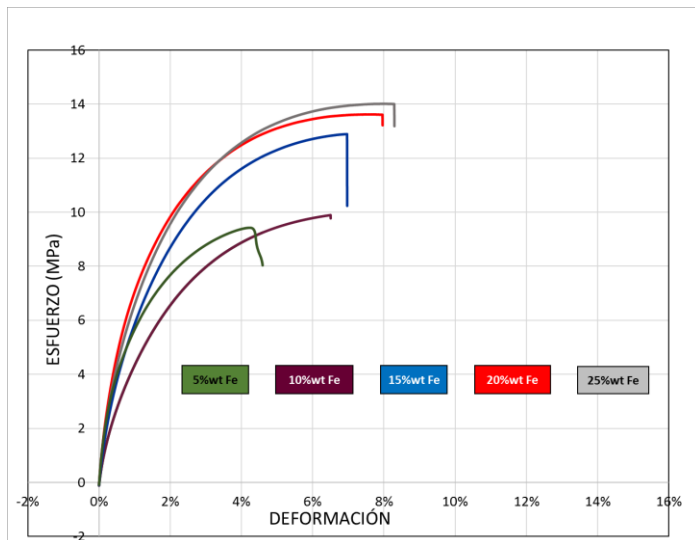


Gráfica 17 - Familia de compuestos para el PEBD

Como se puede observar para el caso de la familia PEBD-Fe es fácil distinguir las tendencias de deformación que recorren los compuestos individualmente, es decir, su tendencia a soportar esfuerzos superiores por encima de su elongación, considerando una similitud en la zona elástica del material para posteriormente pasar a la zona plástica en la cual el Fe es el añadido clave para cada concentración. Para los casos del **95 %wt PEBD, 5 %wt Fe** y **90 %wt PEBD, 10 %wt Fe** se presenta primero el 10 %wt de Fe, lo anterior es debido a la baja cantidad de material de refuerzo que se vierte en estas concentraciones y por consiguiente el factor determinante para ello, es el vaciado del material para generar las probetas, con los cuales pueden haber efectos no incluidos en el análisis de actual, tales como orientación del vertido, velocidad de enfriamiento, micro cavitaciones, condiciones ambientales entre otros. A pesar de lo anterior sus comportamientos son demasiado semejantes para poder afirmar que entre estas 2 concentraciones la varianza en cuanto a su comportamiento es prácticamente la misma.

Es importante resaltar que la concentración de hierro presente es el factor que genera las notorias mejorías que sufren las diferentes familias de los compuestos, lo cual en los diagramas esfuerzo-deformación presentados es visible, de tal manera también es necesario el análisis teórico mecánico es esencial para poder comprender la completa influencia que tuvo nuestro refuerzo en el compuesto.

4.1.2. Análisis de las curvas características de tensión (PEBDR-Fe).



Gráfica 18 - Familia de compuestos para el PEBDR

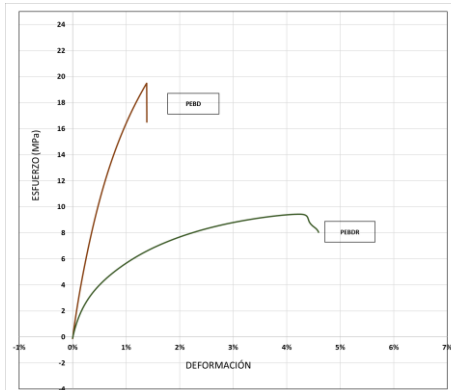
Para el caso de los compuestos con matriz PEBDR, también es posible distinguir las líneas de tendencias que siguen dichos compuestos que tienden a deformarse más que el presentar esfuerzos mayores, sin embargo para los casos del **95 %wt PEBDR, 5 %wt Fe** y **90 %wt PEBDR, 10 %wt Fe** es notable que sus curvas características son del mismo orden para el esfuerzo último experimentado, para los casos del **85 %wt PEBDR, 15 %wt Fe, 80 %wt PEBDR, 20 %wt Fe** y **75 %wt PEBDR, 25 %wt Fe** el esfuerzo último es demasiado cercano entre sí, con tan solo 2 MPa entre ellos; comparando esta familia con la del PEBD-Fe se concluye que la ganancia en sus esfuerzos últimos no presenta un aumento considerable sino un crecimiento más reducido entre niveles de concentración mayor, generando menor capacidad de elongación al material.

4.1.3 Análisis PEBD-FE contra PEBDR-FE

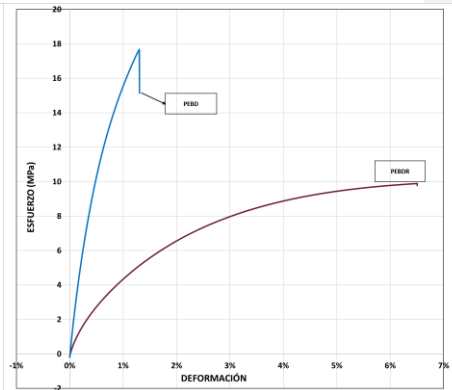
Para continuar con el análisis gráfico, se procede a comparar uno a uno los siguientes pares de compuestos para poder determinar el comportamiento obtenido.

Como se aprecia en las gráficas 29-33 la tendencia es en 2 vertientes, todos los compuestos con matriz PEBD tienen esfuerzos últimos superiores en relación

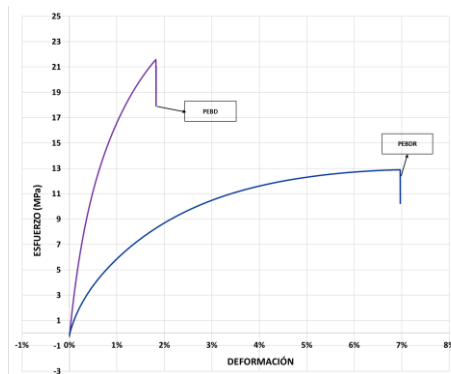
con su deformación; por otro lado, los de matriz PEBDR, presentan una deformación superior en comparación a su último esfuerzo.



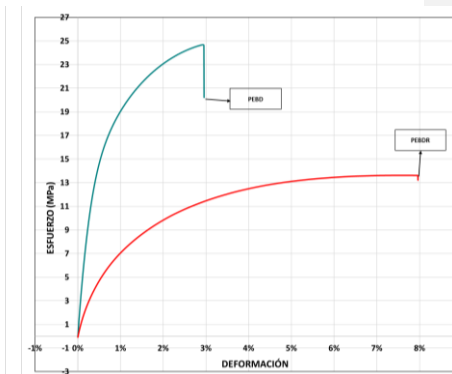
Gráfica 19 - Par de compuestos 5%wt Fe



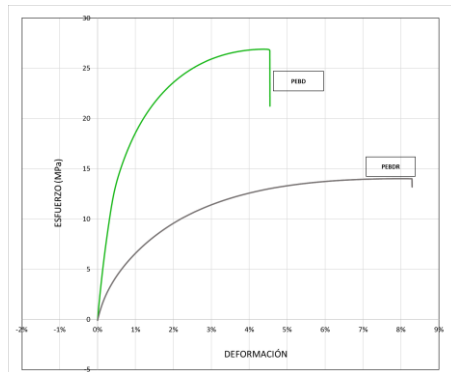
Gráfica 20 - Par de compuestos 10%wt Fe



Gráfica 21 - Par de compuestos 15%wt Fe



Gráfica 22 - Par de compuestos 20%wt Fe



Gráfica 23 - Par de compuestos 25%wt Fe

Por lo anterior el PEBD genera un compuesto con propiedades mecánicas de resistencia optimizadas, el PEBDR por su naturaleza al ser un material reprocesado, genera un material más maleable con gran capacidad de deformación con el costo de bajas resistencias mecánicas para el soporte de cargas.

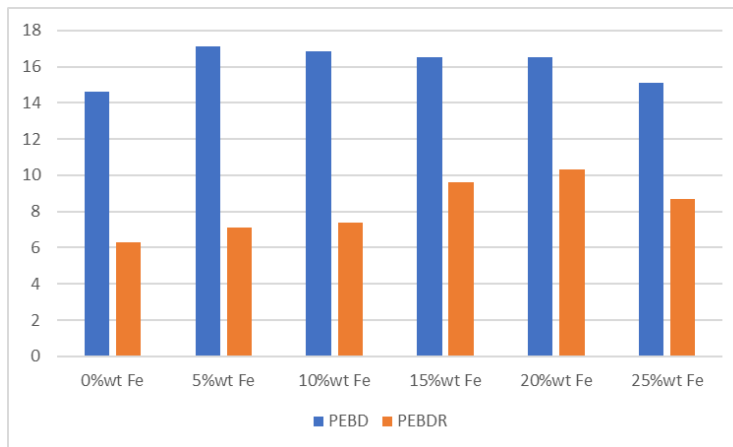
Para realizar un análisis más completo acerca de ambas familias de compuestos, a continuación, se presentan los resultados de los siguientes valores de la caracterización mecánica obtenidos mediante el software del ensayo a Tensión, los valores mostrados son valores promedio de cada porcentaje de concentración (%wt).

4.1.4 Esfuerzo de Tracción

Mostrado en la gráfica 34, los valores del esfuerzo de tracción obtenidos de las probetas son no lineales tanto para el PEBD como para el PEBDR, analizando lo anterior, se puede decir que el aumento del esfuerzo no se relaciona al %wt Fe, ya que el valor máximo de cada familia se ubica en un %wt diferente; para el caso del PEBD este valor máximo se encuentra en una concentración al 5 %wt Fe con 17.1 MPa, el cual va disminuyendo mientras él %wt Fe aumenta. Por el otro lado el PEBDR presenta un incremento notable para al 15 %wt Fe con 10.3 MPa y como en el caso del PEBD a partir de aquí a mayor %wt el esfuerzo disminuye. Debido a estas 5 familias, los resultados no son concluyentes para determinar qué sucedería en las concentraciones más altas.

