

UNIVERSIDAD PANAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Con estudios incorporados a la  
Secretaría de Educación Pública

**“DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA EL RECICLAJE DE  
POLIETILENO A TRAVÉS DE LA EXTRUSIÓN DE  
FILAMENTOS”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A

**DEA CORTÉS MORALES**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DRA. MARÍA JOSÉ HERNÁNDEZ QUINTANA**

# Resumen

El objetivo de esta investigación es definir un polímero diferente del Tereftalato de polietileno (mejor conocido como PET) que pueda ser utilizado dentro de un método de fabricación de filamentos después de pasar por un tratamiento de reciclaje, para poder ser utilizado en aplicaciones justo como actualmente lo hace el PET.

Actualmente el polímero más utilizado en el mundo es el Polietileno de alta densidad (PEAD), pero no es el más reciclado (cuyo lugar pertenece al PET) debido a que sus propiedades se pueden llegar a degradar tras pasar por el proceso de reciclaje y extrusión. Por esta razón y por la facilidad de adquisición en productos de la vida cotidiana, se seleccionó el PEAD para comprobar si puede ser utilizado en otras industrias (por ejemplo, la textil) después de ser reciclado.

Para comprobar esto, se fabricaron hilos de aproximadamente 1.5 mm de diámetro y 140 mm de largo, de ambos tipos de materiales, utilizando una máquina de inyección de plástico. Para los hilos de (PEAD), se fabricaron cambiando ciertas variables como la temperatura de extrusión, el proceso de enfriamiento del hilo, y si el hilo era transparente o pigmentado. Las diferentes condiciones de manufactura se obtuvieron con la ayuda de la herramienta Diseño de Experimentos (DOE).

Después de haber fabricado los hilos, se midieron ciertas propiedades fundamentales de los mismos como el Módulo de Young, el Esfuerzo Máximo, el Esfuerzo de Cedencia, el Porcentaje de Elongación, entre otros. El centro de la experimentación se basó en definir si el PEAD puede ser utilizado después de ser reciclado, al comparar las propiedades medidas de los hilos de PEAD contra las medidas de los hilos de PET. Se seleccionará, con la ayuda del DOE y Análisis de Varianza (ANOVA), la combinación de variables de manufactura y composición que resulte en hilos con mejores propiedades mecánicas.

Después de realizar las mediciones de las propiedades de los hilos de PEAD y de PET, se concluyó que las mejores propiedades mecánicas del PEAD reciclado se encuentran cuando las hojuelas provienen de envases con pigmentos azules, se extruyen a 105°C y el enfriamiento es al aire ya que con estas características se obtuvo una resistencia a la cedencia y a la tensión y porcentaje de elongación del hilo muy cercano a lo que presenta un hilo de PET.



## Dedicatoria y agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, por todo el apoyo que me ha brindado y con el que he podido salir adelante. Ustedes son mi fuerza y la razón por la que busco superarme diariamente. Principalmente, me gustaría agradecer a mis padres, por siempre confiar en mí y apoyarme durante el camino para cumplir todos mis objetivos.

También agradezco a mis hermanos, por siempre ser mi ejemplo y guía para buscar superarme. La preparación para lograr este trabajo inició desde casa con su apoyo para verme en la mejor posición.

Un muy especial agradecimiento a mis abuelitos y tíos, porque cada uno de ellos ha sido un ejemplo esencial en mi vida, gracias a todos ustedes he podido forjar mi camino y tomar las decisiones que me han llevado a cumplir mis metas.

Agradezco a mi asesora de tesis, la Doctora María José Quintana Hernández, por sus valiosos consejos y recomendaciones durante la investigación y redacción de este escrito.

# Índice

Introducción .....	10
Situación actual .....	10
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos.....	12
Hipótesis.....	12
1 Antecedentes y estado de la cuestión .....	13
1.1 Polímeros.....	13
1.2 Características, clasificación y manufactura de los polímeros.....	14
1.2.1 Tipos de polimerización.....	14
1.2.2 Características generales de los polímeros .....	15
1.2.3 Clasificación de los polímeros .....	15
1.2.4 Procesos de manufactura de polímeros.....	17
1.3 Ensayos de pruebas mecánicas de polímeros.....	20
1.4 Principales propiedades mecánicas .....	22
1.5 Reciclaje de polímeros .....	22
1.5.1 Ejemplos de reciclaje de polímeros.....	25
2 Metodología .....	29
2.1 Consumo de recipientes de PEAD .....	29
2.2 Diseño de Experimentos .....	30
2.3 Manufactura de filamentos y medición de propiedades mecánicas .....	33
3 Resultados obtenidos.....	39
3.1 Consumo promedio de PEAD en la vida diaria de las personas .....	39
3.2 Mediciones de las propiedades de los filamentos bajo distintas condiciones de manufactura .....	42
3.2.1 PET .....	42
3.2.2 Combinación 1: PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en agua....	44
3.2.3 Combinación 2: PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua	45
3.2.4 Combinación 3: PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en aire .....	46
3.2.5 Combinación 4: PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire.	47
3.2.6 Combinación 5: PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en agua....	48
3.2.7 Combinación 6: PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua	49
3.2.8 Combinación 7: PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en aire .....	50

3.2.9	Combinación 8: PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire .	51
4	Análisis de los resultados obtenidos .....	54
4.1	Curvas esfuerzo-deformación .....	54
4.2	Análisis estadístico de la varianza .....	59
	Conclusiones.....	63
	Recomendaciones para trabajos futuros .....	65
	Referencias Bibliográficas .....	66

# Índice de figuras

Figura 1.1 Moléculas poliméricas (a) lineales, (b) ramificadas y (c) entrecruzadas <sup>(18)</sup> .....	14
Figura 1.2 Proceso de Pelletización <sup>(28)</sup> .....	17
Figura 1.3 Proceso de inyección de polímeros <sup>(29)</sup> .....	18
Figura 1.4 Proceso de termoformado de polímeros <sup>(30)</sup> .....	19
Figura 1.5 Proceso de extrusión de polímeros <sup>(31)</sup> .....	19
Figura 1.6 Configuración de la máquina de ensayos universales para ensayos de tracción <sup>(16)</sup> .....	20
Figura 1.7 Herramientas para flexión <sup>(16)</sup> .....	21
Figura 1.8 Ladrillos PET <sup>(39)</sup> .....	25
Figura 1.9 Tenis Adidas® hechos con polímero reciclado <sup>(41)</sup> .....	26
Figura 1.10 Pintura impermeabilizante <sup>(42)</sup> .....	26
Figura 1.11 Playeras Nike® hechas con polímero reciclado <sup>(45)</sup> .....	27
Figura 1.12 Nortpalet Logistics Oporto 2017 <sup>(47)</sup> .....	27
Figura 1.13 Carreteras en India hechas de polímero reciclado <sup>(50)</sup> .....	28
Figura 2.1 Dibujo en SolidWorks® de botella de yogurt bebible.....	30
Figura 2.2 Dibujo en SolidWorks® de botella de suavizante .....	31
Figura 2.3 a) Máquina de inyección de la Universidad Panamericana y b) máquina de inyección en uso para fabricación de filamentos .....	34
Figura 2.4 Filamento polimérico previo al ensayo de tracción .....	35
Figura 2.5 Máquina Instron® de la Universidad Panamericana .....	35
Figura 2.6 Filamentos poliméricos durante el ensayo de tracción .....	36
Figura 2.7 Cálculo de área, esfuerzo y deformación para los mismos siete resultados .....	36
Figura 2.8 Obtención de propiedades mecánicas sobre las gráficas esfuerzo-deformación..	38
Figura 3.1 Consumo semanal de botellas de yogurt bebible para cuatro diferentes familias	40
Figura 3.2 Filamento después de ser ensayado a tracción .....	42
Figura 3.3 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PET .....	42
Figura 3.4 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 1).....	44
Figura 3.5 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 2).....	45
Figura 3.6 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 3) .....	46
Figura 3.7 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 4) .....	47

Figura 3.8 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 5).....	48
Figura 3.9 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 6).....	49
Figura 3.10 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 7) .....	50
Figura 3.11 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 8) .....	51
Figura 4.1 Curvas esfuerzo-deformación de filamentos de PEAD a 105°C (combinaciones 1 a 4): corrida 3 para PEAD aire-azul, corrida 5 para PEAD agua-azul, corrida 5 para PEAD agua-blanco y corrida 2 para PEAD aire-blanco .....	54
Figura 4.2 Curva esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD a 130° C (combinaciones 5 a 8): corrida 6 para PEAD aire-azul, corrida 1 para PEAD agua-azul, corrida 4 para PEAD agua-blanco y corrida 3 para PEAD aire-blanco .....	55
Figura 4.3 Curva esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD con enfriamiento en agua (combinaciones 1, 2, 5 y 6): corrida 5 para PEAD 105°C-azul, corrida 5 para PEAD 105°C-blanco, corrida 1 para PEAD 130°C-azul y corrida 4 para PEAD 130°C-blanco.....	56
Figura 4.4 Curva esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD con enfriamiento en aire (combinaciones 3, 4, 7 y 8): corrida 3 para PEAD 105°C-azul, corrida 2 para PEAD 105°C-blanco, corrida 6 para PEAD 130°C-azul y corrida 5 para PEAD 130°C-blanco.....	57
Figura 4.5 Curvas esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD a con pigmento azul (combinaciones 1, 3, 5 y 7): corrida 5 para PEAD 105°C-agua, corrida 3 para PEAD 105°C-aire, corrida 1 para PEAD 130°C-agua y corrida 6 para PEAD 130°C-aire.....	58
Figura 4.6 Curvas esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD con pigmento blanco (combinaciones 2, 4, 6 y 8): corrida 5 para PEAD 105°C-agua, corrida 2 para PEAD 105°C-aire, corrida 4 para PEAD 130°C-agua y corrida 3 para PEAD 130°C-aire.....	59
Figura 4.7 Gráfica de efectos principales para la deformación en el punto de cedencia .....	60
Figura 4.8 Gráfica de efectos principales para el esfuerzo de cedencia .....	60
Figura 4.9 Gráfica de interacción de la deformación en el punto de cedencia. ....	61
Figura 4.10 Gráfica de interacción del esfuerzo de cedencia. ....	62
Figura 6.1 Envases de polietileno de alta densidad de distintos colores <sup>(60)</sup> .....	65
Figura 6.2 Bolsas de polietileno de baja densidad de distintos colores <sup>(61)</sup> .....	65

# Índice de tablas

Tabla 0.1 Delegaciones con mayor generación de residuos en la Ciudad de México <sup>(7)</sup> .....	11
Tabla 1.1 Características mecánicas a temperatura ambiente de polímeros <sup>(16)</sup> .....	22
Tabla 1.2 Sistema Internacional de Clasificación de Polímeros <sup>(34)</sup> .....	23
Tabla 2.1 Factores y niveles del diseño de experimentos.....	32
Tabla 2.2 Combinaciones posibles del experimento diseñado .....	32
Tabla 2.3 Propiedades a medir en los filamentos .....	33
Tabla 3.1 Consumo semanal de botellas de yogurt bebible para cuatro diferentes familias.	39
Tabla 3.2 Toneladas de botellas de yogurt generadas en México .....	41
Tabla 3.3 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PET .....	43
Tabla 3.4 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 1) .....	44
Tabla 3.5 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 2) .....	45
Tabla 3.6 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 3).....	46
Tabla 3.7 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 4).....	47
Tabla 3.8 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 5) .....	48
Tabla 3.9 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 6) .....	49
Tabla 3.10 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 7) .....	50
Tabla 3.11 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 8) .....	51
Tabla 3.12 Promedio de resultados de ensayos mecánicos de las ocho combinaciones de PEAD y de PET .....	52
Tabla 4.1 Efectos principales (1 factor) - ANOVA.....	61
Tabla 4.2 Efectos principales (2 y 3 factores a la vez) .....	62
Tabla 5.1 Comparación de propiedades entre los polímeros PET y PEAD grado comercial y los reciclados.....	63

# Introducción

## Situación actual

En México, aproximadamente el 11% de los residuos generados son polímeros. Dentro de ellos se encuentran el Polietileno de Alta Densidad (PEAD), Polietileno de Baja Densidad (PEBD), Cloruro de Polivinilo (PVC), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) y Tereftalato de Polietileno (PET), entre otros <sup>(1)</sup>.

Además, la contaminación en el aire, suelo y agua es resultado del mal tratamiento que se les da a los residuos generados diariamente. Entre ellos están los polímeros, cuya degradación es excesivamente lenta: hasta mil años dependiendo del polímero <sup>(2)</sup>, debido a componentes que lo hacen altamente resistente al medio ambiente, ya que no se descomponen ni se oxidan a través del tiempo <sup>(3)</sup>.

Existen tres tipos de clasificaciones para la basura <sup>(4)</sup>:

- **Basura residencial:** es la generada por cada uno de los habitantes de una ciudad o país.
- **Basura domiciliaria:** es la suma de residuos que genera cada individuo dentro de una casa.
- **Basura urbana:** se refiere al total de basura generada por una ciudad entera.

Actualmente, de acuerdo con el Instituto Nacional de Salud Pública, en la Ciudad de México se han implementado diversos programas de separación y tratamiento de basura para reducir el impacto ambiental negativo generado por la basura, entre los que se encuentran el Programa para el uso racional y eficiente del agua, el Programa para el uso racional y eficiente de la energía eléctrica, el Programa para el control y manejo integral de residuos sólidos urbanos, y el Programa para el control y manejo de residuos peligrosos <sup>(5)</sup>. Con esto, el gobierno espera disminuir el uso de rellenos sanitarios y aumentar los procesos de reutilización y reciclaje, así como crear consciencia y disminuir la explotación de estos recursos <sup>(6)</sup>.

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente, en esta misma ciudad se generan aproximadamente 13,000 toneladas de basura al día. En la actualidad los desechos orgánicos sí cuentan con un proceso especializado para ser utilizados como composta, pero los desechos sólidos inorgánicos no

cuentan con un tratamiento específico y son depositados en tiraderos y rellenos sanitarios en el Estado de México y Morelos. Además, aproximadamente el 41% de la generación de los residuos sólidos se da en las tres delegaciones mostradas en la Tabla 0.1 <sup>(7)</sup>.

**Tabla 0.1 Delegaciones con mayor generación de residuos en la Ciudad de México <sup>(7)</sup>.**

<b>Delegación</b>	<b>Toneladas de residuos</b>
Iztapalapa	2,247
Gustavo A. Madero	1,709
Cuauhtémoc	1,325

México tiene una superficie terrestre de aproximadamente 2,000,000 km<sup>2</sup> y un mar patrimonial de casi 2,700,000 km<sup>2</sup> y es uno de los países con mayor cantidad de especies habitándolo. Por otra parte, es uno de los países más contaminados en el mundo, siendo la razón principal el uso excesivo de recursos y falta de cultura ambiental <sup>(8)</sup>.

En México se tienen diversos centros de acopio ubicados en distintos estados en los que se reciben y separan todo tipo de desechos para darles el tratamiento adecuado para reutilizarse. En ellos, los materiales que más se recolectan diariamente son papel, cartón, PET y vidrio. Las entidades que separan la basura de manera correcta y en mayor cantidad en México son: Querétaro (57%), Jalisco (40%), Nuevo León (30%), Ciudad de México (18%) y Estado de México (15%). Sin embargo, cuando toda la basura llega al tiradero, la basura se mezcla nuevamente <sup>(9)</sup>.

A pesar de lo anterior, sólo se recicla el 15% de residuos poliméricos que se generan al año. Aunque es un porcentaje bajo se la da un uso provechoso, ya que se exporta a Asia aproximadamente el 65% de PET reciclado, en donde es tratado y reenviado a México en forma de fibras sintéticas. Eduardo Martínez Hernández, presidente de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico, menciona en una entrevista que en México sólo existe una planta que se dedica a transformar PET en fibras sintéticas, la cual se encuentra en Tlaxcala y recomienda vincular la industria del reciclado y acopio de PET con la industria textil para aprovecharlo al máximo y evitar la exportación de polímeros y la importación de regreso en forma de telas, juguetes o cualquier material textil sintético <sup>(10)</sup>.

Ciertos países tienen leyes que rigen el porcentaje máximo de PET reciclado que pueden contener los envases para alimentos, pero no para el polietileno (que es el polímero más utilizado en el mundo). Susan Freinkel y la Fundación Ellen McArthur indican que sólo el 5% de las piezas hechas con polímero se reciclan a nivel mundial (a pesar de recolectar 14% para su reciclaje), además sólo cerca de 80% de la botellas de PET se reciclan para convertirse en fibras para ropa o alfombras <sup>(11; 12)</sup>. Queda claro que promover

el reciclaje de PET de mejor manera es importante, pero aún más es encontrar soluciones para reciclar otros polímeros ya que el PET no es el único material que contamina los océanos y continentes. La presente tesis es una propuesta para encontrar las mejores condiciones para reciclar polietileno, que es el polímero más producido a nivel mundial, a través de la extrusión de hilos.

El polietileno puede llegar a sufrir cambios en su comportamiento después de varios procesos de reciclaje (algunos autores reportan 30 ciclos, menor número a comparación del PET que es de 50) como son reducción en la viscosidad del polímero en estado líquido (dificultando la manufactura), cambios en el módulo a cortante, reducción de las temperaturas de fusión y cristalización y reducción en la cristalinidad (con efecto directo a la transparencia) <sup>(13)</sup>. Pero sigue existiendo un amplio espacio para diseñar procesos de reciclaje de PEAD y disminuir la contaminación debido a este material.