Tabla 22. Concentrado de resultados Esfuerzo de Tracción

Esfuerzo de tracción (MPa)	PEBD	PEBDR
0%wt Fe	14.6	6.3
5%wt Fe	17.1	7.09
10%wt Fe	16.87	7.4
15%wt Fe	16.5	9.6
20%wt Fe	16.5	10.3
25%wt Fe	15.1	8.7



Gráfica 24- Comparación del esfuerzo de tracción entre las familias del PEBD Vs PEBDR

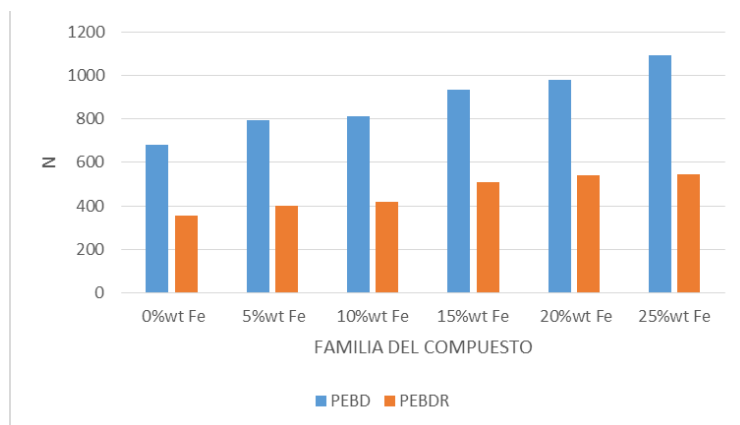
4.1.5 Carga de Fluencia

Para el análisis de la carga de fluencia (Gráfica 35), en ambos casos de la matriz, es posible identificar la tendencia de mejorar su capacidad de carga a mayor %wt Fe añadido al compuesto, de tal manera; se puede determinar que mientras mayor sea la cantidad de hierro añadido más aumentará la capacidad de carga del material. Teniendo un incremento para el PEBD del 59 %, y para el PEBDR fue del 52 %.

La carga de fluencia de las probetas se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Concentrado de resultados Carga de Fluencia

Carga de fluencia (N)	PEBD	PEBDR
0%wt Fe	682.25	355
5%wt Fe	794.04	400
10%wt Fe	813.6	418
15%wt Fe	933.2	510
20%wt Fe	981.3	541
25%wt Fe	1090.17	543



Gráfica 25- Comparativa de carga de fluencia para las familias del compuesto

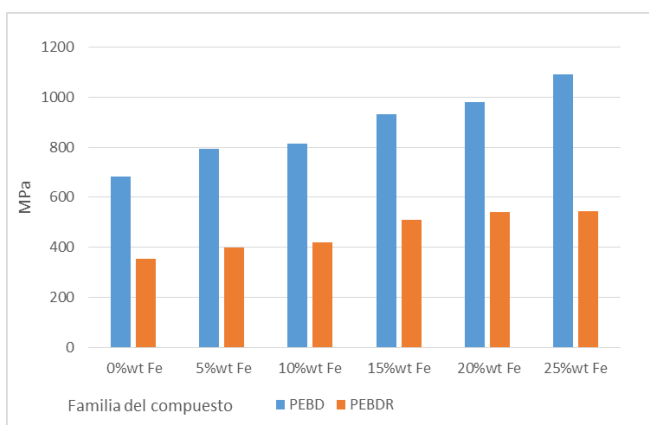
4.1.6 Módulo de Young

El módulo de Young es uno de los aspectos mecánicos esenciales para describir a cualquier material, ya que basado en este valor se pueden definir muchos parámetros para el diseño, utilización y procesos de manufactura del mismo; por tal razón, la línea central de los materiales compuestos es generar ganancias mecánicas considerables, tal como se muestra en la gráfica 36, ambas familias presentan una notable ganancia al incrementar el %wt Fe, el PEBD con un notable 76 % de incremento, mientras que el PEBDR con un elevado 98 %, lo cual quiere decir que casi duplica su módulo de Young en comparación con el material virgen.

El módulo de Young (E) obtenido de las probetas se muestra en la tabla 24.

Tabla 24. - Concentrado Módulos de Young

Módulo de Young (MPa)	PEBD	PEBDR
0%wt Fe	1237.5	401.24
5%wt Fe	1686.9	462.8
10%wt Fe	1823.3	533.8
15%wt Fe	2072	554.8
20%wt Fe	2403	699
25%wt Fe	2185	796



Gráfica 26 - Comparación Módulo de Young PEBD Vs PEBDR

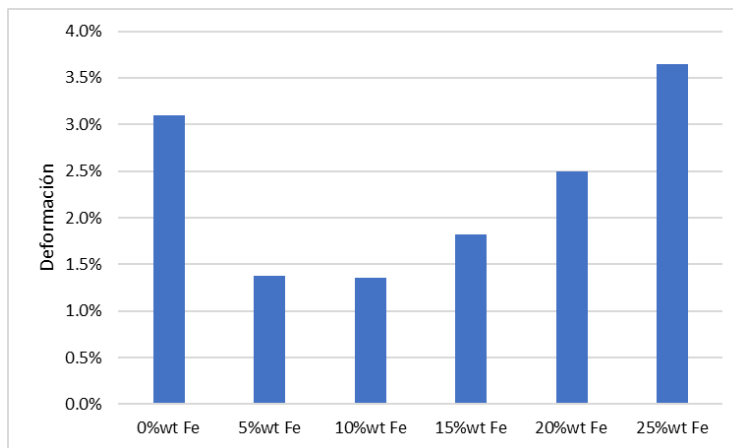
4.1.7 Deformación unitaria

Para la deformación unitaria (%) presentada en los compuestos, hubo una notable variación para esta propiedad mecánica, para lo cual se muestran los siguientes datos (Tabla 25).

Se observa en la gráfica 37 la deformación promedio para el PEBD al 0 %wt Fe es de 3.1 %, una vez agregado el 5 %wt Fe existe una notable reducción para la capacidad de deformación de 1.38 % aproximadamente, posteriormente con cada %wt añadido la deformación promedio va en aumento, este aumento llega incluso a superar el valor del PEBD virgen al 25 %wt Fe y con esta concentración presenta una deformación promedio por arriba del 3.5 %, lo cual indica que para poder superar el valor inicial del PEBD virgen es necesario que el %wt supere el 25 % Fe, tomando en cuenta que es previsible un %wt superior al 50-60 %wt en el cual podría verse nuevamente una reducción en la deformación promedio.

Tabla 55. Concentrado de deformaciones unitarias

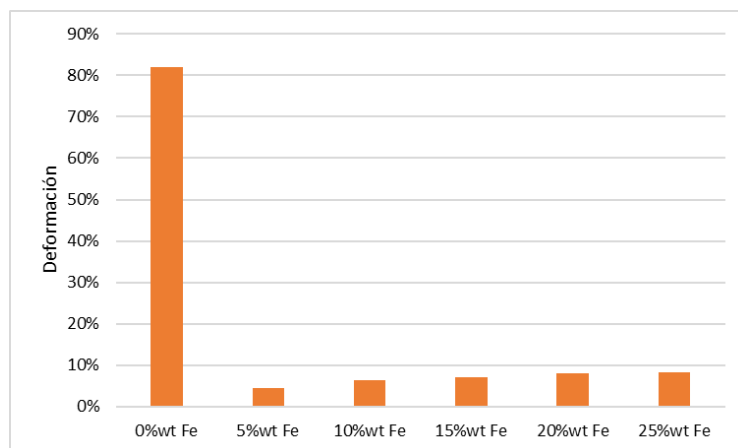
Deformación Unitaria (%)	PEBD	PEBDR
0%wt Fe	3.1	81.88
5%wt Fe	1.38	4.59
10%wt Fe	1.3	6.51
15%wt Fe	1.82	7.01
20%wt Fe	2.24	8.02
25%wt Fe	3.61	8.29



Gráfica 27 - Deformación promedio presentada por el PEBD

La separación de estas gráficas fue necesaria debido al cambio tan significativo que presenta el PEBDR, en la gráfica 38 con 0 %wt Fe el material tiene una increíble capacidad de deformación aproximada de 82 % lo cual lo hace un material altamente dúctil y maleable, sin embargo al añadir el %wt Fe se ve reducido de manera drástica esta propiedad, con tan solo un 5%wt Fe la deformación promedio se ubica con un 4.59 %, lo cual implica una reducción de casi 18 veces la capacidad del material virgen, esto es debido a que el PEBDR contiene demasiados aditivos y añadidos debido a los materiales origen de reciclaje así como los estabilizadores para el proceso de reciclado que son agregados para pelletizarlo. Como en el caso anterior, se genera una ganancia con los %wt Fe añadidos, solo que no es posible llegar al valor original del PEBD virgen, presentando un máximo de 8.29 %, o incluso superarlo como en el caso del PEBD, cabe resaltar que a pesar de que no se recupera completamente la capacidad de deformación, al 25 %wt Fe es 2.3 veces mayor que la misma presentada por el PEBD. Se puede decir que esta es la familia más afectada en

su capacidad de deformarse, sin embargo, a la máxima concentración probada, es superior en comparación al PEBD.