### **Objetivo general**

Definir la composición de un polímero y sus condiciones óptimas de manufactura que, al igual que el PET, pueda utilizarse para producir hilos o piezas de consumo diario.

### **Objetivos específicos**

- Definir el polímero a reciclar que pueda sustituir al PET.
- Fabricar hilos del polímero seleccionado bajo ciertas condiciones de manufactura y medir propiedades mecánicas importantes de los mismos.
- Comparar las propiedades medidas contra las del PET para determinar si el polímero seleccionado puede ser utilizado en aplicaciones similares y bajo qué condiciones de manufactura.

### **Hipótesis**

Si se encuentra un polímero distinto al PET pero con propiedades similares al ser reciclado a través de la extrusión de filamentos, entonces se incentivaría a personas y empresas a reciclar éste y otros polímeros y se disminuiría el impacto de la contaminación ambiental.

# 1 Antecedentes y estado de la cuestión

## 1.1 Polímeros

La palabra *polímero* es definida de diversas maneras. La Real Academia de la Lengua Española brinda varias definiciones a este concepto, como las siguientes:

*“Dicho de un material que, mediante una compresión, puede cambiar de forma y conservar esta de modo permanente, a diferencia de los cuerpos elásticos.”* (Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española*. Madrid, España: s.n., 05 de Noviembre de 2016).

*“Dicho de ciertos materiales sintéticos que pueden moldearse fácilmente y están compuestos principalmente por polímeros, como la celulosa.”* (Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española*. Madrid, España: s.n., 05 de noviembre de 2016).

*“Capaz de ser moldeado.”* (Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española*. Madrid, España: s.n., 05 de Noviembre de 2016).

La historia de los polímeros se remonta al uso de polímeros naturales, como cuernos o pezuñas de animales. Sin embargo, con el paso del tiempo, y debido a la dificultad de recolección y tratamiento de los mismos, se buscaron nuevos métodos y materiales sintéticos para reemplazarlos. El primer polímero sintético fue creado en el año de 1860, cuando en un concurso, el inventor norteamericano Wesley Hyatt desarrolló un método de procesamiento a presión de un nitrato de celulosa de baja nitración. Posteriormente, en 1909, el químico norteamericano Leo Hendrick Baekeland sintetizó un polímero a partir de moléculas de fenol y formaldehído, creando un polímero al que posteriormente se le dio el nombre de *Baquelita* <sup>(14)</sup>.

Estos descubrimientos inspiraron a otros químicos a buscar otras moléculas sencillas que pudieran crear polímeros, y así, en los años treinta, un par de científicos ingleses descubrieron el polietileno, y en la década de los cincuentas se descubre el polipropileno. Posteriormente, en las próximas décadas se fueron descubriendo poco a poco otros polímeros como el *nylon*, silicón, policarbonato y poliéster, entre otros <sup>(14)</sup>.

## 1.2 Características, clasificación y manufactura de los polímeros

### 1.2.1 Tipos de polimerización

La manufactura de los polímeros, conocida como polimerización, se realiza mediante alguna de las siguientes dos maneras:

- **Adición:** en este proceso se abren los enlaces dobles entre los átomos de carbono en los monómeros de etileno para que puedan unirse a otras moléculas de monómero <sup>(15)</sup>.
- **Condensación:** es la formación de polímeros por mediación de relaciones químicas intermoleculares que normalmente implican más de una especie monomérica <sup>(16)</sup>.

Dependiendo del tipo de polímero, las moléculas pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas <sup>(14)</sup>. Los polímeros lineales (Figura 1.1a) constan de una estructura secuencial, los polímeros ramificados (Figura 1.1b) contienen cadenas de ramas laterales conectadas a la cadena principal y, finalmente, los polímeros entrecruzados (Figura 1.1c) son aquellos que tienen cadenas adyacentes unidas por enlaces covalentes <sup>(17; 18)</sup>.

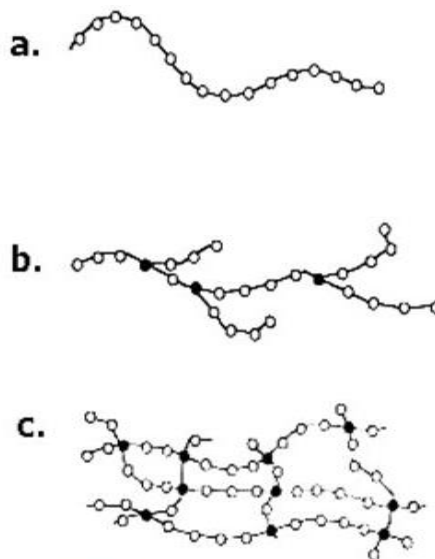


Figura 1.1 Moléculas poliméricas (a) lineales, (b) ramificadas y (c) entrecruzadas <sup>(18)</sup>.

### 1.2.2 Características generales de los polímeros

Los polímeros tienen las siguientes características generales <sup>(14)</sup>:

- Aislamiento térmico y eléctrico.
- Buena resistencia a ácidos.
- Resistencia a corrosión y oxidación.
- Baja densidad.

### 1.2.3 Clasificación de los polímeros

Esta familia de materiales se clasifica de la siguiente manera <sup>(19)</sup>:

- **Termoplásticos:** son polímeros que, sujetos al calor, se vuelven fluidos y por lo tanto pueden ser moldeables. Una vez que se enfrían y endurecen pueden volver ser sometidos al mismo tratamiento.
- **Termofijos:** son polímeros que, sujetos al calor, también se vuelven fluidos moldeables, pero una vez que se enfrían y endurecen no pueden volver a ser sometidos al proceso, ya que no retoman su estado fluido.
- **Elastómeros:** son materiales sumamente flexibles y que pueden ser sometidos a grandes deformaciones sin perder su forma original.

Cabe mencionar que los polímeros más utilizados en el mundo son los termoplásticos, y en su mayoría, son polímeros que pueden reutilizarse. Algunos ejemplos son:

- **Polietileno (PE):** polímero sintético que se obtiene por medio de la polimerización del etileno. Se clasifica de acuerdo a la densidad que presenta en polietileno de baja densidad ( $920\text{--}040\text{ kg/m}^3$ ) y polietileno de alta densidad ( $940\text{--}960\text{ kg/m}^3$ ) <sup>(20)</sup>. Este material se utiliza en diversos productos como bolsas de plástico, envases para detergentes, envases para pintura, biberones, juguetes, envases de alimentos, entre otros. Cada uno de estos productos utiliza diferentes tipos de polietileno dependiendo de la densidad que necesitan para el tratamiento, transporte o tipo de producto a contener <sup>(21)</sup>.

- **Polipropileno (PP):** polímero termoplástico parcialmente cristalino que tiene grandes propiedades, como la resistencia contra varios solventes químicos y la resistencia a ácidos y álcalis<sup>1</sup>. Tiene menor densidad que los polietilenos de baja densidad y su punto de fusión es 165°C<sup>(22)</sup>, también es más resistente a temperaturas altas o bajas. Es utilizado para contenedores de alimento con resistencia a altas temperaturas, láminas, tubos, fibras, películas para embalaje, entre otros<sup>(23)</sup>.
- **Cloruro de Polivinilo (PVC):** material que está compuesto por cloro y etileno que, a altas temperaturas, se transforma en gas cloruro de vinilo para posteriormente, por medio de una polimerización, convertirse en polvo blanco y fino llamado PVC. Este material es utilizado en su mayoría en fabricación de tuberías y recubrimiento de cables y paredes. Éste es uno de los componentes poliméricos más dañinos para el medio ambiente, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas durante su producción y tratamientos de eliminación<sup>(24)</sup>.
- **Poliestireno (PS):** polímero termoplástico que se obtiene a partir de la polimerización del estireno, y que se clasifica en cuatro tipos: poliestireno cristal, poliestireno de alto impacto, poliestireno expandido y poliestireno espumado mediante extrusión. Es uno de los polímeros con menor impacto ambiental, debido a su peso liviano para transportación, además requiere menos uso de energía para su producción. Este material en su mayoría es utilizado en la industria de alimentos para empacar y distribuir productos consumibles<sup>(25)</sup>.
- **Tereftalato de Polietileno (PET):** termoplástico duro con alta resistencia al impacto, insoluble, buena resistencia a tensión y altamente reciclable. Este material es utilizado principalmente en botellas para agua y garrafones<sup>(19)</sup>.

Estos polímeros en conjunto son conocidos como *commodities* y son los polímeros que se encuentran con mayor frecuencia en los desechos generados en el mundo, por su bajo costo de producción y fácil tratamiento. Por otro lado, los termofijos y elastómeros son más complejos, por lo que su reciclaje es sumamente complicado y, en comparación con el de los termoplásticos, es más caro. Como se dijo anteriormente, estos polímeros no pueden retomar sus propiedades una vez que son sometidos a temperaturas elevadas, y por esta razón sólo pueden reciclarse por medio de pulverización o molido para ser agregados como cargas en matrices de otros polímeros<sup>(26)</sup>.

---

<sup>1</sup> “Compuesto que en disolución acuosa se comporta como una base fuerte.” (Real Academia Española. Diccionario de la Lengua Española. Madrid, España: s.n., 05 de noviembre de 2016).

## 1.2.4 Procesos de manufactura de polímeros

### 1.2.4.1 Termoplásticos

Existen diferentes procesos de manufactura para todos los tipos de polímeros, dependiendo de las características y propiedades de los polímeros. Algunos de los procesos de conformado para termoplásticos son <sup>(23)</sup>:

- **Pelletización:** este proceso (Figura 1.2) consiste en crear trozos pequeños del polímero para su futura transformación. A continuación, se mencionan los pasos de este proceso <sup>(27; 28)</sup>:
  1. Reducir el tamaño de la materia prima necesaria.
  2. Secar los trozos pequeños de materia prima.
  3. Moler o cortar los trozos en *pellets*.
  4. Mezclar las materias primas con agua para proseguir a la compactación. El agua es el material que sirve de aditivo para que se peguen los *pellets* y se logren compactar a la presión necesaria.
  5. Prensar a alta presión y temperatura, lo que resulta en una compactación de calidad para la quema de *pellet*.
  6. Seleccionar y tamizar para eliminar los residuos o trozos con defectos.
  7. Empaquetar y almacenar para su distribución.

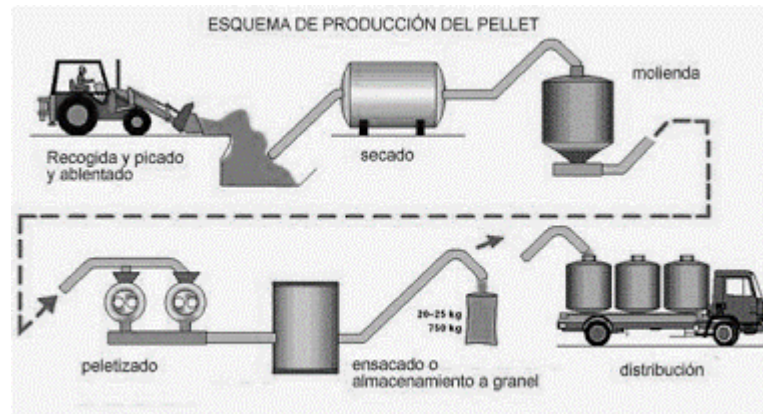


Figura 1.2 Proceso de Pelletización <sup>(28)</sup>

- **Inyección:** este proceso consiste en introducir el polímero granulado (*pellets*) dentro de un cilindro caliente, en donde un tornillo funciona como émbolo y, cuando el polímero alcanza la temperatura de reblandecimiento, el tornillo lo introduce a presión dentro de un molde de acero. Así, cuando éste toma la forma del molde, se enfría por medio de agua caliente para que regrese a su forma rígida y mantenga la forma del molde (Figura 1.3). Éste es uno de los procesos más utilizados en la industria de producción en serie por el nivel de productividad que tiene, economía y rapidez <sup>(29)</sup>.

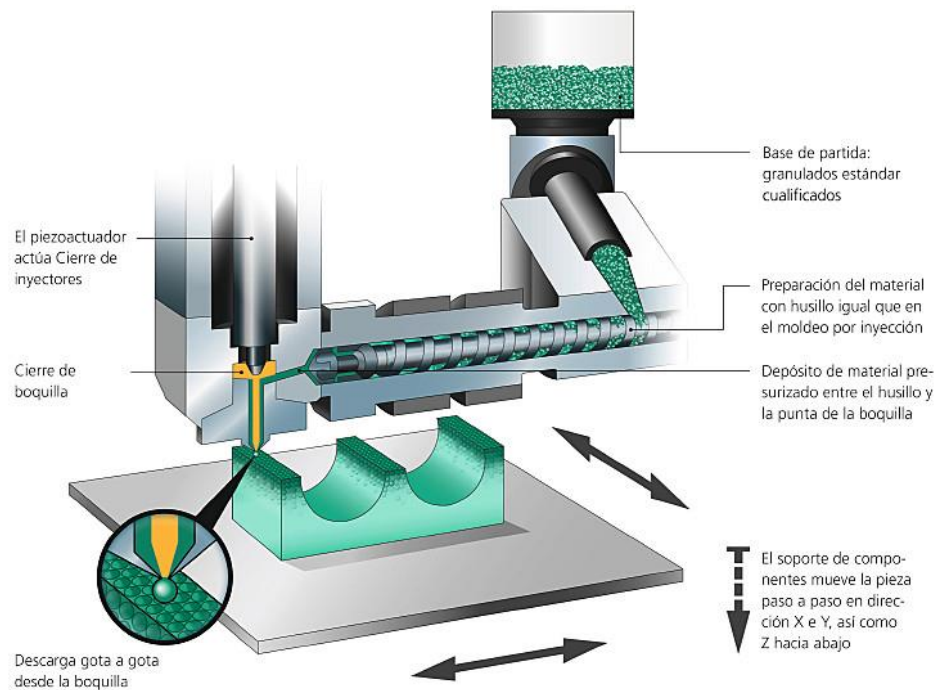


Figura 1.3 Proceso de inyección de polímeros <sup>(29)</sup>

- **Termoformado:** este proceso se utiliza para formar láminas de polímero aplicando calor y presión dentro de un molde. Primero se debe realizar un proceso de vaciado para eliminar el aire que queda entre la lámina y el molde, posteriormente se aplica aire caliente sobre la lámina de polímero logrando que se adhiera al molde y tome su forma <sup>(30)</sup>. La Figura 1.4 muestra los pasos del proceso.
- **Extrusión:** este proceso consiste en fundir la resina para que, por medio de temperatura y presión, sea forzada a pasar a través de un dado con una forma definida. Finalmente, se enfría la resina para provocar que la

deformación sea permanente. Este proceso, mostrado en la Figura 1.5, es muy funcional para piezas de polímero que se necesitan producir en grandes volúmenes <sup>(31)</sup>.

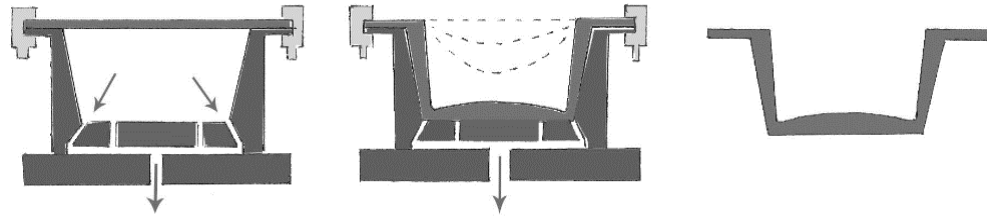


Figura 1.4 Proceso de termoformado de polímeros <sup>(30)</sup>

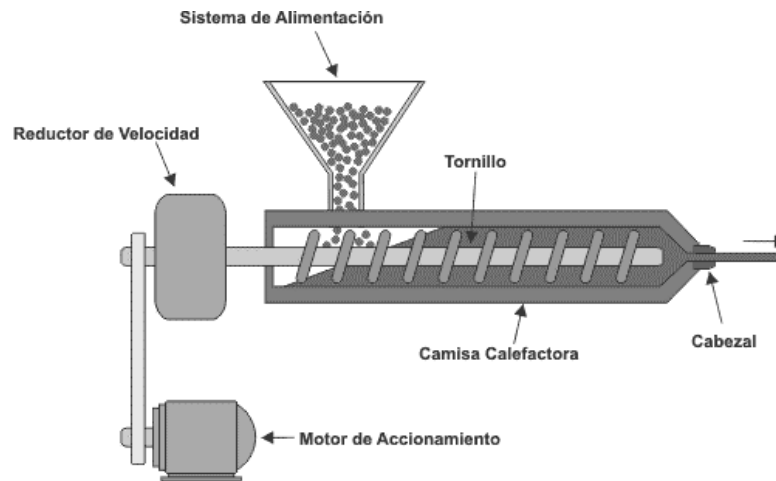


Figura 1.5 Proceso de extrusión de polímeros <sup>(31)</sup>

#### 1.2.4.2 Termofijos

Por otro lado, algunos de los procesos de conformado existentes para termofijos son <sup>(23)</sup>:

- **Compresión:** en este proceso, el material entra en un molde abierto en el que se aplica presión para que el polímero adopte la forma del molde. Este proceso requiere temperatura, presión y tiempo, y es utilizado para obtener piezas de tamaño pequeño y mediano debido a las altas presiones a las que necesitan ser sometidas.