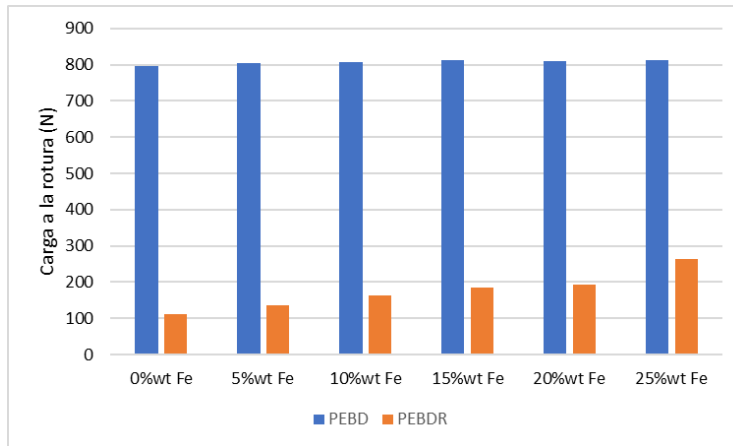
Gráfica 28 - Deformación promedio presentada por el PEBDR

4.1.8 Carga a la Rotura

Los datos obtenidos para la carga a la Rotura se presentan en la tabla 26, las unidades son Newtons (N).

Tabla 26. Concentrado de carga a la rotura de ambas familias

Carga a la rotura (N)	PEBD	PEBDR
0%wt Fe	795.8	112.45
5%wt Fe	803.25	136.96
10%wt Fe	808	163.19
15%wt Fe	812.07	185.56
20%wt Fe	812.97	193.65
25%wt Fe	813.58	264.3



Gráfica 29 - Comparación Carga a la Rotura PEBD Vs PEBDR

Para dicha carga, se observa una mayor capacidad de carga para el PEBD que para el PEBDR (Gráfica 39), tomando como base que al 0 %wt Fe las cargas respectivas en las matrices sin refuerzo es de 795.8 N y 112.45 N respectivamente; apreciando un aumento en la carga de rotura presentada en las probetas, sin embargo el aumento es insignificante para el PEBD ya que si consideramos la carga máxima alcanzada que fue al 25 %wt Fe con 813.58 N, solo representa un incremento de apenas 2.23 % respecto al material virgen, mientras que por el otro lado, para el PEBDR igualmente a la concentración 25 % Fe se tiene una carga de 264.3 N lo cual representa un aumento del 135 % respecto a su condición de material sin refuerzo, por lo tanto a pesar de que el PEBD presenta una mayor carga a la Rotura en estado virgen, la ganancia de esta con el refuerzo es mínima por lo que el PEBDR se ve más beneficiado con el refuerzo para soportar una mayor carga a la misma concentración.

4.2 Ensayo de impacto

Para poder hacer una comparación que permita caracterizar ambas familias de compuestos se muestran a continuación los datos anteriormente mostrados para su análisis. Continuando, se puede despejar la fórmula de fuerza de ruptura (Ecuación 11) para calcular el esfuerzo cortante (Ecuación 12).

$$\text{Carga}_{\text{rotura}} = \tau \cdot A \quad (11)$$

$$\tau = \frac{\text{Carga}_{\text{rotura}}}{A} \quad (12)$$

De la misma forma, como se desea también determinar la energía absorbida de la probeta, se emplea la ecuación 13 o 14.

$$E_{abs} = m \cdot g \cdot R(\cos\alpha - \cos\beta) \quad (13)$$

$$E_{abs} = m \cdot g \cdot R(H - h) \quad (14)$$

Donde:

- m= masa
- g= gravedad
- R=radio del péndulo
- α =ángulo de salida
- β =ángulo de impacto
- H=altura inicial de lanzamiento
- h=altura final de rebote

Por último, para el cálculo de la resiliencia se tiene la ecuación 15. La resiliencia es igual al trabajo realizado para deformar un material hasta su límite elástico (Gere 2008).

$$\text{Resiliencia (R)} = \frac{E_{abs}}{A} \quad (15)$$

Donde:

- E_{abs} = energía absorbida
- A= área transversal reducida

En el mismo sentido, utilizando las fórmulas presentadas y los datos descritos en la tabla 3.3 se procede a realizar los cálculos asociados a la prueba de impacto Charpy como se muestra a continuación.

4.2.1 Fuerza de ruptura de material

Concentración PEBD-Fe	Fórmula	Resultado
0%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{rotura}}{A} = \frac{795.8N}{129mm^2}$	$\tau = 6.16 MPa$
5%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{rotura}}{A} = \frac{803.3N}{129mm^2}$	$\tau = 6.22 MPa$
10%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{rotura}}{A} = \frac{808N}{129mm^2}$	$\tau = 6.26 MPa$
15%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{rotura}}{A} = \frac{812.1N}{129mm^2}$	$\tau = 6.29 MPa$
20%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{rotura}}{A} = \frac{809.9N}{129mm^2}$	$\tau = 6.27 MPa$
25%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{rotura}}{A} = \frac{813.6N}{129mm^2}$	$\tau = 6.30 MPa$

Concentración PEBDR-Fe	Fórmula	Resultado
------------------------	---------	-----------

0%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{\text{rotura}}}{A} = \frac{112.5\text{N}}{129\text{mm}^2}$	$\tau = 0.87 \text{ MPa}$
5%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{\text{rotura}}}{A} = \frac{137\text{N}}{129\text{mm}^2}$	$\tau = 1.06 \text{ MPa}$
10%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{\text{rotura}}}{A} = \frac{163.2\text{N}}{129\text{mm}^2}$	$\tau = 1.26 \text{ MPa}$
15%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{\text{rotura}}}{A} = \frac{185.6\text{N}}{129\text{mm}^2}$	$\tau = 1.43 \text{ MPa}$
20%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{\text{rotura}}}{A} = \frac{193.7\text{N}}{129\text{mm}^2}$	$\tau = 1.50 \text{ MPa}$
25%wt Fe	$\tau = \frac{\text{Carga}_{\text{rotura}}}{A} = \frac{264.3\text{N}}{129\text{mm}^2}$	$\tau = 2.04 \text{ MPa}$

4.2.2 Energía absorbida

Para este cálculo tenemos en la fórmula 13 valores que son constantes, por lo que se procederá a generar la operación de su multiplicación, para simplificar las operaciones. Donde $m=30\text{kg}$, $R=0.634\text{m}$, $g\approx 9.81\text{m/s}^2$ y $\cos(78) = 0.207$. Cabe señalar que los resultados de la fórmula son negativos, debido a que la energía al ser absorbida y no generada en el sistema resulta negativa, para los fines gráficos se utilizan los valores absolutos para homologación y comprensión.

$$E_{\text{abs}} = mgR(\cos\alpha - \cos\beta)$$

$$E_{\text{abs}} = (30\text{kg})(0.634\text{m})\left(9.81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(0.207 - \cos\beta)$$

$$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos\beta)$$

Concentración PEBD-Fe	Fórmula	Resultado
0%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 77.9)$	$E_{\text{abs}} = -0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$
5%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 77.6)$	$E_{\text{abs}} = -1.3 \text{ N} \cdot \text{m}$
10%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 77.1)$	$E_{\text{abs}} = -2.9 \text{ N} \cdot \text{m}$
15%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 76.5)$	$E_{\text{abs}} = -4.8 \text{ N} \cdot \text{m}$
20%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 76)$	$E_{\text{abs}} = -6.3 \text{ N} \cdot \text{m}$
25%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 75.7)$	$E_{\text{abs}} = -7.3 \text{ N} \cdot \text{m}$

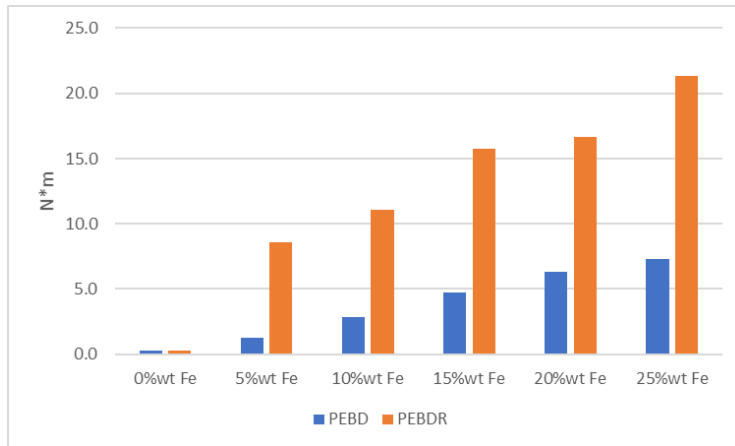
Concentración PEBDR-Fe	Fórmula	Resultado
0%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 77.9)$	$E_{\text{abs}} = -0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$
5%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 75.3)$	$E_{\text{abs}} = -8.6 \text{ N} \cdot \text{m}$
10%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 74.5)$	$E_{\text{abs}} = -11.1 \text{ N} \cdot \text{m}$
15%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 73)$	$E_{\text{abs}} = -15.8 \text{ N} \cdot \text{m}$
20%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 72.7)$	$E_{\text{abs}} = -16.7 \text{ N} \cdot \text{m}$
25%wt Fe	$E_{\text{abs}} = 186.6\text{N} \cdot \text{m}(0.207 - \cos 71.2)$	$E_{\text{abs}} = -21.3 \text{ N} \cdot \text{m}$

4.2.3 Resiliencia PEBD-Fe (R)

Concentración	Fórmula	Resultado
0%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{0.3 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.002 \frac{J}{mm^2}$
5%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{1.3 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.010 \frac{J}{mm^2}$
10%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{2.9 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.022 \frac{J}{mm^2}$
15%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{4.8 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.037 \frac{J}{mm^2}$
20%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{6.3 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.049 \frac{J}{mm^2}$
25%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{7.3 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.057 \frac{J}{mm^2}$

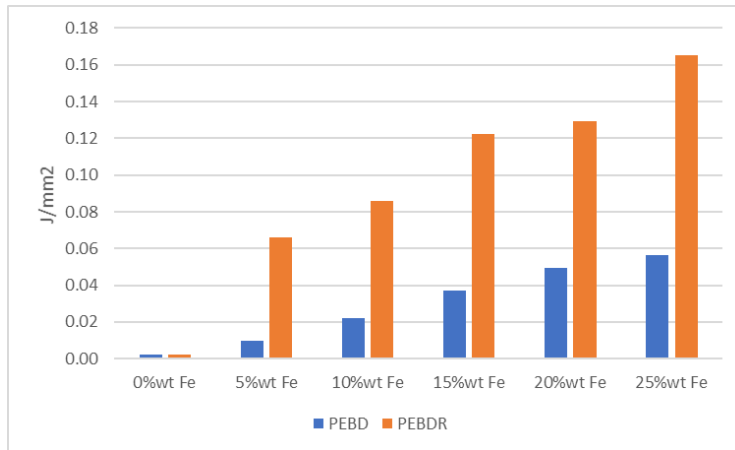
4.2.4 Resiliencia PEBDR-Fe (R)

Concentración PEBDR-Fe	Fórmula	Resultado
0%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{0.3 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.002 \frac{J}{mm^2}$
5%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{8.6 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.066 \frac{J}{mm^2}$
10%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{11.1 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.086 \frac{J}{mm^2}$
15%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{15.8 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.122 \frac{J}{mm^2}$
20%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{16.7 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.129 \frac{J}{mm^2}$
25%wt Fe	$R = \frac{E_{abs}}{A} = \frac{21.3 N \cdot m}{129mm^2}$	$R = 0.165 \frac{J}{mm^2}$



Gráfica 30 Energía absorbida

Como se puede apreciar en la gráfica 40, a un mayor %wt Fe, la energía absorbida aumenta respecto a los materiales en su estado virgen, siendo el PEBDR el que presenta la mayor cantidad de energía absorbida en el impacto, pasando de -0.3 N*m a un máximo de -21.3 N*m con 25%wt Fe, mientras que el PEBDR pasa de -0.3 N*m a -7.3 N*m. Esto significa que el PEBDR a una concentración del 25 %wt Fe, es capaz de absorber 3 veces más energía que el PEBD. Lo anterior se le puede atribuir directamente a la capacidad que le otorga la limadura de hierro a nuestra matriz polimérica de PEBDR que en estado natural es más elástica y que le permite poder amortiguar de manera más eficiente los impactos sufridos.



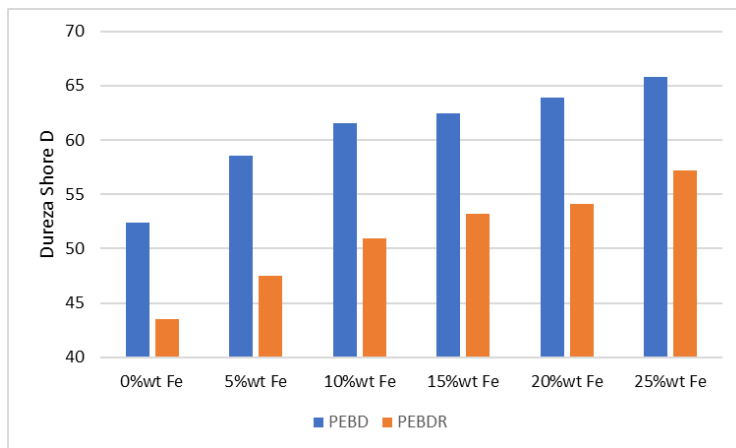
Gráfica 31 Resiliencia en prueba de impacto

Se da el nombre de resiliencia en el ensayo dinámico, a la energía consumida para romper la probeta, que se expresa como gradiente de fuerza en $\frac{J}{mm^2}$, se determina dividiendo la energía absorbida en el ensayo por la sección de probeta en la zona de ruptura.

En este caso (Gráfica 41) para el PEBD el incremento para su resiliencia es de 22.8 veces más que el PEBD virgen, con un aumento de $0.002468 \frac{J}{mm^2}$, a $0.05652 \frac{J}{mm^2}$, mientras que para el PEBDR la mejoría de $0.002468 \frac{J}{mm^2}$, a $0.16537 \frac{J}{mm^2}$, representa un aumento de 67 veces contra el PEBDR virgen. Por lo anterior el PEBDR reforzado es el que presenta una resiliencia mejorada a mayor %wt Fe. Lo anterior era un resultado esperado, debido a que la resiliencia está directamente relacionada a la capacidad de absorción de energía en el impacto del material; de modo que, el PEBDR al tener una mayor capacidad de energía absorbida consecuentemente su resiliencia también es superior a la del PEBD.

4.3 Ensayo de dureza

Por último, se procede a comparar porcentaje de concentración %wt del PEBD Vs PEBDR para el análisis del ensayo de dureza. (Gráfica 42)



Gráfica 32 - Comparación de durezas entre las familias PEBD & PEBDR

Se puede apreciar para una concentración del 0 %wt de Fe, en otras palabras para los plásticos sin refuerzo, el PEBD tiene una dureza superior al del PEBDR por casi 11 puntos Shore, para cada familia el aumento de la dureza también está en función del %wt Fe, lo cual arroja lecturas superiores conforme dicha concentración aumenta, tal es el caso del **75 %wt PEBD – 25 %wt Fe** donde el valor máximo de dureza tiene 65.8 puntos teniendo la concentración máxima y por otro lado el **75 %wt PEBDR – 25 %wt Fe** que con 57.2 puntos también arroja el valor máximo de dureza de la familia.

A pesar de verse reflejada una relación directa para la dureza respecto al %wt de Fe, el aumento que presentan es prácticamente el mismo a diferente escala, teniendo un aumento general de dureza de 13.4 puntos Shore para la familia PEBD-Fe, y un aumento general promedio de 13.7 puntos Shore para la familia PEBDR-Fe.

4.4 Propiedades mecánicas de los materiales

Una vez concluidos los cálculos se procede a realizar un análisis comparativo para la familia PEBD-Fe Vs PEBDR-Fe, se realiza la tabla 27, la cual concentra los resultados obtenidos para la caracterización final de los compuestos elaborados y establecer sus propiedades, así como sus límites de trabajo.

Tabla 27. Propiedades mecánicas de las probetas.

Propiedad	100%wt PEBD, 0%wt Fe	95%wt PEBD, 5%wt Fe	90%wt PEBD, 10%wt Fe	85%wt PEBD, 15%wt Fe	80%wt PEBD, 20%wt Fe	75%wt PEBD, 25%wt Fe
ENSAYO DE TENSIÓN						
Esfuerzo último de tensión	8.5 MPa	18 MPa	17.7 MPa	23 MPa	27 MPa	25 MPa
Esfuerzo de tracción	14.6 MPa	17.1 MPa	16.8 MPa	16.5 MPa	16.5 MPa	15.1 MPa
Deformación unitaria	3.1 %	1.3 %	1.3 %	1.8 %	2.2 %	3.6 %
Carga de fluencia	682.2 N	794 N	813.6 N	933.2 N	981.3 N	1090.1 N
Módulo de Young	1237.5MPa	1686.9MPa	1823.3MPa	2072 MPa	2403 MPa	2185 MPa
Carga a la rotura	795.8 N	803.2 N	808 N	812 N	809.9 N	813.5 N
ENSAYO DE IMPACTO						
Fuerza de ruptura del material	6.16 MPa	6.22 MPa	6.26 MPa	6.29 MPa	6.27 MPa	6.30 MPa
Energía absorbida	-0.3 N·m	-1.3 N·m	-2.9 N·m	-4.8 N·m	-6.3 N·m	-7.3 N·m
Resiliencia	0.002 $\frac{J}{mm^2}$	0.010 $\frac{J}{mm^2}$	0.022 $\frac{J}{mm^2}$	0.037 $\frac{J}{mm^2}$	0.049 $\frac{J}{mm^2}$	0.057 $\frac{J}{mm^2}$
ENSAYO DE DUREZA						
Shore D	52.4	58.6	61.6	62.5	63.9	65.8
Familia	100%wt PEBDR, 0%wt Fe	95%wt PEBDR, 5%wt Fe	90%wt PEBDR, 10%wt Fe	85%wt PEBDR, 15%wt Fe	80%wt PEBDR, 20%wt Fe	75%wt PEBDR, 25%wt Fe
ENSAYO DE TENSIÓN						
Esfuerzo último de tensión	8.0 MPa	9.8 MPa	10 MPa	13 MPa	14 MPa	14 MPa
Esfuerzo de tracción	6.3 MPa	7.0 MPa	7.4 MPa	9.6 MPa	10.3 MPa	8.7 MPa
Deformación unitaria	81.8 %	4.5 %	6.5 %	7.0 %	8.0 %	8.2 %
Carga de fluencia	355 N	400 N	418 N	510 N	541 N	543 N
Módulo de Young	401.2 MPa	462.8 MPa	533.8 MPa	554.8 MPa	699 MPa	796 MPa
Carga a la rotura	112.4 N	136.9 N	163.1 N	185.5 N	193.6 N	264.3 N
ENSAYO DE IMPACTO						
Fuerza de ruptura del material	0.87 MPa	1.06 MPa	1.26 MPa	1.43 MPa	1.50 MPa	2.04 MPa
Energía absorbida	-0.3 N·m	-8.6 N·m	-11.1 N·m	-15.8 N·m	-16.7 N·m	-21.3 N·m
Resiliencia	0.002 $\frac{J}{mm^2}$	0.066 $\frac{J}{mm^2}$	0.086 $\frac{J}{mm^2}$	0.122 $\frac{J}{mm^2}$	0.129 $\frac{J}{mm^2}$	0.165 $\frac{J}{mm^2}$
ENSAYO DE DUREZA						
Shore D	43.5	47.5	50.9	53.2	54.1	57.2

Como se muestra, la mayoría de las propiedades mecánicas del compuesto se ven beneficiadas y directamente relacionadas con el incremento del %wt Fe, con excepción del esfuerzo de tracción, mientras que las propiedades más favorecidas para el PEBD (0%wt Fe contra 25%wt Fe) fueron el Esfuerzo último a la tensión (+290%), Carga a la fluencia (+159%), Módulo de Young (+176%) y la Energía absorbida (+2430%); por otro lado para el PEBDR (0%wt Fe contra 25%wt Fe) fueron el Esfuerzo último a la tensión (+164%), Módulo de Young

(+198%), Carga a la rotura (+235%), Fuerza de ruptura del material (+234%) y la Energía absorbida (+7100%).