- **Transferencia:** en este proceso, el molde se encuentra completamente cerrado y se carga en una vasija redonda para que el material pase por un cilindro bajo presión que lo empuja fuera del mismo por las entradas y salidas de las cavidades.
- **Colado:** en este proceso, se vierte el polímero en estado líquido dentro de un molde para fraguarse y solidificarse. Este proceso es utilizado para pocas piezas por la calidad de materiales que se utiliza para los moldes, así como por el tiempo que toma el producir las piezas.
- **Espumado:** en este proceso, se produce una mezcla del polímero con aditivos para formar burbujas de aire dentro de la masa del proceso. Este procedimiento es utilizado para la producción de espumas para colchones, aislantes térmicos, esponjas y embalajes entre otros.
- **Calandrado:** en este proceso, el polímero pasa en estado líquido por rodillos bajo presión que producen láminas de diferente espesor.

### 1.3 Ensayos de pruebas mecánicas de polímeros

Las propiedades de los materiales sólidos se dividen en mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas. Las propiedades mecánicas se relacionan con la deformación al aplicar una carga o fuerza, dos ejemplos de estas propiedades son el módulo elástico y la resistencia <sup>(16)</sup>.

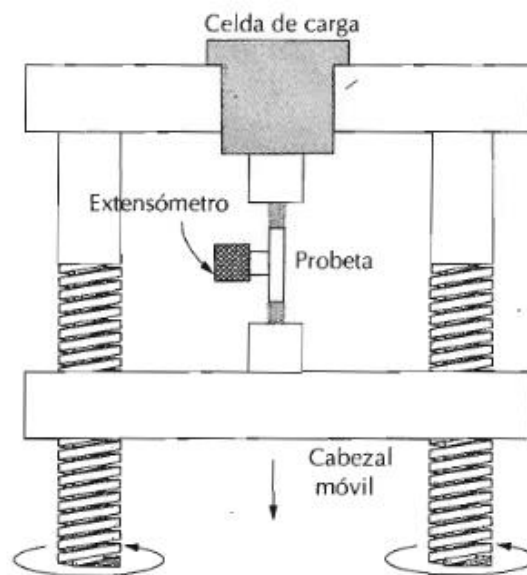


Figura 1.6 Configuración de la máquina de ensayos universales para ensayos de tracción <sup>(16)</sup>

Para conocer con mayor precisión las propiedades mecánicas de los materiales, existen diversos ensayos, uno de los más comunes para definir el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales es el de tracción. Este ensayo consiste en deformar una probeta hasta su ruptura, con una carga de tracción que se aplica de forma gradual uniaxialmente, a lo largo del eje de la probeta, como se puede ver en la Figura 1.6 <sup>(16)</sup>.

El ensayo de tracción consiste en, una vez que se colocó la probeta entre las mordazas, mover el bastidor o cabezal móvil hacia abajo a una velocidad constante (definida por normas o estándares) hasta que la probeta llegue a la fractura <sup>(16)</sup>.

Otro ensayo comúnmente utilizado es el de flexión (Figura 1.7), que es un arreglo de tres puntos de flexión en un ángulo específico. Durante la prueba se coloca el material en el centro del molde y se presiona en el centro de la probeta con una cierta fuerza. Así se obtiene la ductilidad y la rigidez (resistencias a la tensión y a la compresión) del material <sup>(16; 32)</sup>.

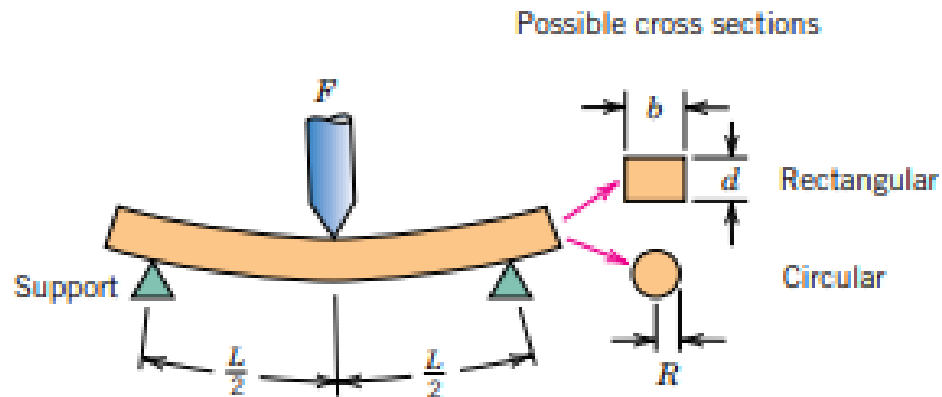


Figura 1.7 Herramientas para flexión <sup>(16)</sup>

Derivado de estos ensayos, existen diversos tipos de deformación, elástica, plástica. La deformación elástica se cumple cuando la deformación es proporcional a la tensión, es decir, el material no se deforma permanentemente y regresa a su forma y dimensiones originales. Si el material sufre grandes deformaciones, es decir se sobrepasa de su límite elástico, entonces entra a la etapa de deformación plástica y no puede recuperarse la forma original <sup>(16)</sup>.

## 1.4 Principales propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas más importantes de los polímeros (Tabla 1.1) son la densidad, módulo elástico, resistencia a la tracción, alargamiento a la rotura y resistencia al impacto <sup>(16)</sup>.

Tabla 1.1 Características mecánicas a temperatura ambiente de polímeros <sup>(16)</sup>

Material	Densidad	Módulo Elástico	Resistencia a la tracción	Alargamiento a la rotura	Resistencia al impacto
Poliétileno baja densidad	0.917-0.932	0.25-0.41	1.2-4.6	100-650	N/A
Poliétileno alta densidad	0.952-0.965	1.55-1.58	3.2-4.5	10-1200	0.4-4.0
Cloruro de polivinilo	1.30-1.58	3.5-6.0	5.9-7.5	40-80	0.4-22
Politetrafluoretileno	2.14-2.20	0.58-0.80	2.0-5.0	200-400	3
Polipropileno	0.90-0.91	1.6-2.3	4.5-6.0	100-600	0.4-1.2
Poliestireno	1.04-1.05	3.3-4.8	5.2-7.5	1.2-2.5	0.35-0.45
Poli (metacrilato de metilo)	1.17-1.20	3.3-4.7	7.0-11.0	2-10	0.3-0.6
Fenol-formaldehido	1.24-1.32	4.0-7.0	5.0-9.0	1.5-2.0	0.24-4.0
Nilón 66	1.13-1.15	2.3-5.5	11.0-13.7	15-300	0.55-2.1
Poliéster (PET)	1.29-1.40	4.0-6.0	7.0-10.5	30-300	0.25-0.70
Policarbonato	1.2	3.5	9.5	110	16

\*Densidad en g/cm<sup>3</sup>, Módulo Elástico en GPa, Resistencia a la tracción en MPa, Alargamiento a la Rotura en % y Resistencia al impacto en J

## 1.5 Reciclaje de polímeros

Existen diversos procesos de tratamiento y reciclaje de polímeros para disminuir el volumen de desperdicios de los mismos. A continuación, se enlistarán los procesos con los que pueden ser tratados estos desechos <sup>(23)</sup>:







- El *reciclaje primario* se utiliza cuando los termoplásticos se encuentran limpios y homogéneos para realizar su separación, y así molerlos y pelletizarlos nuevamente para convertirse en materia prima.
- El *reciclaje secundario* no se obtiene del polímero original. Se puede obtener de termoestables o polímeros contaminados, el proceso es molerlos y fundirlos dentro de un extrusor.
- El *reciclaje terciario* involucra un cambio químico y físico, es decir, las cadenas de los polímeros se rompen para formar pequeños monómeros al hacer un degradado del polímero.

- El *reciclaje cuaternario* busca utilizar los polímeros como combustibles térmicos para crear energía y así utilizarla para realizar otros procesos.

Cabe mencionar que para lograr todos los tratamientos que se han detallado anteriormente es necesario realizar la separación de los componentes poliméricos encontrados o recaudados. Esta separación debe hacerse por tipo de termoplástico, colores, componentes, aditivos químicos o peso molecular, para mantener el mayor grado de pureza posible y facilitar los procesos a los que serán sometidos para obtener la mejor calidad en los productos <sup>(23)</sup>.

Para poder realizar una buena separación de polímeros, existen códigos de referencia útil para distinguir con facilidad de qué tipo de termoplástico se trata y qué tratamiento se debe dar <sup>(23)</sup>. Uno de éstos es el Sistema Internacional de Clasificación de Polímeros, mostrado en la Tabla 1.2 <sup>(33; 34)</sup>.

**Tabla 1.2 Sistema Internacional de Clasificación de Polímeros <sup>(34)</sup>**

Termoplásticos			Aplicaciones	Usos después del reciclado
Poliétileno tereftalato	PET		Botellas, envasado de productos alimenticios, moquetas, refuerzos neumáticos de coches.	Textiles para bolsas, lonas y velas náuticas, cuerdas, hilos
Poliétileno alta densidad	PEAD		Botellas para productos alimenticios, detergentes, contenedores, juguetes, bolsas, embalajes y film, laminas y tuberías.	Bolsas industriales, botellas detergentes, contenedores, tubos
Poliétileno de baja densidad	PEBD		Film adhesivo, Bolsas, revestimientos de cubos, recubrimiento contenedores flexibles, tuberías para riego.	Bolsas para residuos, e industriales, tubos, contenedores, film uso agrícola, vallado
Policloruro de vinilo	PVC		Marcos de ventanas, tuberías rígidas, revestimientos para suelos, botellas, cables aislantes, tarjetas de crédito, productos de uso sanitario.	Muebles de jardín, tuberías, vallas, contenedores
Polipropileno	PP		Envases para productos alimenticios, Cajas, tapones, piezas de automoviles, alfombras y componentes eléctricos.	Cajas multiples para transporte de envases, sillas, textiles
Poliestireno	PS		Botellas, vasos de yogures, recubrimientos	Aislamiento térmico, cubos de basura, accesorios oficina

La mayoría de los polímeros que son reciclados se utilizan para la fabricación de envases y embalajes, también podemos encontrarlos en la industria de la construcción o en elementos de manufactura, textiles o autopartes <sup>(23)</sup>.

Es de suma importancia encontrar maneras de reciclar y reutilizar productos poliméricos debido a: resistencia a la degradación, alta cantidad de aditivos químicos que contienen, al mantenerse estáticos pueden generar

contaminación y por su baja densidad tienen un costo elevado de recolección y transporte <sup>(35)</sup>.

En la actualidad, existe producción excesiva de productos poliméricos debido a la cultura que se tiene como sociedad, ya que todas las industrias utilizan estos materiales como una de las fuentes principales para sus componentes o ya sea la fabricación o empaquetado de sus productos <sup>(36)</sup>.

Los polímeros se obtienen a partir de extracción y procesamiento de diversos recursos naturales como el petróleo y el gas natural (considerados como recursos no renovables) pero se han desarrollado algunos polímeros bio-basados que contienen en su mayoría recursos renovables. Cabe mencionar que ambos tienen distintos impactos negativos sobre el medio ambiente <sup>(36)</sup>:

- Los polímeros convencionales tienen mayor impacto en el calentamiento global (debido a la cantidad de energía que necesitan en sus procesos) y dañan la capa de ozono (por la formación de smog fotoquímico<sup>2</sup>).
- Los polímeros bio-basados necesitan mayor uso de agua para su procesamiento y eutrofización<sup>3</sup>. Además, generan mayor liberación de sustancias tóxicas, deforestación (por el uso de materiales naturales) y disminuyen la capacidad del planeta para capturar CO<sub>2</sub>.

Con el fin de disminuir estos impactos negativos en nuestro planeta, uno de los principales esfuerzos que se han hecho es el reciclar PET en textiles sintéticos. El tratamiento es el siguiente <sup>(37)</sup>:

1. Todas las botellas recolectadas se agrupan en pacas que son transportadas al almacén. Son sometidas a procesos en los que se rompen, y se introducen en un contenedor para ser lavadas en seco, en donde se eliminará la suciedad superficial de los productos.
2. Posteriormente se realiza una separación por tipo de polímero y color para ser molidos, y así generar pequeñas hojuelas que entrarán a otro proceso de lavado para eliminar cualquier partícula de pegamento que pudiera seguir teniendo.
3. Después, son sometidas a un proceso de secado para eliminar por completo la humedad entre ellas. Una vez limpias y secas, las hojuelas son sometidas a un proceso de calidad en el que se elimina cualquier

---

<sup>2</sup> "El smog fotoquímico es una mezcla compleja de gases y partículas fabricadas por la luz del Sol a partir de las materias primas –óxidos de nitrógeno e hidrocarburo– que descargan a la atmósfera los automóviles" (Velasquez, Manuel G., 2008).

<sup>3</sup> "Incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton" (Real Academia Española, s.n.).

residuo de metales para ser fundidas y transformadas en pequeñas porciones de resina aglomerada.

4. Por medio de nitrógeno, se eliminan todas las partículas sobrantes en los bordes para pasar por un proceso de cristalización y policondensación para formar polímeros, y así hacer más resistente la resina.
5. Una vez finalizado todo este proceso se obtienen diminutas piezas de forma cilíndrica que el productor textil podrá fundir para obtener el hilo, haciendo las prendas totalmente de poliéster reciclado.

### 1.5.1 Ejemplos de reciclaje de polímeros

Además de eso, en la actualidad se han empleado diversos métodos de reciclaje y reutilización de polímeros como los siguientes:

1. Existen ladrillos desarrollados con PET reciclado que se moldean con una máquina rodante. Estos ladrillos son más ecológicos que los de tierra cocida, además de ser más livianos y tener aislamiento térmico. La idea principal de crear estos ladrillos (Figura 1.8) es poder construir viviendas para personas sin hogar o de bajos recursos <sup>(38; 39)</sup>.



**Figura 1.8 Ladrillos PET** <sup>(39)</sup>

2. La marca deportiva Adidas® ha desarrollado zapatos deportivos (Figura 1.9) mayormente hechos con desperdicios de redes de pescar desechadas en el mar <sup>(40; 41)</sup>.



**Figura 1.9** Tenis Adidas® hechos con polímero reciclado <sup>(41)</sup>

3. Se ha desarrollado un proceso de transformación de PET en pintura, a través de un proceso de fundido y despolimerizado, para que el polímero quede en estado líquido y pueda ser utilizado como pintura impermeabilizante <sup>(42)</sup>, como se puede ver en la Figura 1.10.



**Figura 1.10** Pintura impermeabilizante <sup>(42)</sup>

4. Una startup mexicana, Cronology, desarrolló un proceso para convertir el PET en hojas de “papel” y así disminuir y, en un futuro, erradicar el uso de árboles y agua para conseguir papel. Estas hojas de “papel” son

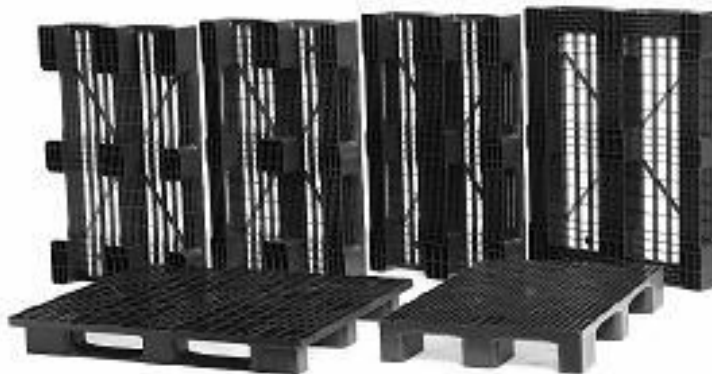
biodegradables y en la actualidad siguen en pruebas y en tratamientos para ser desarrolladas a nivel industrial <sup>(43)</sup>.

5. Las camisetas deportivas con PET desarrolladas por Nike®, mostradas en la Figura 1.11, se basan en técnicas de poliéster a partir de botellas de polímero recicladas y utilizan aproximadamente 18 botellas recicladas por cada camiseta <sup>(44; 45)</sup>.



**Figura 1.11 Playeras Nike® hechas con polímero reciclado <sup>(45)</sup>**

6. Nortpalet es un pallet reparable diseñado para distribuir productos de consumo masivo. Este producto, mostrado en la Figura 1.12, está fabricado a partir de polímeros reciclados o reutilizados. Para la industria de logística y distribución es más eficiente debido a su ligereza para manipulación y transporte, y también es un gran apoyo a la disminución de impacto al medio ambiente ya que se dejaría de utilizar madera como materia prima de estos componentes <sup>(46; 47)</sup>.



**Figura 1.12 Nortpalet Logistics Oporto 2017 <sup>(47)</sup>**

7. La empresa química BASF® desarrolló un nuevo termoplástico llamado “Sobermol” a partir de materias renovables y sin compuestos orgánicos volátiles, por lo que contribuye a la producción de revestimientos más sostenibles. Este termoplástico cuenta con una modificación química específica, por lo que el complejo poliéter-éster-poliol tiene excelentes propiedades hidrófugas <sup>(48)</sup>.
8. En la India se encuentra en desarrollo el proyecto “plastic roads”, en el que se busca hacer bloques de polímero recolectado de los océanos para armar pistas de carreteras (Figura 1.13). La idea de este proyecto es eficientar la reparación y construcción de las mismas por medio de la sustitución de concreto con polímeros. En la actualidad este proyecto es únicamente un planteamiento y sigue en desarrollo e investigación, pero ya existen varios países interesados en aplicarlo <sup>(49; 50)</sup>.