Una vez obtenidos estos resultados se puede aplicar el sistema de diseño que se requiera para determinar si el material cumple con los requisitos mínimos de sus propiedades mecánicas y de esa manera poder encontrarle un uso y ser utilizado en alguna aplicación. Se deben considerar las recomendaciones de operación, manejo y manufactura para poder seleccionar la mejor opción.

4.5 Recomendaciones de manufactura, proceso e investigación a futuro

No podemos dar por finalizado la sección de resultados sin agregar el hecho de que el proceso de extrusión y vaciado en el molde es crucial en la elaboración del compuesto, cabe señalar que se debe de hacer de manera muy cuidadosa y estrictamente en las proporciones que se mostraron anteriormente en el diseño de los compuestos; lo anterior debido a que durante el proceso de manufactura se detectó con la práctica que al ser este un método no sistematizado o industrializado se debe generar un mismo proceso y orden en el vaciado al molde, si no se tiene cuidado con esto pueden llegar a existir cavidades dentro de nuestro material vertido, los cuales se verán reflejados como una disminución directa a sus propiedades mecánicas.

Como se menciona anteriormente, el presente trabajo muestra una caracterización piloto, la cual, deberá generar en un trabajo posterior un muestreo mayor por cada %wt para tener mayor confiabilidad en la reproducibilidad y replicabilidad de los resultados, de esta manera; obtener una tabla concentrada de la caracterización con los valores reales mas apegados a los que se obtendrán de los materiales una vez fabricados.

Como medida de contención lo que se recomienda en procesos de vaciado como este, es que se realice de manera cíclica, generando un circuito (Figura 38) para el recorrido del hilo que se obtiene de la extrusión, de este modo el material que va cayendo hace que las burbujas que pueda haber se empujen y quede un

material más homogéneo dentro del molde previo a la compresión que recibirá en la prensa hidráulica.

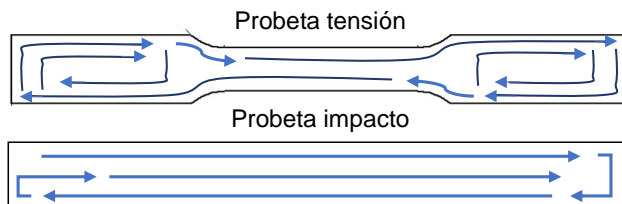


Figura 38. Proceso de vaciado en el molde para Tensión e impacto

También hay que recordar que para poder desmoldar cada probeta para este trabajo se dejó enfriar una vez comenzado el ciclo de prensado alrededor de 7-8 minutos para permitir que el material endureciera y aprovechando la contracción térmica de este, se utilizó una punta de metal insertándola en algún borde libre y haciendo palanca para desmoldarlo. Por tanto, falta incorporar un mecanismo para la fácil extracción de la probeta una vez enfriada.

Para el uso en aplicaciones estructurales se deberán tomar en consideración el material que se deseará sustituir por un compuesto, para este tipo de aplicaciones se recomienda la elección con una ingeniería inversa, lo cual implica identificar el material a sustituir y obtener sus principales propiedades mecánicas y poder encontrar la sustitución más óptima con los valores mostrados anteriormente, e incluso poder predecir si alguna concentración mayor de las experimentadas podría satisfacer dicha necesidad.

Es imprescindible conocer la situación que tenemos en México con el mal manejo de RSU y el reciclaje, no es de sorprender la gran cantidad de plásticos que acaban en tiraderos, ríos y mares los cuales son la principal fuente de contaminación. Solo por mencionar, con 48 kilogramos por persona al año, México supera el promedio de consumo de Latinoamérica que es de 32 kg (GREENPEACE MÉXICO 2017).

Con lo anterior y por lo realizado en el presente trabajo, se puede determinar que el camino del reciclaje del plástico es un área de oportunidad inmensa en la industria mexicana, la cual no ha sido explotada de manera eficiente para poder

generar un cambio de conciencia total que nos permita poder tener niveles más altos de reutilización de los plásticos y otros productos de desecho en el país.

Por ende, se pretende dar una vía de solución para el PEBD con una reingeniería de su reciclaje, de tal forma que no solo se permita que se extienda su vida útil, sino poder eficientar sus propiedades para poder redirigirlo a nuevas y aplicaciones más demandantes. Si se toma en consideración ambos materiales PEBD y PEBDR son considerables sus diferencias en sus propiedades mecánicas iniciales, los cuales son debido a que para el PEBDR ya no solo es la resina virgen sino un conjunto de pigmentos, aditivos, catalizadores, etc. que generan un material más complejo para su reproceso que el PEBD virgen.

Con las aplicaciones existentes de los materiales compuestos, es notable la gran cantidad de campos abiertos que se tienen para los nuevos diseños provenientes de esta rama del reciclaje, tal es el caso de los materiales estructurales; para los que sus criterios de aceptación es el poder tener una gran capacidad de carga y soporte a cargas dinámicas, factores de seguridad en diseño superiores a 2.0, con lo anterior, pruebas realizadas así como los datos mostrados anteriormente se puede definir que el material compuesto PEBD-Fe es mecánicamente similar en estado estático, sin embargo en carga dinámica es notoriamente diferente al PEBDR-Fe.

Lo anterior es debido a que la familia del PEBD respecto al %wt Fe presente, tienen un esfuerzo último superior conforme el material de refuerzo aumenta su concentración, esta característica permite definir a esta familia como resistente a las cargas sometidas con altos módulos de Young lo cual permite el soporte de peso sobre el material considerando sus limitaciones como la baja ductilidad. La segunda familia se trata de una serie de materiales que no tienen módulos de Young ni esfuerzos últimos tan favorecidos, sin embargo, lo compensan con altos índices de ductilidad reflejados en su deformación unitaria, así como su gran capacidad de absorción de energía en impacto, en comparación con la del PEBD.

Con lo anterior es fácilmente identificable la familia (PEBD-Fe) más óptima para generar un material que pudiera ser para aplicaciones de soporte, carga y/o

sometimiento de fuerzas los cuales estén dentro de factores de seguridad estándar; mientras que la familia PEBDR-Fe puede ser utilizada para aplicaciones donde se necesite un elevado grado de ductilidad ya sea para moldeado, compresión, amortiguación y/o cualquier trabajo que requiera de materiales con gran capacidad de deformación y resistencia a cargas repentinas pero no elevadas.

Será tarea del ingeniero de manufactura o de producto determinar las necesidades que tenga para poder elegir el material y concentración que pueda satisfacer la aplicación deseada, teniendo en cuenta que el costo de estos materiales es más barato que cualquier material de ingeniería comercial, así como dar una alternativa ecológica para la reutilización de plástico y poder generar un uso extendido de su vida promedio.

Por último, hay que recordar que el PEBD es de los plásticos menos reciclados a nivel nacional, lo cual implica toneladas que no son recolectadas y recicladas para reutilización de este material, por lo que se infiere de los resultados anteriores tanto el PEBD como el PEBDR son aptos para generar un compuesto útil y que podría dar paso a los materiales del futuro. Evidentemente el refuerzo del presente trabajo fue metálico sin embargo no se restringe al uso del PEBD con un refuerzo particulado de otro origen como el cerámico e incluso con un refuerzo con fibras que pudiera mejorar algún parámetro que se pudiera haber visto reducido con el hierro particulado.

4.6 Conclusiones

La presente tesis tuvo como objetivo proponer, probar y dar una solución para la reutilización de un material de desecho (PEBDR) y el diseño de un material compuesto, para ser utilizado en diversas aplicaciones, buscando generar un impacto ecológico positivo, alargando y otorgando mejoras a las propiedades del material virgen o reciclado. Las principales conclusiones se enlistan a continuación:

- La adición de limaduras de hierro como porcentaje (%wt) a nuestras matrices poliméricas, sí generan un incremento en sus principales propiedades mecánicas y de desempeño para su posterior utilización en campos más específicos.
- En términos generales de manufactura y manejo, el PEBDR es mucho más complejo para su reciclaje, recordando que las temperaturas de operación son superiores para su procesamiento que el PEBD. Asimismo, la velocidad de trabajo, vaciado, enfriado y desmoldeo son más elaboradas.
- El sistema de trabajo estandarizado obtenido para cada tipo de compuesto es como se muestra a continuación:

Para el PEBD-Fe las RPM's utilizadas fueron: 39

Las temperaturas de trabajo: HZ1=165°C, HZ2=175°C, HZ3=175°C y HZ4=180°C.

El programa de prensado hidráulico fue:

C1=@115°C por 150s con 950kgf

C2: @105°C por 60s con 700kgf

Enfriado de 300s

Para el PEBDR-Fe las RPM's utilizadas fueron: 44

Las temperaturas de trabajo: HZ1=200°C, HZ2=220°C, HZ3=220°C y HZ4=235°C.