Figura 1.13 Carreteras en India hechas de polímero reciclado <sup>(50)</sup>

Tomando como referencia del artículo “Plastic Pollution in the World’s Oceans”, casi 270,000 toneladas de residuos poliméricos se encuentran en el océano. El polímero más utilizado en el mundo no es el PET, en realidad es el PEAD, utilizado principalmente para fabricar tuberías, envases de alimentos, envases de detergentes, empaques para partes automotrices, entre otras aplicaciones. En México, se emplean al año 300,000 toneladas más de PEAD que de PET <sup>(51)</sup>.

## 2 Metodología

### 2.1 Consumo de recipientes de PEAD

El hecho de que el PEAD es el polímero más consumido, pero no el más reciclado en el mundo, quiere decir que existe una gran cantidad de piezas hechas con este material que no se reciclan o reutilizan y terminan en la basura (rellenos sanitarios, depósitos al aire libre o en el mar). Solamente para ejemplificar el gran uso de este polímero en la vida diaria de las personas, se realizó la medición del consumo semanal de botellas de yogurt bebible (recipientes de 220 g) en cuatro diferentes familias (de clase media y de distinto tamaño) durante cuatro semanas.

Los resultados de las mediciones se observan en el capítulo de resultados, en donde se muestran los cálculos de media, desviación estándar, límite inferior y límite superior de los valores obtenidos.

Los límites inferiores y superiores de la media fueron calculados con la siguiente fórmula <sup>(52)</sup>:

$$L = \bar{x} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad [2.1]$$

en donde  $L$  es el límite inferior o superior de la media,  $\bar{x}$  es la media de los valores medidos,  $t$  es el valor obtenido de la tabla “t de Student” (tomando en cuenta un porcentaje de confiabilidad de 99% y una muestra de cuatro mediciones),  $\sigma$  es la desviación estándar de los valores medidos y  $n$  es el tamaño de la muestra.

Utilizando esta información, se calculó un aproximado de toneladas de botellas de yogurt que se consumen al año en México. Los resultados de estos cálculos son también presentados en el siguiente capítulo.

En el software SolidWorks®, programa especializado para diseño asistido por computadora, se dibujó una botella de yogurt bebible con medidas reales y PEAD como material, y se extrajo del dibujo la masa de la botella (Figura 2.1). De este modelo, se obtuvo que la masa de la botella de yogurt bebible es 92.5 g.

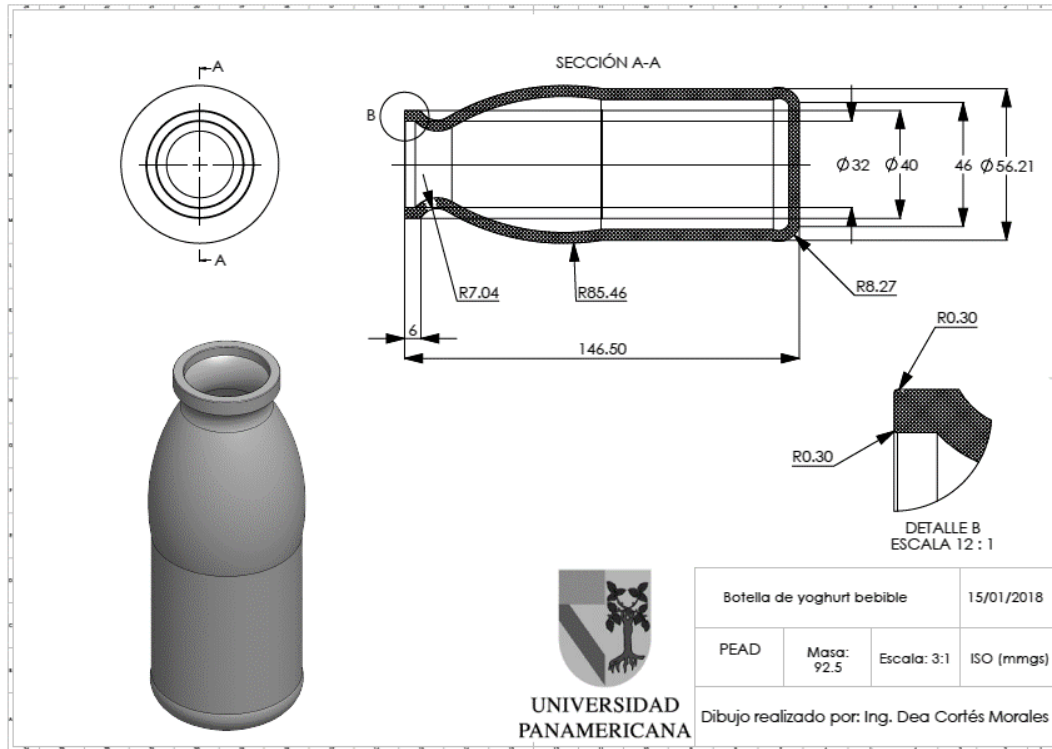


Figura 2.1 Dibujo en SolidWorks® de botella de yogurt bebible

## 2.2 Diseño de experimentos

Para poner a prueba la hipótesis planteada durante esta investigación, se realizará el siguiente experimento, utilizando Diseño de Experimentos o DOE (*Design of Experiments*). Dicha técnica se define como:

*“Conjunto de técnicas activas que manipulan un proceso para inducirlo a proporcionar la información que se requiere para mejorarlo durante los cambios en sus variables y su interacción o secuencia de ejecución, utilizando la menor cantidad de experimentos posibles”* (SPC Consulting Group. Diseño de Experimentos DOE. Monterrey, México, 10 de enero de 2013).

El DOE requiere la definición de factores y variables para cada experimento. Los factores son variables que impactan el resultado del experimento, mientras que los niveles representan diferentes configuraciones que pueden tener los factores <sup>(31)</sup>.

Para la extrusión de polímeros las siguientes variables afectan al proceso: la temperatura del material, la fuerza y velocidad con la que se presiona el émbolo, tipo de materia prima a utilizar y velocidad de enfriamiento.

Para comprender el efecto del tipo de materia prima se seleccionaron productos de la vida cotidiana fabricados con polietileno de alta densidad que tuvieran pigmentos o sin ellos. Para facilitar y homogenizar el proceso se seleccionaron botellas pigmentadas de un único tipo de producto, en este caso suavizante de telas (por su disponibilidad y volumen), y de botellas de yogurt bebible (utilizadas en la sección anterior).

Por otra parte, para analizar la velocidad de enfriamiento se decidió seleccionar 2 tipos de fluidos para obtener velocidad baja y alta de enfriamiento, esto es enfriamiento en aire y en agua.

Las características de la máquina actual no permiten cambios en la magnitud de la fuerza con la que se presiona el émbolo ni en la velocidad de la extrusión, por lo que los factores seleccionados son temperatura de la materia prima, el tipo de materia prima y la velocidad de enfriamiento. Los factores seleccionados se refieren a lo siguiente:

- Temperatura: Se utilizarán dos temperaturas diferentes en el proceso de extrusión de los filamentos, 105°C y 130°C. Dichas temperaturas representan las temperaturas mínima y máxima de fusión de dicho polímero <sup>(53)</sup>.

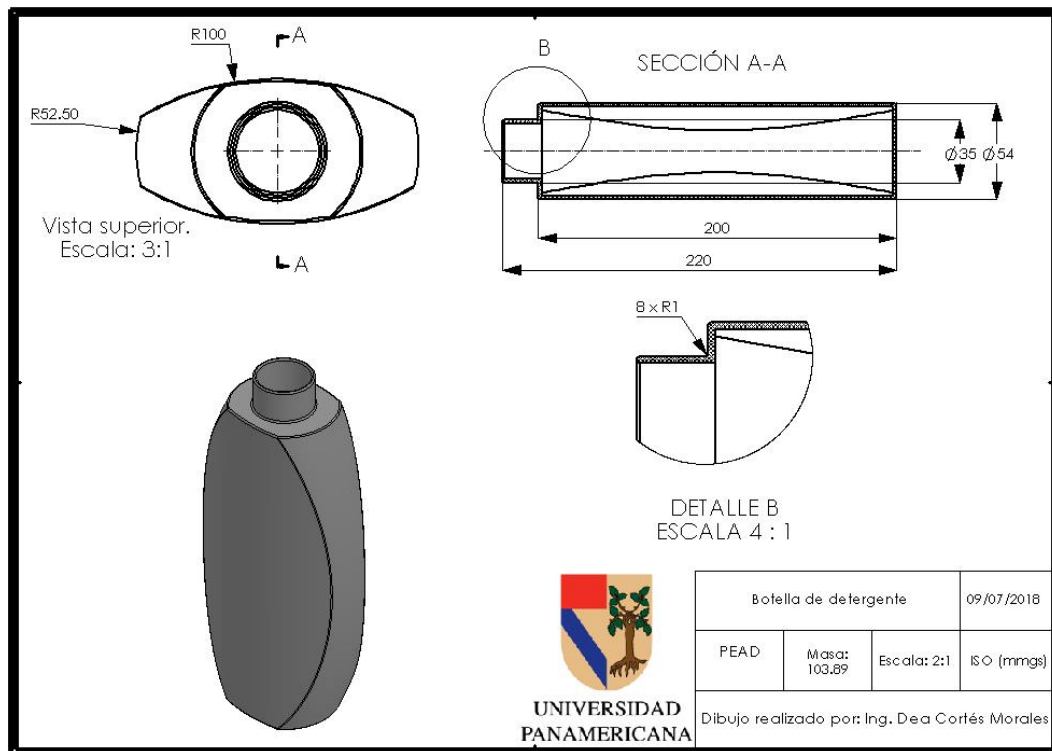


Figura 2.2 Dibujo en SolidWorks® de botella de suavizante

- Velocidad de enfriamiento (fluido): una vez extruido el hilo de PEAD, éste podrá enfriarse y solidificarse directamente al aire, o dentro de un recipiente con agua a una temperatura ambiente. Al introducir el polímero recién inyectado a alta temperatura, dentro de un recipiente con agua a temperatura ambiente, provocaría un choque térmico que podría afectar las propiedades del material, cosa que no sucedería si el polímero caliente se solidifica al aire <sup>(54)</sup>.
- Pigmento: se utilizará PEAD pigmentado en azul (proveniente de envases de suavizante de telas, Figura 2.2), o totalmente blanco (proveniente de envases de yogurt bebibles).

En la Tabla 2.1 se muestran los factores y niveles seleccionados. Al contar con tres factores y dos niveles por factor, el diseño del experimento presenta un número total de sub experimentos de  $2^3 = 8$ , según se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.1 Factores y niveles del diseño de experimentos**

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>
Temperatura	105°C
	130°C
Pigmento	Azul
	Blanco
Fluido de enfriamiento	Aire
	Agua

**Tabla 2.2 Combinaciones posibles del experimento diseñado**

<b>Combinación</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Enfriamiento</b>	<b>Pigmento</b>
1	105°C	Agua	Azul
2	105°C	Agua	Blanco
3	105°C	Aire	Azul
4	105°C	Aire	Blanco
5	130°C	Agua	Azul
6	130°C	Agua	Blanco
7	130°C	Aire	Azul
8	130°C	Aire	Blanco

### 2.3 Manufactura de filamentos y medición de propiedades mecánicas

Además, con el fin de medir la variabilidad del proceso, se realizarán tres ensayos de cada una de las combinaciones, es decir, se fabricarán tres hilos de cada tipo, obteniendo un total de 24 hilos de PEAD.

El objetivo del experimento es medir ciertas propiedades mecánicas de los filamentos. La combinación de los niveles de los factores cuyos hilos presenten las propiedades más cercanas a las propiedades que presentan los hilos de PET, será la que funcionará mejor para sustituirlo en aplicaciones ya existentes. Cabe mencionar que también se fabricarán, con ayuda de la máquina de extrusión, hilos de PET, y se les medirán las mismas propiedades, esto para tener una referencia con la cual comparar las propiedades obtenidas para el PEAD.

Las propiedades que se medirán a cada hilo de PEAD fabricado serán las mostradas en la Tabla 2.3. Éstas se medirán en los laboratorios de ingeniería de la Universidad Panamericana.

Tabla 2.3 Propiedades a medir en los filamentos

Propiedad	Símbolo	Unidad
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max}$	MPa
Porcentaje de elongación	$\%el$	%
Módulo de Young	$E$	MPa
Esfuerzo de cedencia	$\sigma_y$	MPa
Deformación de cedencia	$D$	%
Esfuerzo último	$\sigma_{\acute{u}lt}$	MPa

Para llevar a cabo la manufactura de los filamentos, se realizaron las siguientes acciones:

1. **Recolección de PEAD pigmentado, PEAD blanco, y PET:** en el caso del PEAD blanco, se recolectaron alrededor de 20 botellas de yogurt bebible cuyo peso es de aproximadamente 90 g. Para el PEAD pigmentado, se utilizó una botella azul de suavizante de telas con peso aproximado de 150 g. Por otro lado, para el PET se utilizó una botella de agua de un litro con peso aproximado de 90 g.
2. **Limpieza de botellas:** al recolectar el polímero de botellas recicladas, el tratamiento de limpieza se realizó con agua, jabón y gel antibacterial para reducir el contenido de bacterias que posiblemente pudieran estar en las superficies de las botellas utilizadas.

3. **Corte de botellas de polímero:** para hacer posible la extrusión, fue necesario realizar el corte manual de las botellas, utilizando tijeras y cutter. El corte del plástico se realizó en forma de hojuelas de aproximadamente  $6 \text{ mm}^3$  para ser introducidas en la máquina de extrusión.
4. **Extrusión de hilos:** se utilizó la máquina de inyección de polímeros ubicada en el laboratorio de manufactura de la Universidad Panamericana. Esta máquina se observa en la Figura 2.3.

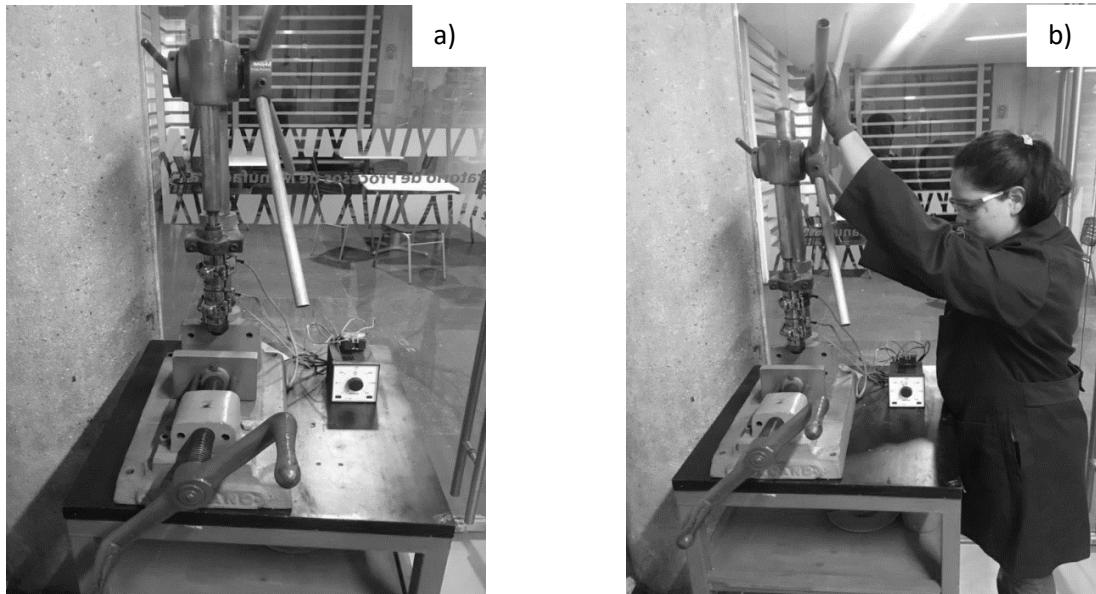


Figura 2.3 a) Máquina de inyección de la Universidad Panamericana y b) máquina de inyección en uso para fabricación de filamentos

Se comenzó con la extrusión de aproximadamente diez hilos (de los cuales se elegirán los mejores tres para hacer mediciones de propiedades) de PET transparente a una temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$ .

Posteriormente, se procedió a realizar la extrusión de hilos de PEAD blanco y azul a  $105^{\circ}\text{C}$  y  $130^{\circ}\text{C}$  con enfriamiento al aire y con agua, y se seleccionaron los mejores tres hilos de cada combinación hasta obtener los mejores 24 hilos. Cabe mencionar que existieron variaciones pequeñas en el diámetro de los hilos, ya que, a pesar de haber utilizado un cabezal, el proceso de extracción y tratamiento fue totalmente manual, propenso a variaciones humanas. Sin embargo, las variaciones fueron pequeñas y en general el promedio de diámetro de los hilos es de aproximadamente 2 mm (Figura 2.4).



Figura 2.4 Filamento polimérico previo al ensayo de tracción

5. **Medición de propiedades de los hilos:** una vez obtenidos los 24 hilos de PEAD y los 3 hilos de PET, se realizaron las pruebas mecánicas mencionadas anteriormente. Se utilizó la máquina Instron® ubicada en el laboratorio de Materiales de la Universidad Panamericana (Figura 2.5). El equipo de marca Instron® permite la medición, tanto a tensión como a compresión y flexión de las propiedades mecánicas de los materiales <sup>(55)</sup>.

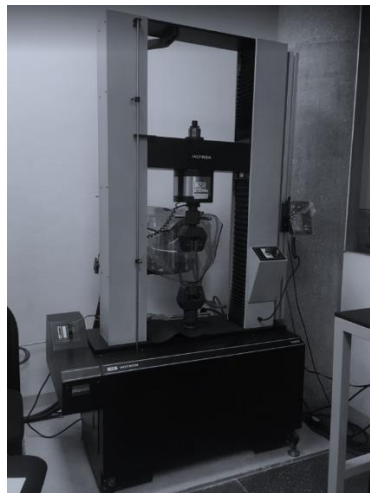


Figura 2.5 Máquina Instron® de la Universidad Panamericana

Para medir las propiedades mencionadas anteriormente, se realizaron las pruebas siguiendo el estándar “ASTM D638 – *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*” (dada por la *American Society of Testing Materials*) para polímeros. Dicha norma es específica para

medir propiedades de tensión de polímeros. La prueba marca que se debe estirar el filamento a una velocidad de 10 mm/min<sup>(56)</sup>, por un tiempo de 0.5 a 5 minutos, o hasta que el filamento se rompa.

Por otro lado, la Figura 2.6 muestra los filamentos durante los ensayos de tracción, en donde se puede notar la estricción que se forma en la zona central del filamento.

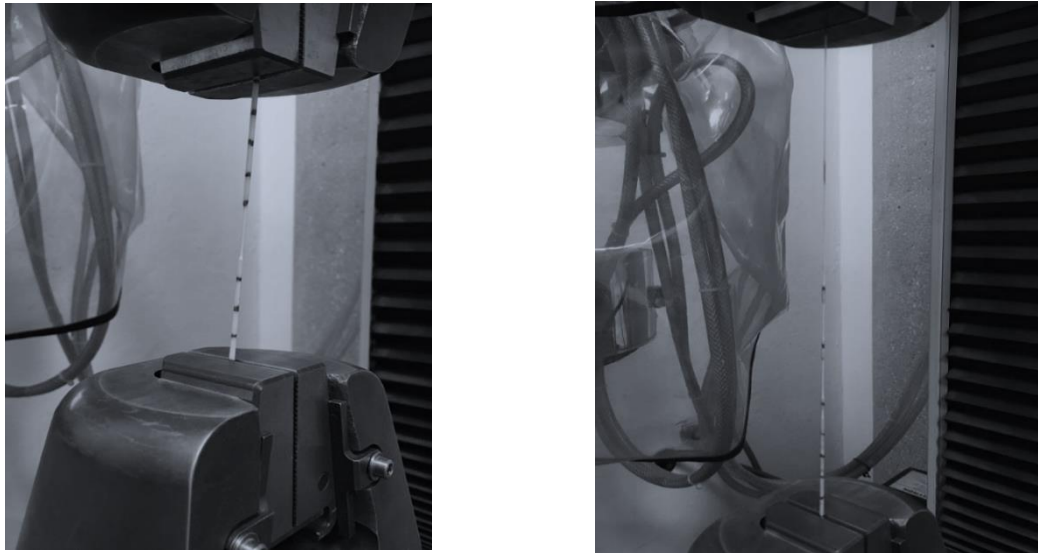


Figura 2.6 Filamentos poliméricos durante el ensayo de tracción

	A	B	C	D	E	F
1	Time (s)	Extension (mm)	Load (N)	Área (m2)	Esfuerzo (MPa)	Deformación
2	0	-0.00003	-1.18798	2.27E-06	-0.523385161	0
3	0.5	0.0824	-1.99078	2.27E-06	-0.877072602	0.001373333
4	1	0.16691	-1.25737	2.27E-06	-0.553956127	0.002781833
5	1.5	0.25032	-1.65515	2.27E-06	-0.729204994	0.004172
6	2	0.33365	0.04843	2.27E-06	0.021336675	0.005560833
7	2.5	0.41701	0.4141	2.27E-06	0.182438926	0.006950167

Figura 2.7 Cálculo de área, esfuerzo y deformación para los mismos siete resultados

Al terminar cada uno de los ensayos, la computadora genera un registro con los valores de las variables seleccionadas y crea un archivo \*.csv (*comma-separated values*). Este archivo se debe convertir a la extensión adecuada de software de hoja de cálculo (por ejemplo, Excel, \*.xlsx). Las variables seleccionadas para estos ensayos fueron carga

(N), extensión (mm) y tiempo (s), como se puede ver en la Figura 2.7, aunque el tiempo no se utilizó para los cálculos.

Posterior a esto, se procedió a realizar los cálculos de Área transversal ( $A$ ) de los filamentos ( $m^2$ ), Esfuerzo ( $\sigma$ , MPa) y Deformación ( $\varepsilon$ ) para cada muestra. Dichos valores fueron calculados utilizando las siguientes fórmulas <sup>(16)</sup>:

$$A = \frac{\pi\phi^2}{4} \quad [2.2]$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [2.3]$$

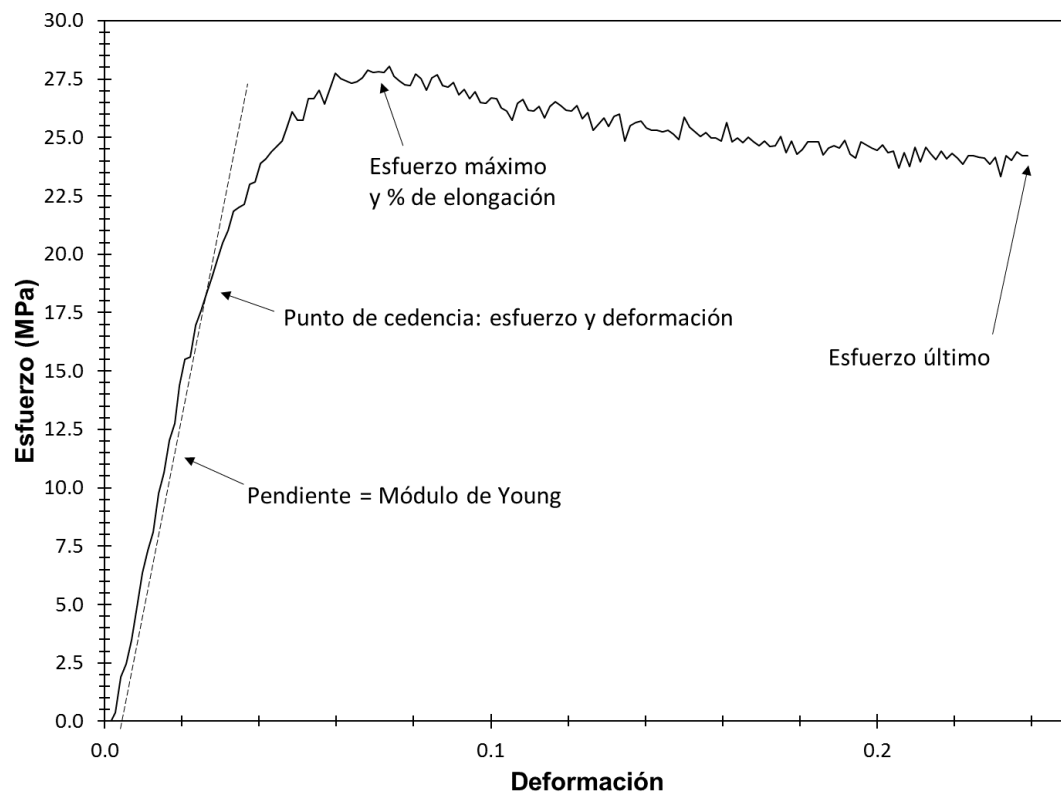
$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad [2.4]$$

donde  $\phi$  es el diámetro de los filamentos,  $F$  es la carga medida por la celda de carga,  $A$  es el área del filamento (ecuación [2.1]),  $\delta$  es la extensión medida por el bastidor de la máquina y  $l_0$  es la longitud inicial de los filamentos (por convención se consideró igual a 60 mm).

Una vez obtenidos los valores de esfuerzo y deformación para cada uno de todos los puntos obtenidos del ensayo se obtiene una gráfica como la mostrada en la Figura 2.8. Sobre esta gráfica se obtienen los valores de Módulo de Young, esfuerzo de cedencia y elongación en este punto y esfuerzo máximo como se indica en la norma ASTM D638 <sup>(56)</sup>. La elongación antes de la fractura no se consideró como valor a reportar ya que el polietileno forma estricciones en la zona de prueba después de superar el esfuerzo máximo que eliminarían el futuro uso de ese filamento.

Se fabricaron varios hilos en las mismas condiciones indicadas en la Tabla 2.2 y se ensayaron en “corridas” para evaluar la repetibilidad tanto del proceso como las propiedades de los hilos de PEAD reciclado.

En el siguiente capítulo se muestran las gráficas y tablas obtenidas de varias corridas de ensayos a tracción de los hilos obtenidos bajo las 8 condiciones definidas por el DOE.



**Figura 2.8** Obtención de propiedades mecánicas sobre las gráficas esfuerzo-deformación

### 3 Resultados obtenidos

#### 3.1 Consumo promedio de PEAD en la vida diaria de las personas

La Tabla 3.1 muestra los resultados del experimento realizado sobre las botellas de yogurt consumidas de manera semanal para cuatro familias mexicanas diferentes de clase media. Todos los valores mostrados en la tabla son número de botellas de yogurt.

**Tabla 3.1 Consumo semanal de botellas de yogurt bebible para cuatro diferentes familias**

Familia	Inte grantes	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4	Media	Cons. Pers.	Desv. Est.	Lím. Inf.	Lím. Sup.
1	6	22	19	20	22	20.7	3.4	1.5	16.4	24.7
2	5	14	16	13	12	13.7	2.7	1.7	8.8	18.2
3	4	10	11	12	9	10.5	2.6	1.3	6.7	13.9
4	3	5	4	7	5	5.2	1.7	1.3	1.6	8.5
Media	4.5	12.7	12.5	13.0	12.0	12.5	2.6	1.4	8.4	16.3
Cons. Pers.		2.8	2.7	2.9	2.6	2.8				

Los límites se calcularon de la siguiente manera, utilizando la fórmula [2.1] y como ejemplo una familia de seis integrantes:

$$L = 20.75 \pm 5.841 \frac{1.50}{\sqrt{4}} = 20.75 \pm 4.38 \text{ botellas de yogurt}$$

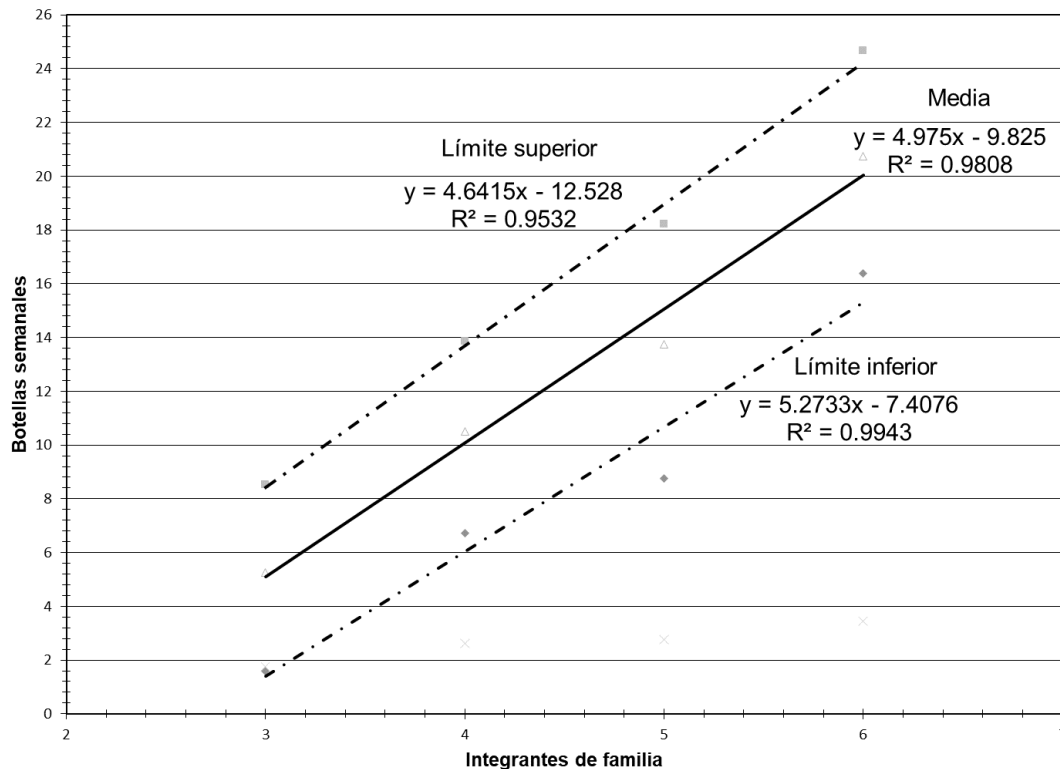
[3.1]

Por lo tanto, se concluye que una familia de seis integrantes consume en promedio 20.75 botellas de yogurt bebible a la semana, con un límite inferior de 16.37 y un límite superior de 25.13 botellas. Esto equivale a un promedio de 3.46 botellas semanales por persona.

Si cada botella tiene una masa de 92.5 g, como se indicó en el Capítulo 2, esto significa que esta familia de seis integrantes genera  $1919.375 \pm 405.15$  g semanales de basura de PEAD sólo por el consumo de este producto.

Por otra parte, si sabemos que los hilos producidos por el método realizado en esta tesis tienen un diámetro de 2 mm y la densidad promedio del PEAD es  $\sim 0.957 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ , entonces se podrían obtener  $638.41 \pm 134.76$  m de filamentos para ser utilizados en otros productos.

La Figura 3.1 muestra una gráfica de los resultados obtenidos, en donde se muestran los valores calculados de límite inferior y límite superior para cada familia. Se ha colocado una línea de tendencia de grado uno, y una ecuación representativa de dicha línea. Además, también se muestra el valor  $R^2$ , el cual se refiere a la correlación entre valores. Una correlación perfecta entre valores es igual a uno, por lo que se puede concluir que las correlaciones obtenidas, 0.9532 para el límite inferior y 0.9943 para el límite superior son precisas.



**Figura 3.1 Consumo semanal de botellas de yogurt bebible para cuatro diferentes familias**

Las ecuaciones mostradas en la Figura 3.1 pueden ser útiles para determinar los límites inferiores y superiores de la media de botellas de yogurt para una familia de clase media con cualquier número de integrantes. Bastaría con sustituir este número en la variable  $x$  de las ecuaciones para obtener dichos valores.

Por otro lado, como es posible observar, las pendientes de las líneas de tendencia son positivas, lo que quiere decir que, por obvias razones, mientras mayor sea el número de integrantes de familia, mayor será el número de botellas de yogurt semanales que se consumen en ella.

Calculando entonces las toneladas de botellas de yogurt por año que se consumen en México, se tomará en cuenta que la masa de una sola botella de yogurt es de 92.5 g, y se extrapolará esta masa a un 20% de las familias totales de clase media presentes en México (Tabla 3.2). Se tomará como referencia la investigación del INEGI (2011) en donde afirma que la familia promedio mexicana tiene cuatro integrantes, y se supondrá un año con 52 semanas (57).

Por lo tanto, se estima de la Tabla 3.2 que, suponiendo que el consumo de botellas de yogurt por familia es de 10.5 botellas semanales, las toneladas generadas anualmente de estos desechos superan el millón y medio de toneladas. Además, estos números no representan la masa total de PEAD consumida en México, ya que sólo se tomaron en cuenta botellas de yogurt bebible. Si se agregan el resto de productos realizados con este polímero, la cantidad aumentaría considerablemente, lo que hace pensar que es necesario incrementar el porcentaje reciclado de este polímero.

**Tabla 3.2 Toneladas de botellas de yogurt generadas en México**

<b>Botellas semanales promedio por familia</b>	10.5±2%
<b>Botellas anuales promedio por familia</b>	546±2%
<b>Familias de clase media en México</b>	31,400,000
<b>Botellas anuales promedio en México*</b>	3,428,880,000±2%
<b>Masa botella (kg)</b>	0.0905
<b>Masa botellas México (kg)</b>	310,313,640±2%
<b>Masa botellas México (ton)</b>	310,313±2%

\*considerando que ~20% de las familias de clase media consumen botellas de yogurt líquido

Además, si se realiza el mismo cálculo para obtener la longitud de filamento equivalente a esta cantidad de kilogramos de PEAD por las botellas de yogurt, ésta equivaldría a 206,428,211.97 m o 206,428.21 km. Considerando que el tamaño de la tierra es de 6,371 km, podemos determinar que los kilómetros de filamentos obtenidos en un año servirían para dar aproximadamente 32,401 vueltas a la Tierra.

Esto sólo es un pequeño ejemplo del gran consumo de polímeros en el país, en una muestra muy pequeña de familias de clase media que consumen yogurt líquido. El objetivo de este ejercicio es mostrar lo que se podría ganar reciclando otros polímeros diferentes al PET en cuanto a generación de basura para evitar su acumulación en rellenos sanitarios o en los océanos y que promoviendo el mayor reciclaje de PET no es suficiente.

## 3.2 Mediciones de las propiedades de los filamentos bajo distintas condiciones de manufactura

### 3.2.1 PET

Hablando ahora del experimento principal de esta investigación, las propiedades de los hilos de fabricados de PET y PEAD, la Figura 3.2 muestra un filamento después de haber sido ensayado a tracción, y se observa la reducción del diámetro en la zona central del filamento.