El programa de prensado hidráulico fue:

C1=@135°C por 150s con 1200kgf

C2: @125°C por 60s con 900kgf

Enfriado de 300s

Comentado [m1]: Este texto, es muy interesante y se debe rescatar colocándolo en otra sección. Sin embargo las conclusiones deben ser más concretas y específicas. Por ejemplo:

-Que los valores de los diferentes parámetros obtenidos para el PEBDR son menores que los obtenidos para PEBD y explicar a que se debe dicho efecto.

-Con los valores que obtuviste para el PEBDR, que aplicaciones potenciales podrías sugerir con la finalidad de dar aplicación al material que generaste.

-Explicar que tan difícil es procesar el PEBDR comparado con el PEBD (ventajas y desventajas)

-Puedes incluir los comentarios que tienes al finalizar las gráficas, donde justificas el porqué de los valores obtenidos.

-Etc.

- La mejora mecánica presentada por el PEBD en su esfuerzo último a la tensión en comparación con el PEBDR se puede atribuir a la capacidad de adherencia entre el PEBD-Fe Vs el PRBDR-Fe; de esta manera se determina que el agarre intergranular del PEBDR con el Fe permite más cedencia, lo cual no permite incrementar considerablemente dicho esfuerzo por el reacomodo continuo que sufre.
- El PEBDR es el material con mayor capacidad de deformación, considerando su pérdida inicial al 5%wt Fe respecto al material virgen, este vuelve a incrementar dicha capacidad conforme las concentraciones aumentan (Gráfica 38).
- La dureza sí se ve incrementada por el %wt Fe particulado añadido, tanto para la familia del PEBD, así como el PEBDR; sin embargo, se debe tomar en consideración que el orden de dureza aumentado fue similar (13.4 y 13.7 puntos Shore respectivamente), esto significa que los valores iniciales del material solo sirven como base, mas no están relacionados con el incremento de su dureza.
- En términos de la resiliencia, el PEBDR es el que proporciona un mejor valor, $0.165 \frac{J}{mm^2}$, y desempeño, porque el material naturalmente, y dada su maleabilidad y ductilidad, permite que todos los esfuerzos a los que se somete sean soportados y deformen al material antes de hacerlo fallar.
- En la carga a la rotura el PEBD proporciona un compuesto más resistente a los esfuerzos por unidad de área antes de su rotura, esto se traduce en la capacidad mecánica del material y poder ser utilizado en esfuerzos axiales de tensión y diseñar con un factor de seguridad apropiado dependiendo su aplicación final.
- Respecto al módulo de Young, ambas familias presentan una notable mejoría al incrementar el %wt de Fe; el PEBD, con un incremento del 76%, mientras que el PEBDR con un 98%; el último de estos cercano a duplicar su módulo en comparación al material virgen.
- Para propuesta final de los compuestos analizados, se tienen dos productos finales objetivo para su sustitución por alguno de estos. En el caso de los compuestos PEBD-Fe una opción de material es el neopreno de construcción, debido a que necesita ser un material que soporte

grandes cargas con una mínima resistencia a la tracción de 15.5 MPa antes de sufrir su ruptura, una dureza shore superficial cercana a 65 puntos y un rango de temperatura de trabajo entre -25°C a 110°C. Todos los criterios anteriores son cumplidos por el PEBD, sumado a lo anterior el Fe genera un material de color negro, por lo que otorga una resistencia a la exposición UV que se necesita en aplicaciones exteriores (Figura 39).



Figura 39. Neopreno de construcción en un puente

Mientras que para el compuesto PEBDR-Fe es posible utilizarlo como plástico de inyección para partes automotrices de interior (paneles, manijas, solapas, cubiertas, etc.), recordando el caso anterior, la limadura de Fe otorga una atractiva apariencia física y un acabado brillante con destellos metálicos, al mismo tiempo al ser un material que necesita una temperatura alta de trabajo, el sistema de inyección permitiría que en cantidades pequeñas de inyección se pueda otorgar parte de esa energía calorífica en forma de fricción en el sistema de alimentación al molde (Figura 40).



Figura 40. Interiores plásticos de un automóvil

Bibliografía

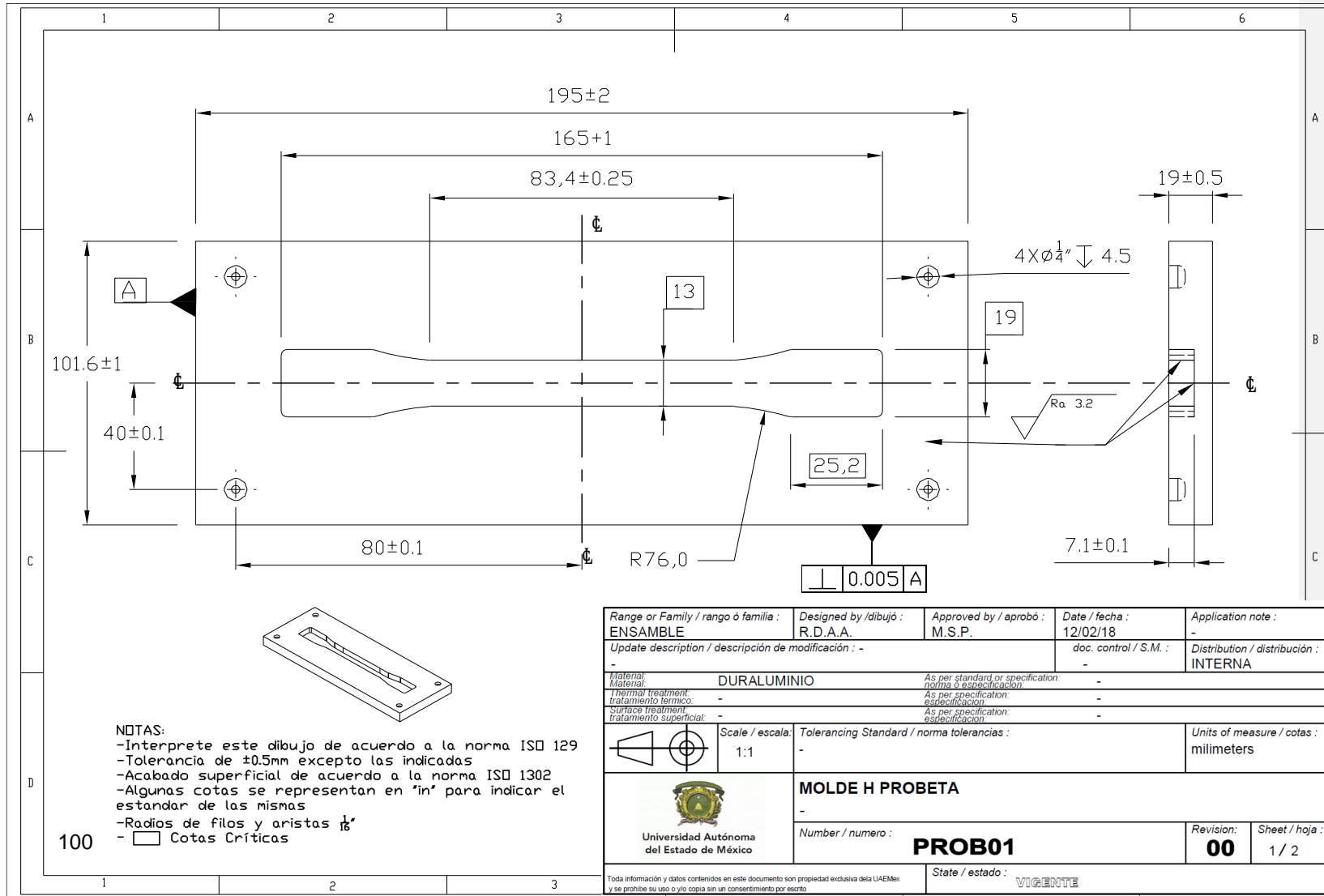
- Acurio, G., Rossin A., Texeira P.F., y Zepeda F. *Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y*. Washington DC: BID Organización Panamericana, 1997.
- Anderson, J., Leaver K. D., Rawlings R. D., y Alexander J. M. *Ciencia de los Materiales*. Limusa, 1998.
- Askeland, Donald, y Pradeep Phulé. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Ciudad de México: Cengage learning, 2004.
- ASTM E8-04. «Tensile testing of metallic materials. Method of test at ambient temperature.» *American Society For Testing and Materials*, 2004: 2-3.
- ASTM. «Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastic.» *American Society of Testing and Materials*, 2004.
- . «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.» *American Standard for Testing and Materials*, 1999.
- Callister, William. *Ciencia e Ingeniería de los materiales Vol II*. Barcelona: Reverté, 1996.
- Chiellini, Emo, y Roberto Solaro. *Biodegradable Polymers and Plastics*. USA: Kluwer Academic, 2003.
- CNIEP. «Confederación Nacional de Instituciones Empresariales Privadas.» *¿Qué es la economía circular?* 09 de Abril de 2019. <https://www.confiep.org.pe/noticias/sostenibilidad/economia-circular/> (último acceso: 09 de Julio de 2019).
- CPI PRODYSOL. *Apartado Durezas Shore*. s.f. <https://www.cpisefa.com/dureza-shores/> (último acceso: 18 de 09 de 2018).
- Da tu opinión*. 2011. <https://www.datuopinion.com/extrusion-de-polimero> (último acceso: 12 de Dic de 2018).
- Derraik, J. G. B. «The Pollution of the Marine Environment by Plastic Debris: A Review.» *Marine Pollution Bulletin*, 2002: 842-855.
- Dowling, Norman E. *Mechanical Behavior of Marterials 3rd edition*. Prentice Hall, 2007.
- ECOCE. «Plan Nacional Privado Colectivo de Manejo de Residuos de Envase Post-Consumo de PET, PEAD, y otros.» 2015, 7-10.
- Ehsan Azarsa, Amir Mostafapour. «On the feasibility of producing polymer–metal composites via novel.» *Journal of Manufacturing Processes*, 2013: 682-688.
- Fabio A., Cruz Sanchez, Boudaoud Hakim, Hoppe Sandrine, y Camargo Mauricio. «Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues.» *Additive Manufacturing*, 2017: 87-105.
- Gay, Daniel. *Composite Materials Design and Applications*. Alabama: CRC Press, 2014.
- Gere, James. *Mechanics of materials*. Cengage Learning, 2008.
- Gonzales; Palazon,. *Ensayos Industriales*. Ediciones Litenia, 1973.
- GREENPEACE MÉXICO. *¿Qué tan plástico eres?* 2017. <http://www.greenpeace.org/mexico/es/Noticias/2017/Octubre/Que-tan-plastico-eres/> (último acceso: 3 de Septiembre de 2018).
- Hibbeler, R. *Propiedades mecánicas de los materiales*. México: Prentice Hall, 1998.