Figura 3.2 Filamento después de ser ensayado a tracción

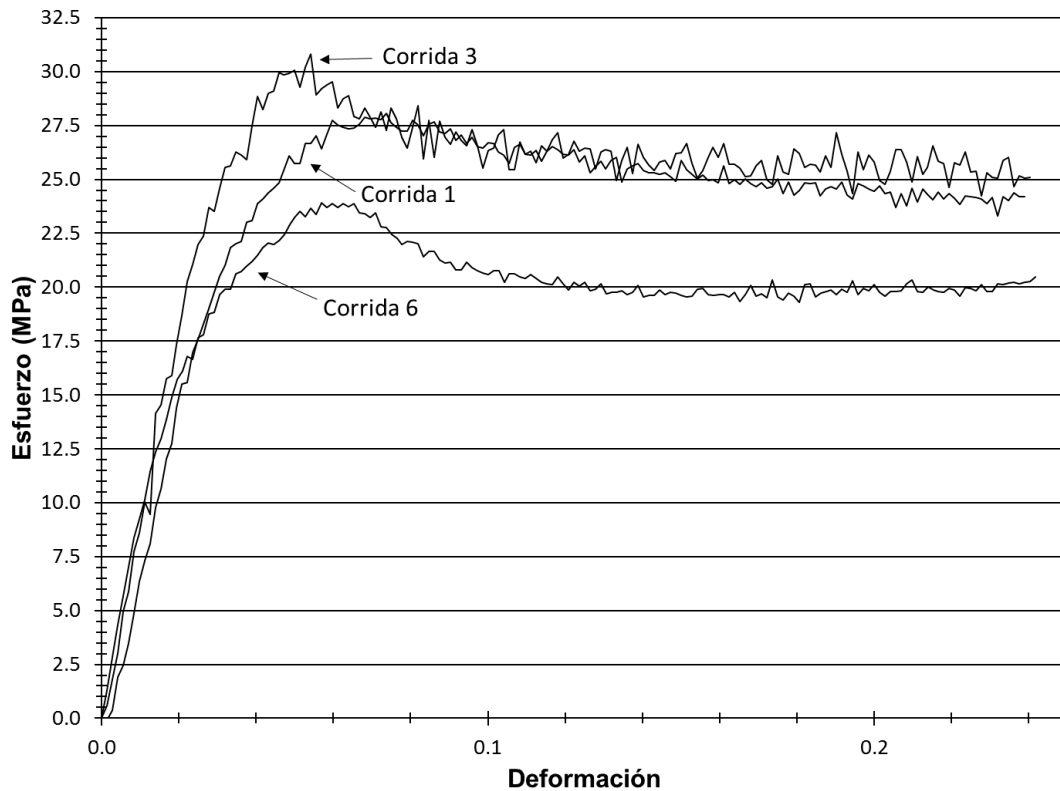


Figura 3.3 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PET

La Figura 3.3 y la Tabla 3.3 muestran los resultados de esfuerzo y deformación de los filamentos de PET. Se comenzó con el PET, para tener los valores referencia con los cuales comparar los resultados de los filamentos de PEAD, y poder determinar cuál de estos últimos se asemeja más a los resultados de los filamentos de PET.

**Tabla 3.3 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PET**

<b>Características</b>	<b>Corrida 1</b>	<b>Corrida 3</b>	<b>Corrida 6</b>
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	28.05	30.81	23.92
<b>% Elongación</b>	56.81%	113.89%	17.09%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	796.09	567.10	816.97
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	17.58	30.81	13.85
<b>Deformación de cedencia</b>	2.50%	5.42%	1.67%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	22.60	26.06	19.69

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, para cada una de las condiciones se realizó más de una corrida, esto debido al procedimiento manual de la fabricación de los filamentos y al no ser un proceso industrial existen diversas variables en los resultados obtenidos de cada corrida. Derivado de esta variabilidad, se realizó un promedio de las corridas con el comportamiento más similar en los resultados. Las gráficas y tablas muestran sólo algunas de las corridas.

Las Figura 3.4 a 3.11 y las Tabla 3.4 a 3.11 muestran los resultados medidos para todas las combinaciones de PEAD indicadas en la Tabla 2.2.

3.2.2 Combinación 1: PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en agua

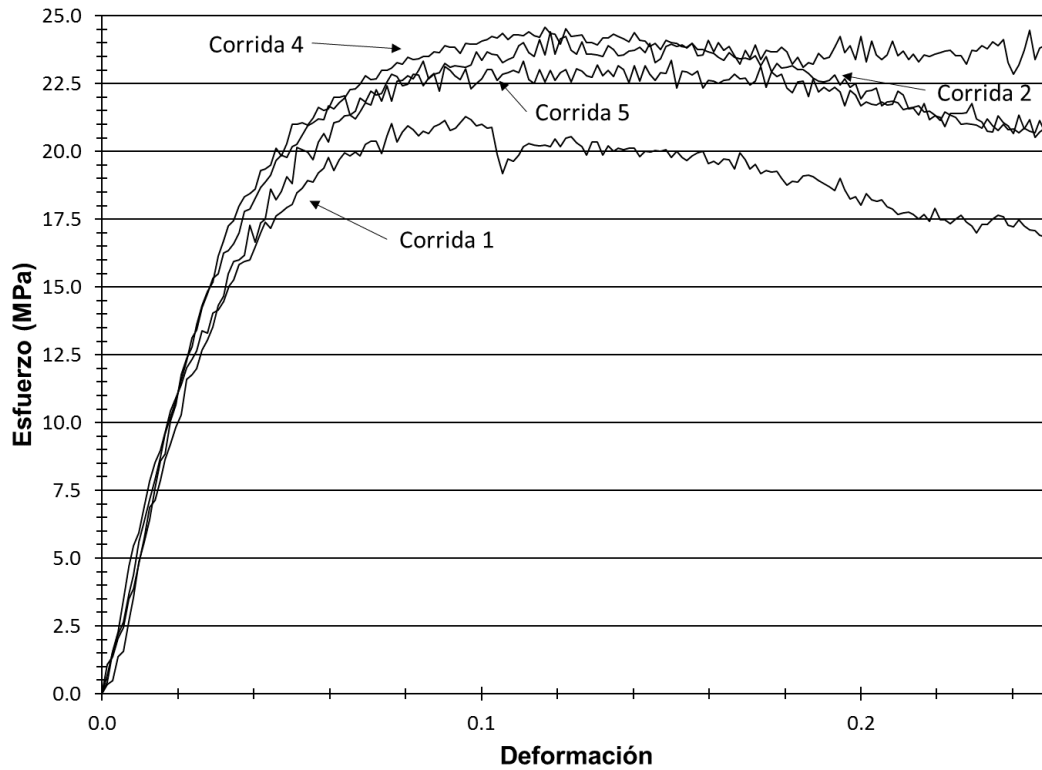


Figura 3.4 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 1)

Tabla 3.4 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 1)

Características	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 4	Corrida 5
Esfuerzo máximo [MPa]	21.29	24.57	24.46	23.36
% Elongación	24.58%	25.14%	64.56%	26.39%
Módulo de Young [MPa]	531.95	549.98	466.20	591.27
Esfuerzo de cedencia [MPa]	12.33	14.75	14.66	14.82
Deformación de cedencia	2.36%	2.78%	3.19%	2.78%
Esfuerzo último [MPa]	17.07	20.74	21.83	20.24

### 3.2.3 Combinación 2: PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua

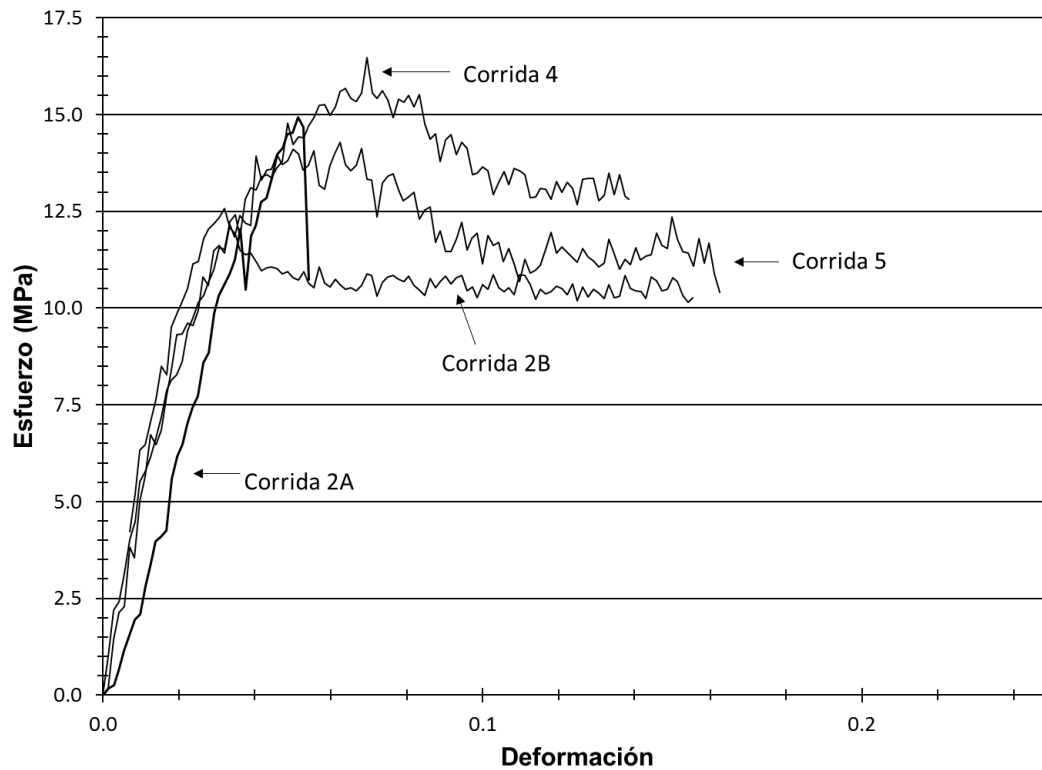


Figura 3.5 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 2)

Tabla 3.5 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 2)

Características	Corrida 2A*	Corrida 2B	Corrida 4	Corrida 5
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	14.93	12.58	16.47	14.29
<b>% Elongación</b>	5.28%	4.03%	13.85%	10.97%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	356.49	548.84	448.74	452.67
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	12.04	8.50	6.65	9.62
<b>Deformación de cedencia</b>	3.61%	1.53%	1.39%	2.22%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	14.68	11.20	12.82	10.68

\*El filamento de la corrida 2A se deslizó de las mordazas por lo que los valores no son representativos a esa combinación.

3.2.4 Combinación 3: PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en aire

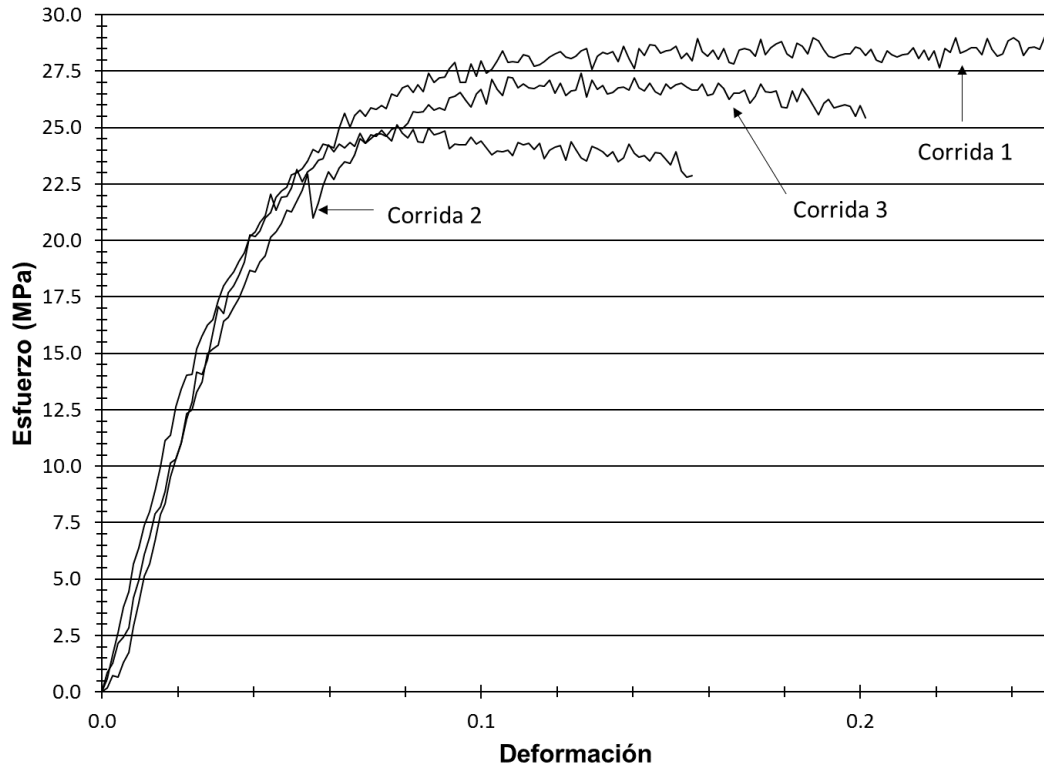


Figura 3.6 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 3)

Tabla 3.6 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 3)

Características	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	29.62	25.14	27.40
<b>% Elongación</b>	121.94%	15.42%	27.22%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	604.10	629.20	421.69
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	17.69	14.05	22.93
<b>Deformación de cedencia</b>	3.33%	2.36%	5.42%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	24.67	22.82	24.67

3.2.5 Combinación 4: PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire

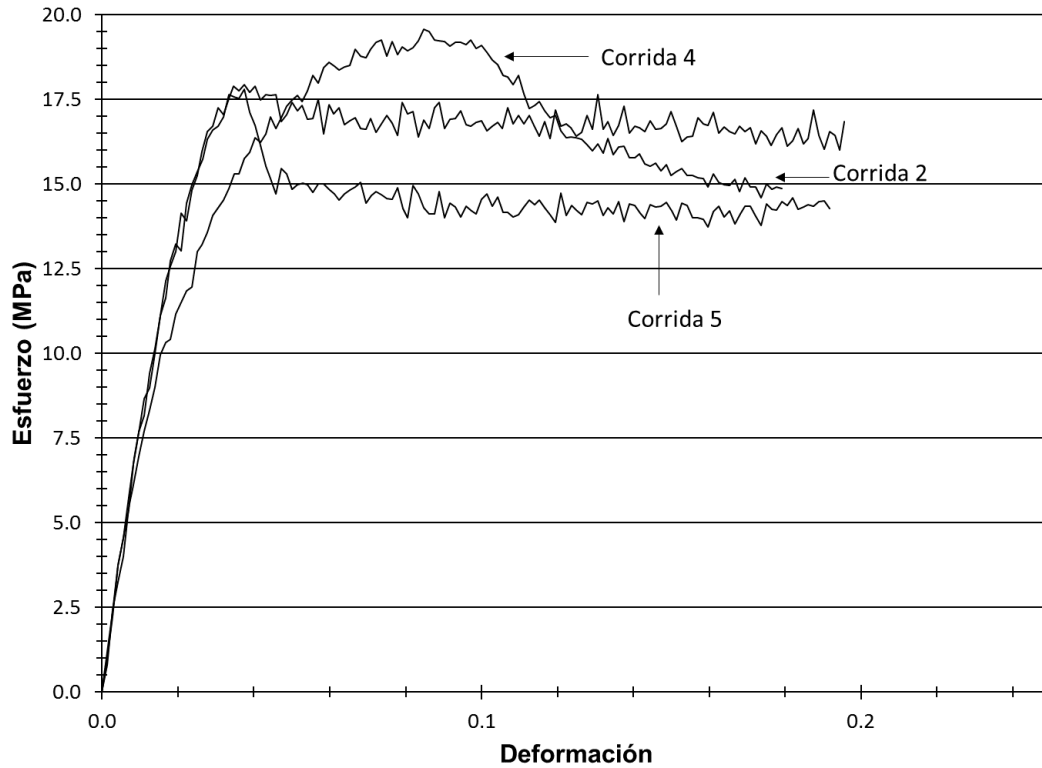


Figura 3.7 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 4)

Tabla 3.7 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 105°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 4)

Características	Corrida 2	Corrida 4	Corrida 5
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	17.94	19.58	17.81
<b>% Elongación</b>	19.56%	15.97%	11.95%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	658.48	577.81	660.46
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	14.14	10.41	13.24
<b>Deformación de cedencia</b>	2.08%	1.81%	1.95%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	16.84	14.91	13.86

3.2.6 Combinación 5: PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en agua

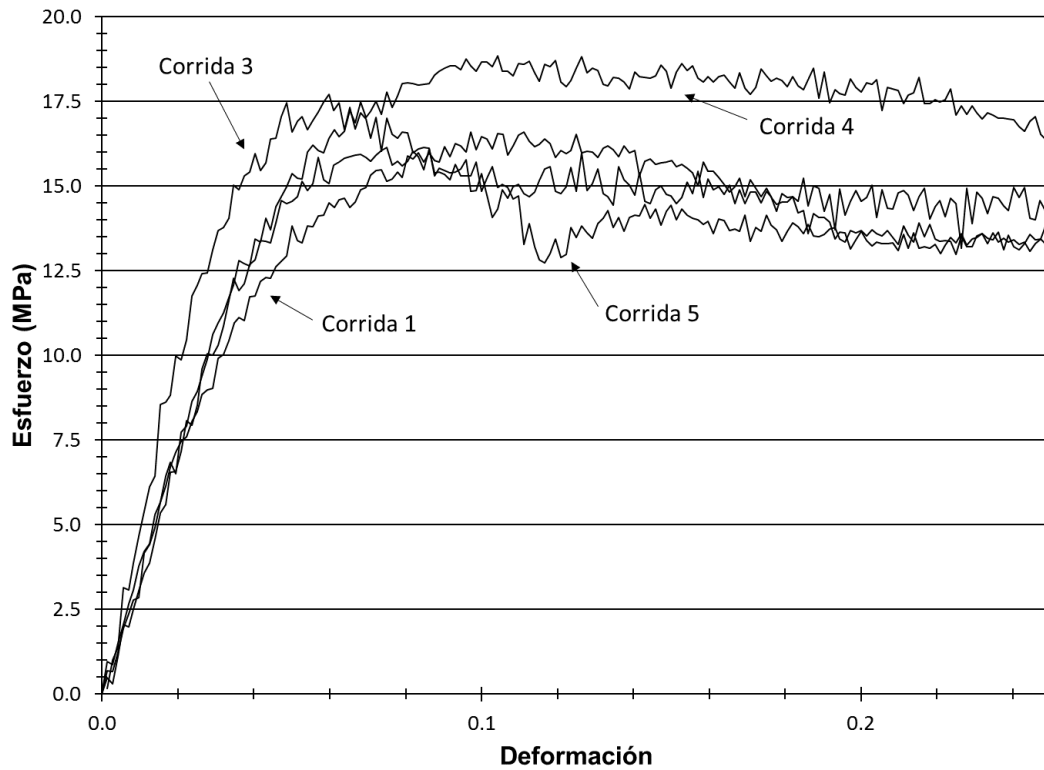
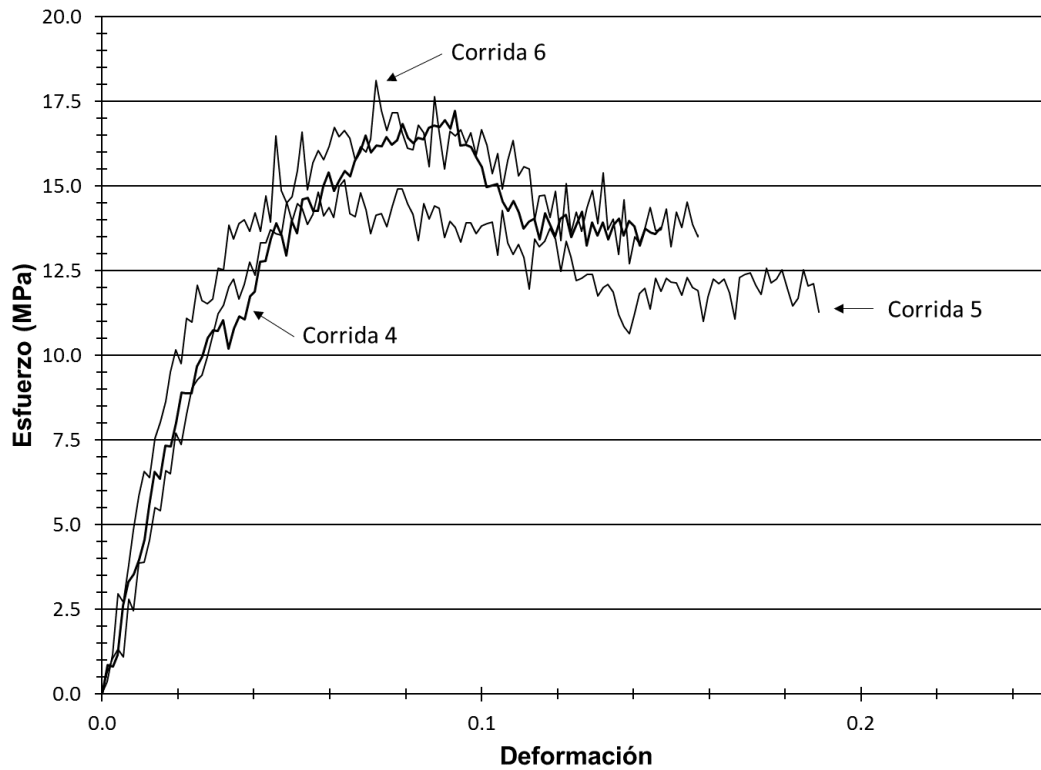


Figura 3.8 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 5)

Tabla 3.8 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en agua (combinación 5)

Características	Corrida 1	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	16.59	17.72	18.84	16.15
<b>% Elongación</b>	20.83%	10.28%	29.44%	11.53%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	324.03	486.94	348.39	351.20
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	8.85	12.45	12.63	12.28
<b>Deformación de cedencia</b>	2.64%	2.78%	3.89%	3.47%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	13.33	14.08	15.66	12.82

### 3.2.7 Combinación 6: PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua



**Figura 3.9** Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 6)

**Tabla 3.9** Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en agua (combinación 6)

<b>Características</b>	<b>Corrida 4</b>	<b>Corrida 5</b>	<b>Corrida 6</b>
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	17.23	15.18	18.12
<b>% Elongación</b>	11.53%	13.75%	13.89%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	355.44	365.07	494.88
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	11.05	12.26	11.10
<b>Deformación de cedencia</b>	3.19%	3.47%	2.22%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	13.43	10.84	12.72

3.2.8 Combinación 7: PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en aire

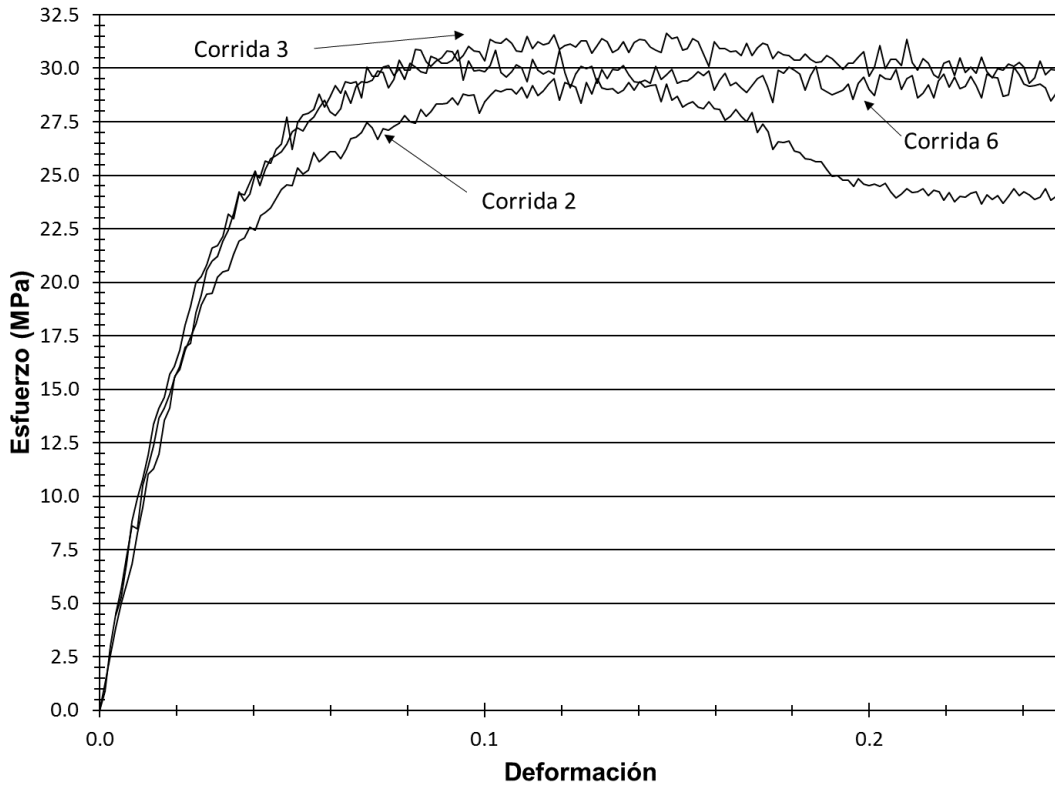


Figura 3.10 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 7)

Tabla 3.10 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento azul y enfriamiento en aire (combinación 7)

Características	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 6
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	29.52	31.65	30.85
<b>% Elongación</b>	19.86%	35.14%	46.39%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	841.59	849.73	706.41
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	14.10	16.05	21.01
<b>Deformación de cedencia</b>	1.67%	1.94%	2.92%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	24.58	26.90	26.66

### 3.2.9 Combinación 8: PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire

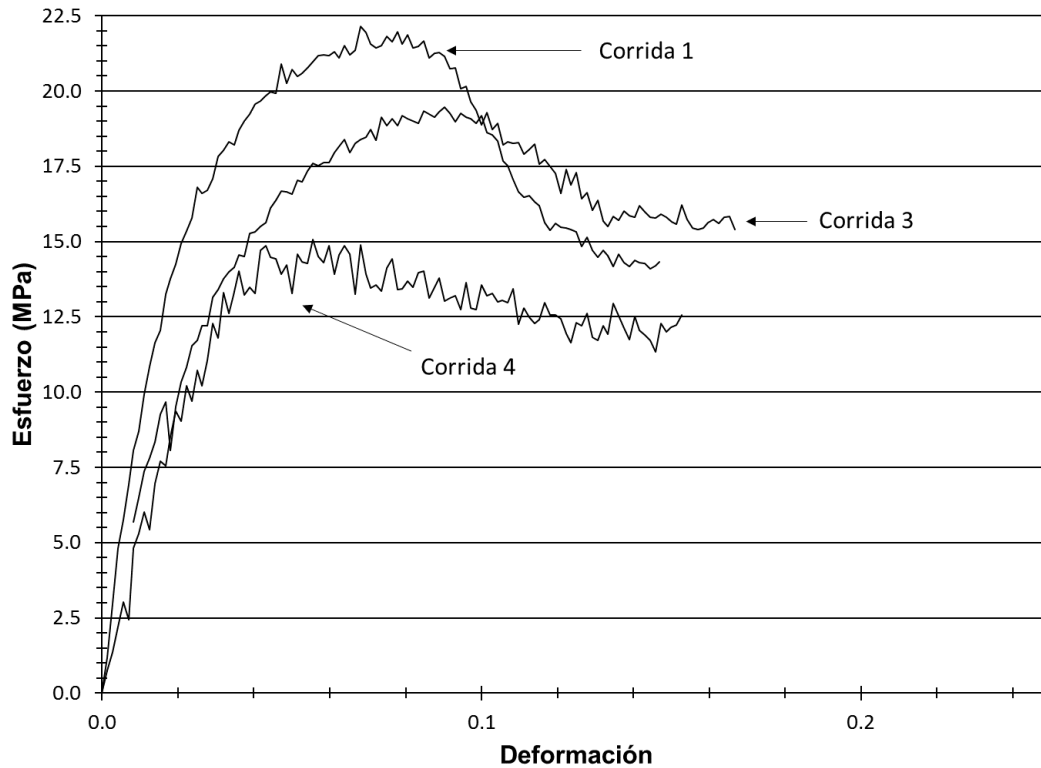


Figura 3.11 Curvas esfuerzo-deformación de corridas seleccionadas para PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 8)

Tabla 3.11 Resultados de corridas seleccionadas de filamentos de PEAD a 130°C con pigmento blanco y enfriamiento en aire (combinación 8)

Características	Corrida 1	Corrida 3	Corrida 4
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	22.14	19.47	15.05
<b>% Elongación</b>	17.08%	13.47%	12.36%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	748.37	576.26	449.32
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	13.24	9.68	10.22
<b>Deformación de cedencia</b>	1.67%	1.67%	2.22%
<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	15.44	14.17	11.65

Una vez obtenidos los resultados de todas las corridas, se realizó un promedio de todos los cálculos para obtener la desviación estándar de los mismos. Todos estos resultados pueden observarse en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Promedio de resultados de ensayos mecánicos de las ocho combinaciones de PEAD y de PET

Composición	Características	Promedio	Desv. Est.
PET	Esfuerzo máximo [MPa]	20.28	7.29
	% Elongación	44.70%	37.97%
	Módulo de Young [MPa]	592.11	151.73
	Esfuerzo de cedencia [MPa]	15.21	7.07
	Deformación de cedencia	2.76%	1.37%
	Esfuerzo último [MPa]	16.08	6.78
PEAD 105 AGUA AZUL (comb. 1)	Esfuerzo máximo [MPa]	21.95	3.18
	% Elongación	44.37%	23.86%
	Módulo de Young [MPa]	525.27	44.65
	Esfuerzo de cedencia [MPa]	13.09	2.30
	Deformación de cedencia	2.58%	0.47%
	Esfuerzo último [MPa]	18.13	4.01
PEAD 105 AGUA BLANCO (comb. 2)	Esfuerzo máximo [MPa]	16.56	5.57
	% Elongación	19.56%	19.81%
	Módulo de Young [MPa]	468.25	80.66
	Esfuerzo de cedencia [MPa]	11.51	5.03
	Deformación de cedencia	2.48%	1.05%
	Esfuerzo último [MPa]	13.66	4.49
PEAD 105 AIRE AZUL (comb. 3)	Esfuerzo máximo [MPa]	23.56	5.21
	% Elongación	46.28%	39.74%
	Módulo de Young [MPa]	525.64	81.25
	Esfuerzo de cedencia [MPa]	14.89	4.96
	Deformación de cedencia	3.06%	1.28%
	Esfuerzo último [MPa]	20.71	4.47
PEAD 105 AIRE BLANCO (comb. 4)	Esfuerzo máximo [MPa]	19.07	7.49
	% Elongación	13.44%	3.81%
	Módulo de Young [MPa]	658.25	139.92
	Esfuerzo de cedencia [MPa]	13.25	5.45
	Deformación de cedencia	1.86%	0.42%
	Esfuerzo último [MPa]	15.29	6.95

Cont. Tabla 3.12

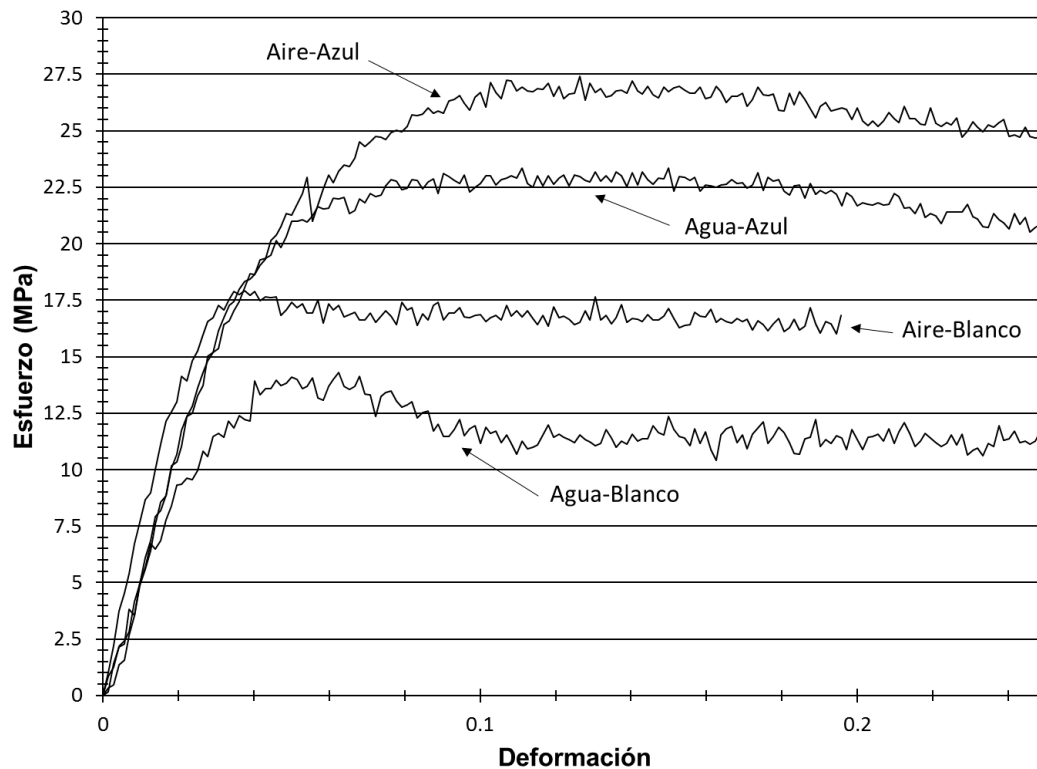
<b>PEAD 130 AGUA AZUL (comb. 5)</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	15.40	3.97
	<b>% Elongación</b>	24.61%	14.89%
	<b>Módulo de Young [MPa]</b>	391.66	63.73
	<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	10.16	3.12
	<b>Deformación de cedencia</b>	2.75%	1.00%
	<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	11.96	4.13
<b>PEAD 130 AGUA BLANCO (comb. 6)</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	18.66	6.41
	<b>% Elongación</b>	13.87%	2.05%
	<b>Módulo de Young [MPa]</b>	461.88	111.91
	<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	12.38	3.56
	<b>Deformación de cedencia</b>	2.72%	0.62%
	<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	14.30	4.84
<b>PEAD 130 AIRE AZUL (comb. 7)</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	21.46	9.39
	<b>% Elongación</b>	22.42%	12.43%
	<b>Módulo de Young [MPa]</b>	592.62	224.29
	<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	12.90	4.87
	<b>Deformación de cedencia</b>	2.08%	0.42%
	<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	17.66	8.86
<b>PEAD 130 AIRE BLANCO (comb. 8)</b>	<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	20.87	7.95
	<b>% Elongación</b>	13.72%	1.95%
	<b>Módulo de Young [MPa]</b>	603.94	146.10
	<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	11.96	3.40
	<b>Deformación de cedencia</b>	1.94%	0.29%
	<b>Esfuerzo último [MPa]</b>	16.38	9.05

## 4 Análisis de los resultados obtenidos

Una vez obtenidos los resultados, se realizaron gráficas fijando el nivel de una de las variables, para analizar la influencia de los otros parámetros y determinar cuáles de ellas son críticas para obtener los mejores resultados mecánicos. Todos estos resultados serán comprobados más adelante con el uso de software de estadística.