- Hoornweg, D., y Bhada-Tata P. «What a waste. A Global review of Solid Waste management.» *Urban Development Series. Knowledge Papers*, nº 15 (2012).
- IMAC. *Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional*. 31 de 08 de 2015. http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/DyCDM/DyCDM_Cap2.pdf (último acceso: 24 de 09 de 2018).
- IMPI. *Enciclopedia del plástico*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Plástico Industrial, 1997.
- Jones, Robert. *Mechanics of Composite Materials*. McGraw-Hill, 1975.
- Karl, Ziegler. <https://www.nobelprize.org>. 12 de Diciembre de 1963. https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1963/ziegler-lecture.pdf (último acceso: 10 de Enero de 2018).
- La Paloma. *Aluminio*. s.f. https://www.lapaloma.com.mx/lapaloma_metalos/aluminio.html (último acceso: 28 de Enero de 2019).
- Mathot, V. *Calorimetry and Thermal Analysis of Polymers*. Munich: Hanser, 1994.
- Meirovitch, Leonard. En *Analytical methods in vibrations*, 382-410. New York: McMillan, 1976.
- NatGeo. *National Geographic Channel*. 12 de Diciembre de 2018. https://www.nationalgeographic.com/es/ciencia/actualidad/tipos-plastico-segun-su-facilidad-reciclaje_12714/6 (último acceso: 14 de Marzo de 2019).
- Navarro, Carlos, y Enrique Barbero. *Elasticidad y resistencia de materiales II*. Madrid: Universidad Carlos III, 2008.
- Ortega, Y. «Prueba de impacto: ensayo Charpy.» *Departamento de Física de Materiales*, 08 de Abril de 2009.
- Ortiz Berrocal, Luis. *Resistencia de materiales*. Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- Ortiz, Luis. *Resistencia de materiales*. Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- Plastics Europe Market Research Group. «Distribution of global plastics production.» *Conversio Market*, 2018: Infographic.
- Plastics Europe. *Plastics - the Facts 2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data*. 2015.
- Ramos, Luis. *Extrusión de plásticos*. Ciudad de México: Limusa, 1993.
- Römer, Lin, y T. Scheibel. «The elaborate structure of spider silk: Structure and function of a natural high performance fiber.» *Prion*, 2008: 154-161.
- Royer, S-J, S Ferrón, ST Wilson, y Karl DM. «Production of methane and ethylene from plastic in the environment.» *PLoS ONE*, 2018: 3.
- Rupinder Singh, Narinder Singh, Francesco Fabbrocino, Fernando Fraternali, I.P.S. Ahuja. «Waste management by recycling of polymers with reinforcement of.» *COMPOSITES PART B*, 2016: 23-29.
- SEMARNAT. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. Ciudad de México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015.
- Sheikh-Ahmad, Jamal Y. *Machining of polymer composites*. Primera. Abu Dhabi: Springer, 2009.
- Smith, William, y Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. CDMX: McGraw-Hill, 2006.
- Torres García, Fernando. «POLÍMEROS : PROCESOS DE MANUFACTURA Y DISEÑO. PARTE I: TERMOPLÁSTICOS.» *Revista de química*, 2009: 62-63.

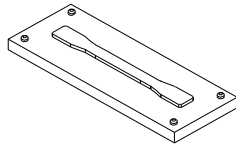
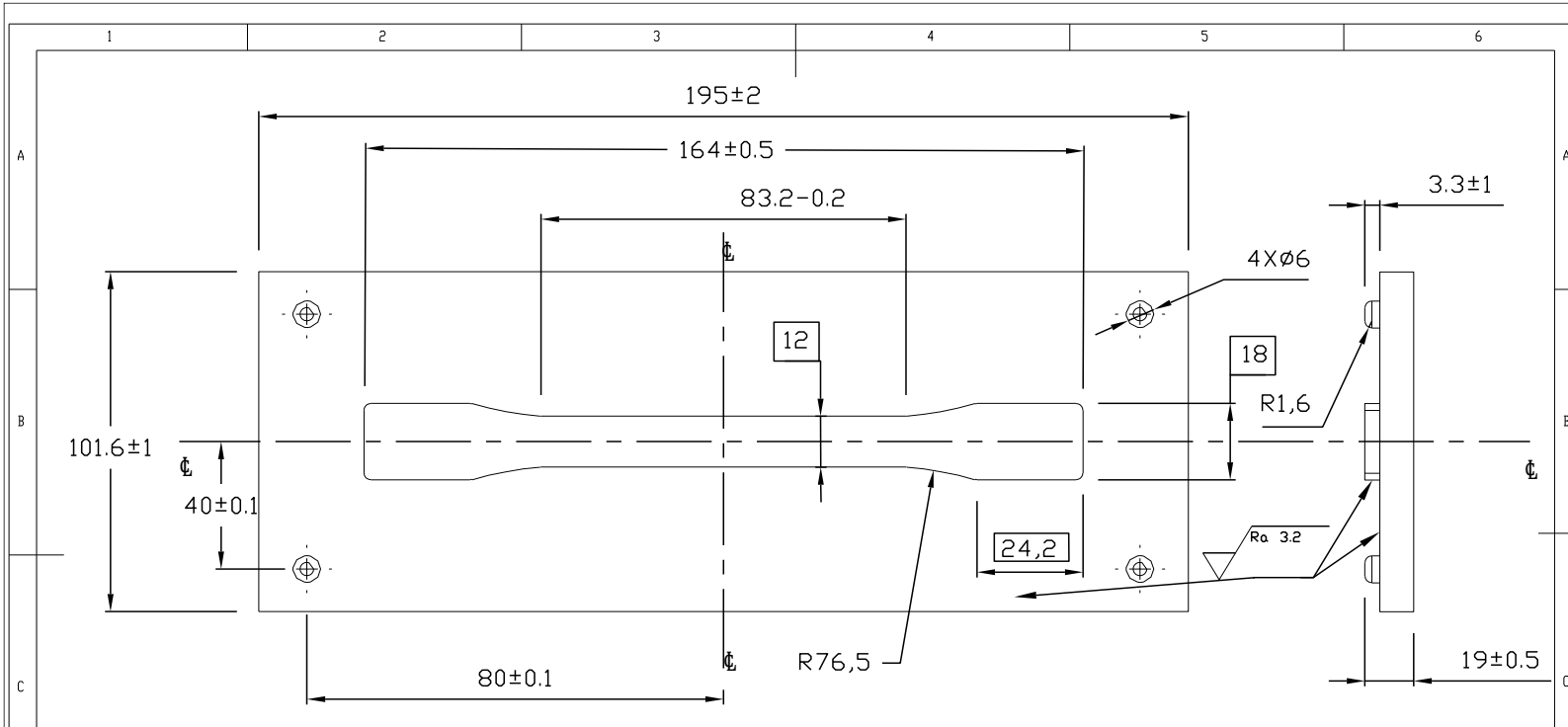
- Tsai, Stephen. *Diseño y análisis de materiales compuestos*. Barcelona: Reverté, 1988.
- UNEP. *Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change*. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2016.
- University of Southampton. *at% and wt%*. 2018. <https://www.southampton.ac.uk/~pasr1/g5.htm> (último acceso: 13 de enero de 2019).
- Van Sebille, E., C. Wilcox, L. Lebreton, N. Maximenko, y B. Hardesty. *A global inventory of small floating plastic debris*. 124006, *Environmental Research Letters* 10, 2015.
- Vázquez, Alethia, Rosa Espinoza, Margarita Beltrán, y Maribel Velasco. «El reciclaje de plásticos.» *UAM*, 2014: 3-5.

◀————▶ Anexos ◀————▶

ANEXO A



ANEXO B

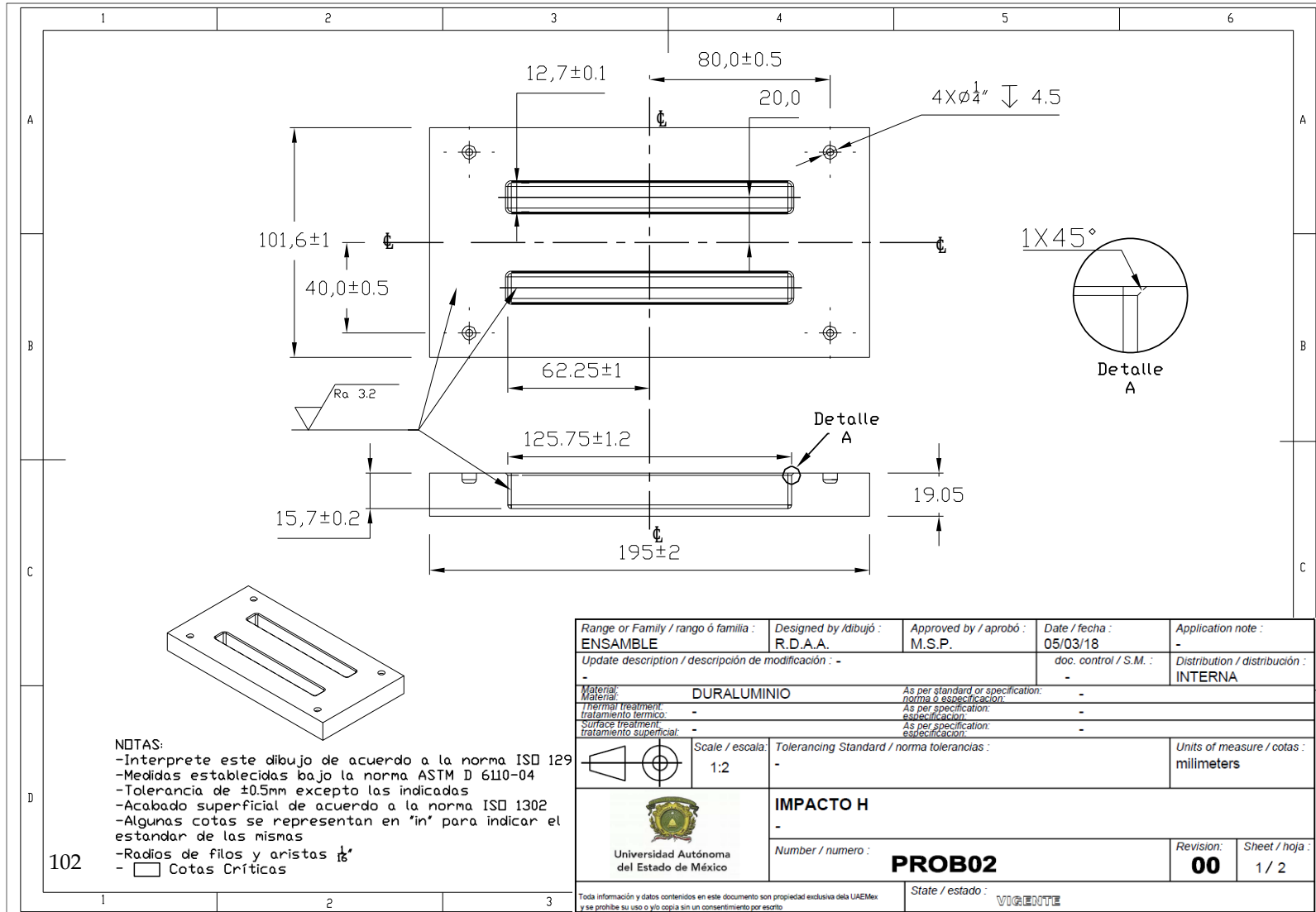


- NOTAS:
- Interprete este dibujo de acuerdo a la norma ISO 129
 - Tolerancia de $\pm 0.5\text{mm}$ excepto las indicadas
 - Acabado superficial de acuerdo a la norma ISO 1302
 - Algunas cotas se representan en "in" para indicar el estandar de las mismas
 - Radios de filos y aristas $\frac{1}{16}$ "
 - Cotas Críticas

101

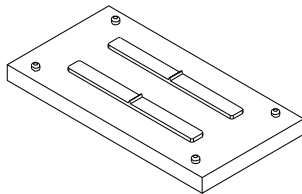
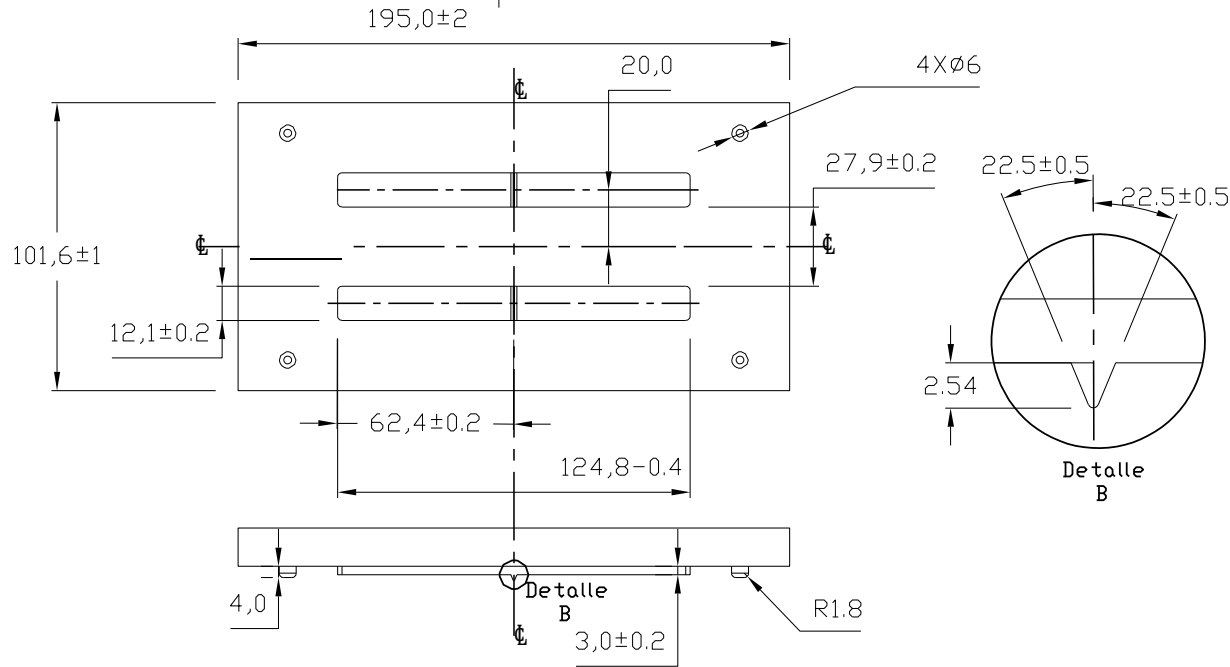
Range or Family / rango ó familia : ENSAMBLE	Designed by /dibujó : R.D.A.A.	Approved by / aprobó : M.S.P.	Date / fecha : 12/02/18	Application note : -
Update description / descripción de modificación : -			doc. control / S.M. : -	Distribution / distribución : INTERNA
Material: Materia:	DURALUMINIO		As per standard or specification: norma ó especificación	-
Thermal treatment: tratamiento termico	-		As per specification: especificación	-
Surface treatment: tratamiento superficial	-		As per specification: especificación	-
	Scale / escala: 1:1	Tolerancing Standard / norma tolerancias : -	Units of measure / cotas : millimeters	
 Universidad Autónoma del Estado de México		MOLDE M PROBETA		
		Number / numero : PROB02	Revision: 00	Sheet / hoja : 2 / 2
Toda información y datos contenidos en este documento son propiedad exclusiva de la UAEMex y se prohíbe su uso o y/o copia sin un consentimiento por escrito			State / estado : VIGENTE	

ANEXO C



Range or Family / rango ó familia : ENSAMBLE	Designed by /dibujó : R.D.A.A.	Approved by / aprobó : M.S.P.	Date / fecha : 05/03/18	Application note : -
Update description / descripción de modificación : -		doc. control / S.M. : -	Distribution / distribución : INTERNA	
Material: DURALUMINIO		As per standard or specification: norma o especificación: -		
Thermal treatment: tratamiento térmico: -		As per specification: especificación: -		
Surface treatment: tratamiento superficial: -		As per specification: especificación: -		
	Scale / escala: 1:2	Tolerancing Standard / norma tolerancias : -		Units of measure / cotas : millimeters
		IMPACTO H		
Universidad Autónoma del Estado de México		Number / numero : PROB02	Revision: 00	Sheet / hoja : 1 / 2
Toda información y datos contenidos en este documento son propiedad exclusiva de la UAEMex y se prohíbe su uso o ylo copia sin un consentimiento por escrito		State / estado : VIGILANTE		

ANEXO D



NOTAS:

- Interprete este dibujo de acuerdo a la norma ISO 129
- Medidas establecidas bajo la norma ASTM D 6110-04
- Tolerancia de ±0.5mm excepto las indicadas
- Acabado superficial de acuerdo a la norma ISO 1302
- Algunas cotas se representan en "in" para indicar el estandar de las mismas
- Radios de fillos y aristas $\frac{1}{16}$ "
- Cotas Criticas

103

Range or Family / rango ó familia : ENSAMBLE	Designed by /dibujó : R.D.A.A.	Approved by / aprobó : M.S.P.	Date / fecha : 05/03/18	Application note : -
Update description / descripción de modificación : -			doc. control / S.M. : -	Distribution / distribución : INTERNA
Material: Material:	DURALUMINIO		As per standard or specification: norma ó especificación	-
Thermal treatment: tratamiento termico:	-		As per specification: especificación	-
Surface treatment: tratamiento superficial:	-		As per specification: especificación	-
	Scale / escala: 1:2	Tolerancing Standard / norma tolerancias : -		Units of measure / cotas : millimeters
		IMPACTO M		
Universidad Autónoma del Estado de México		Number / numero : PROB02	Revision: 00	Sheet / hoja : 2 / 2
Toda información y datos contenidos en este documento son propiedad exclusiva de la UAEMex y se prohíbe su uso o y/o copia sin un consentimiento por escrito		State / estado : VIGENTE		