### 4.1 Curvas esfuerzo-deformación

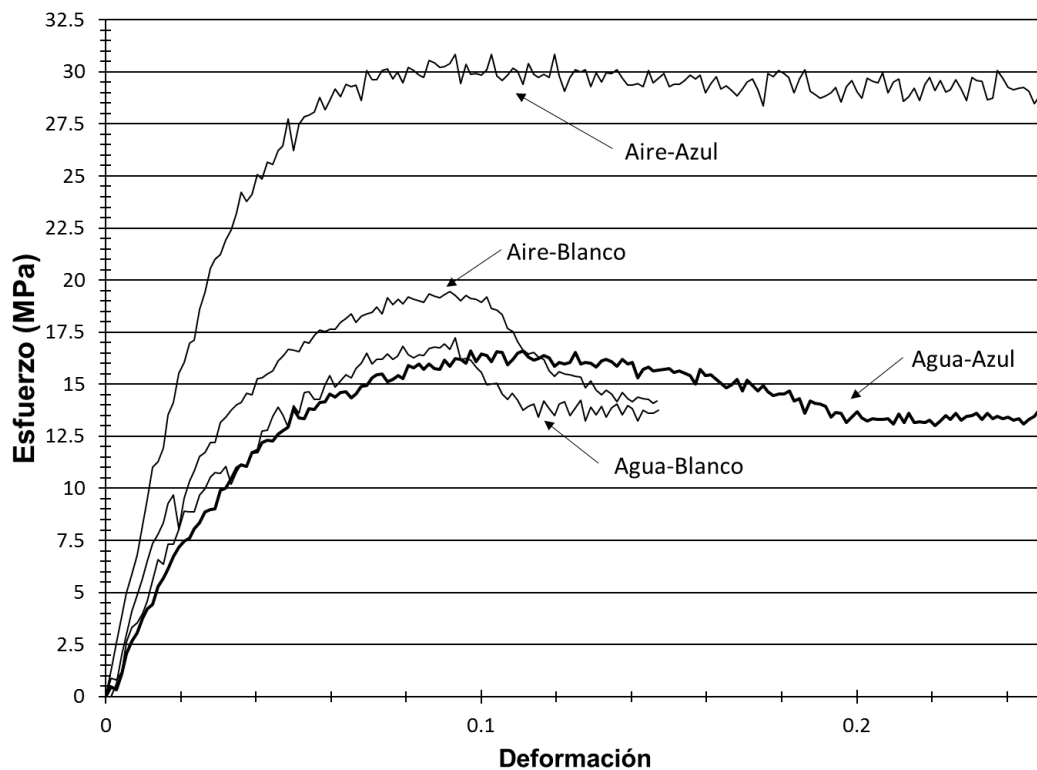
En primer lugar, y para analizar el efecto de la temperatura de inyección en las propiedades de los filamentos, se presentan en las Figura 4.1 y 4.2, curvas seleccionadas de las diferentes condiciones de pigmentación (blanco o azul) y fluido de enfriamiento (aire o agua).



**Figura 4.1** Curvas esfuerzo-deformación de filamentos de PEAD a 105°C (combinaciones 1 a 4): corrida 3 para PEAD aire-azul, corrida 5 para PEAD agua-azul, corrida 5 para PEAD agua-blanco y corrida 2 para PEAD aire-blanco

En la Figura 4.1, la cual muestra la respuesta mecánica de los filamentos inyectados a 105°C, se observa que la composición con mejor resistencia es la de pigmento azul y enfriamiento al aire, mientras que la composición de pigmento blanco y enfriamiento al aire es la que muestra la resistencia más baja. En esta gráfica se observa que para obtener la mejor resistencia los pigmentos azules en el polímero son un factor más importante que el fluido de enfriamiento, probablemente porque rellenan los espacios entre las cadenas y dificultan el movimiento deslizante entre ellas.

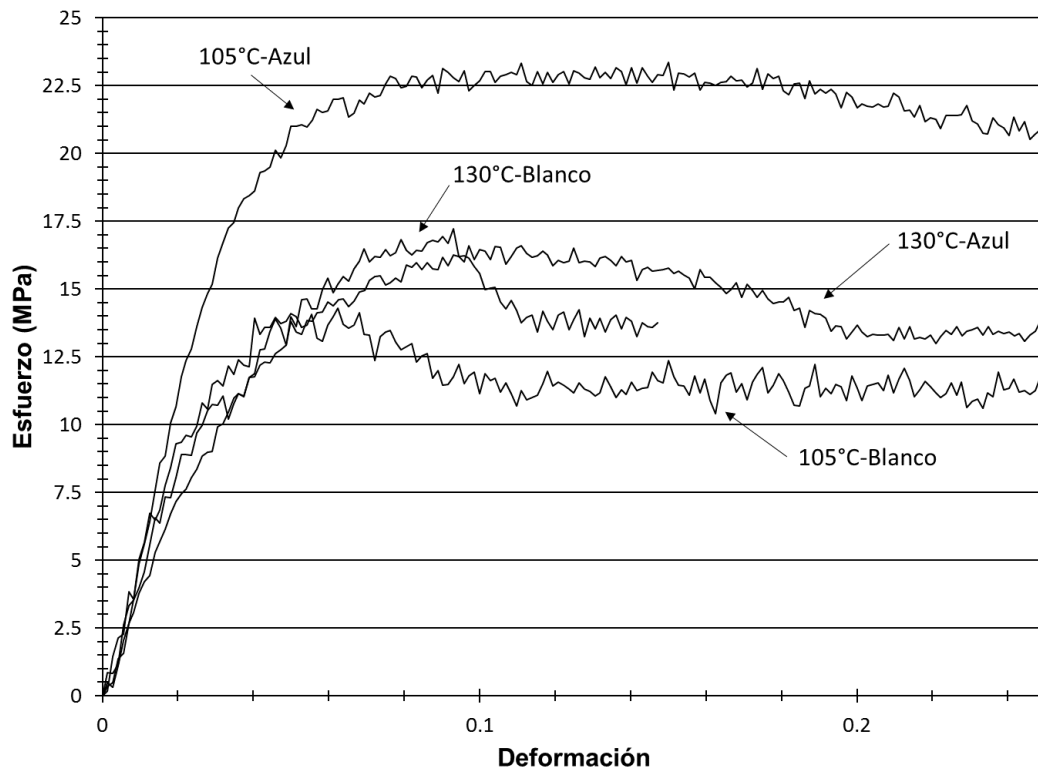
En la Figura 4.2, la cual muestra filamentos inyectados a 130°C, se observa que la composición con mejor resistencia es la de pigmento azul y enfriamiento al aire, mientras que la composición de pigmento blanco y enfriamiento al agua es la que muestra la resistencia más baja. En esta gráfica se puede observar nuevamente que los pigmentos azules en el polímero son un factor más importante que el fluido de enfriamiento para obtener la mejor resistencia, pero no es tan evidente como a la temperatura de extrusión baja (105°C). Por otro lado, la diferencia entre los filamentos azules y con enfriamiento al aire con las otras 3 condiciones es considerable.



**Figura 4.2** Curva esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD a 130° C (combinaciones 5 a 8): corrida 6 para PEAD aire-azul, corrida 1 para PEAD agua-azul, corrida 4 para PEAD agua-blanco y corrida 3 para PEAD aire-blanco

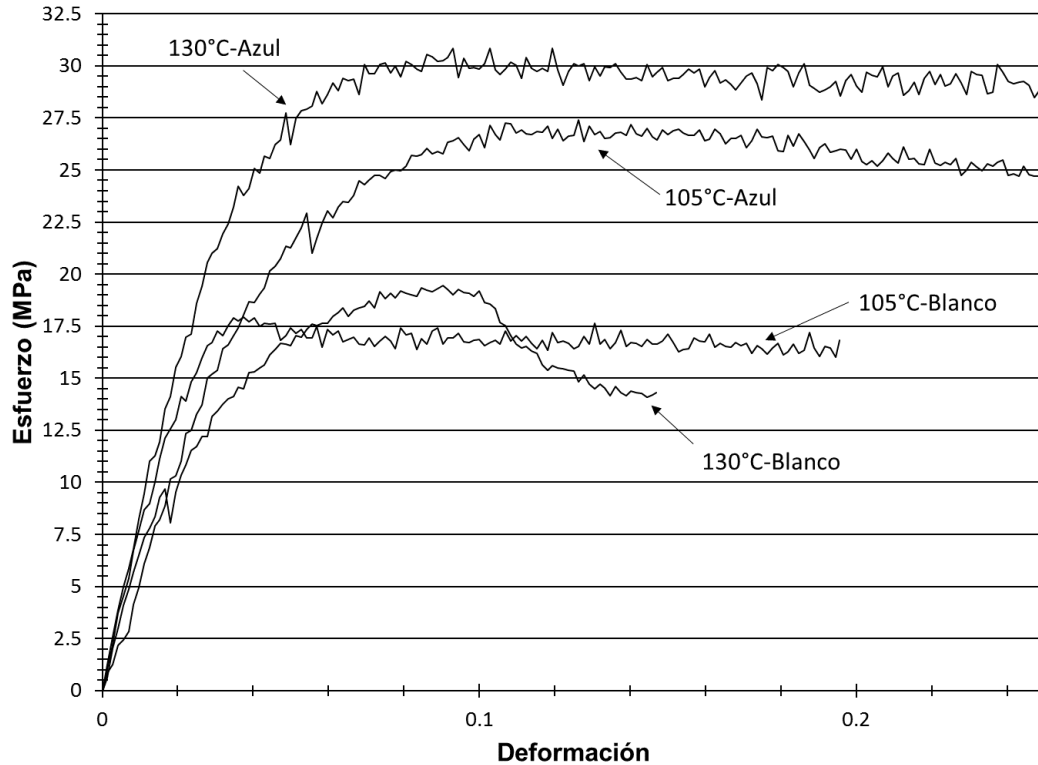
Para analizar el efecto del fluido de enfriamiento (que implica diferentes velocidades de enfriamiento) se comparan las Figura 4.3 y 4.4, curvas seleccionadas de las diferentes condiciones de temperatura de inyección (105 o 130°C) y condiciones de pigmentación (blanco o azul).

En la Figura 4.3, la cual muestra filamentos enfriados en agua, se observa que la composición con mejor resistencia es la de fusión a 105°C y pigmento azul, mientras que la composición de fusión a 105°C y pigmento blanco muestra la resistencia más baja. Nuevamente se puede notar que el pigmento azul resulta en filamentos con mayor resistencia.



**Figura 4.3** Curva esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD con enfriamiento en agua (combinaciones 1, 2, 5 y 6): corrida 5 para PEAD 105°C-azul, corrida 5 para PEAD 105°C-blanco, corrida 1 para PEAD 130°C-azul y corrida 4 para PEAD 130°C-blanco

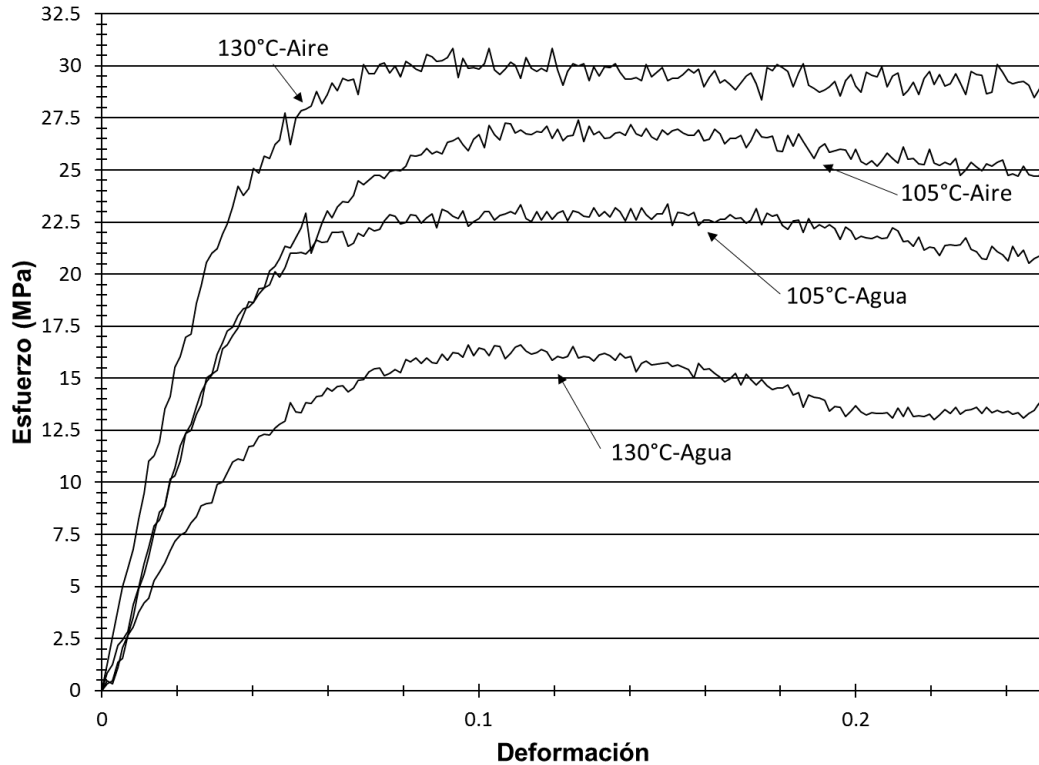
En la Figura 4.4, la cual muestra filamentos enfriados al aire, se puede observar que la mejor resistencia es la de fusión a 130°C y pigmento azul, mientras que la composición de fusión a 105°C y pigmento blanco es la que muestra la resistencia más baja. Como en los casos anteriores el pigmento azul resulta en mejores propiedades, pero a diferencia de la Figura 4.3 ahora las mejores propiedades se alcanzan con 130°C y no 105.



**Figura 4.4** Curva esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD con enfriamiento en aire (combinaciones 3, 4, 7 y 8): corrida 3 para PEAD 105°C-azul, corrida 2 para PEAD 105°C-blanco, corrida 6 para PEAD 130°C-azul y corrida 5 para PEAD 130°C-blanco

Por último, y para analizar el efecto de la pigmentación, se comparan en las Figura 4.5 y 4.6, curvas seleccionadas de las diferentes condiciones de temperatura de inyección (105 o 130° C) y fluido de enfriamiento (al aire o en agua) con el tipo de pigmento como la variable fija.

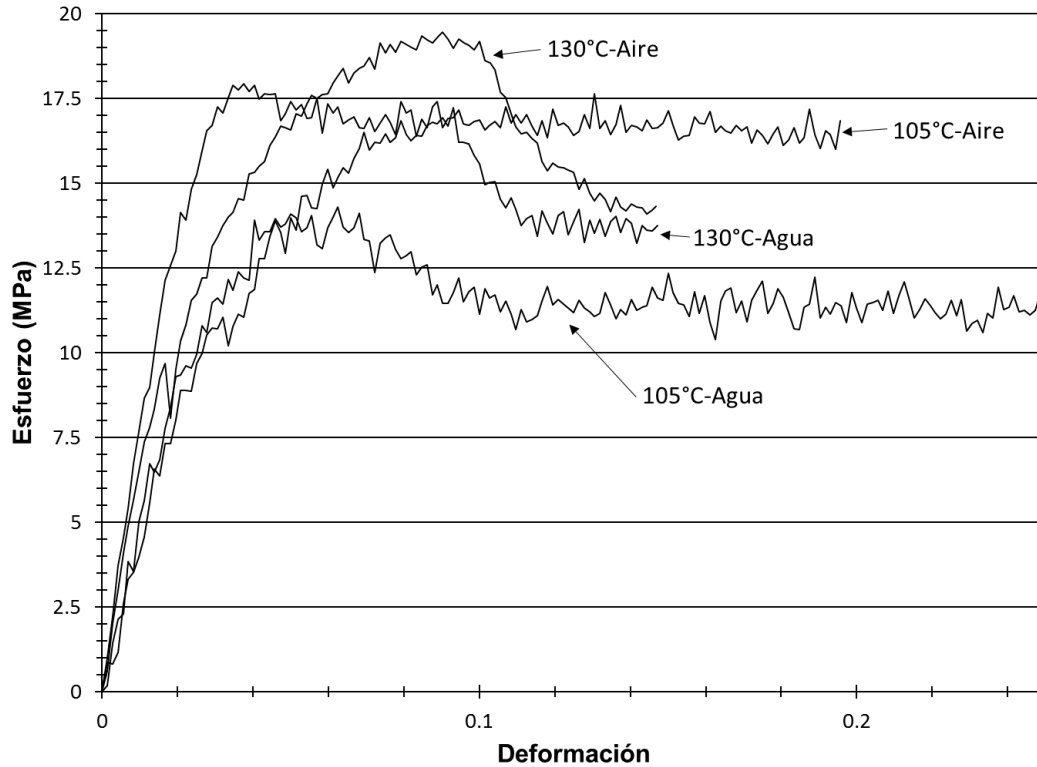
La Figura 4.5 muestra filamentos con pigmento azul y se observa que la mejor resistencia es la de fusión a 130°C y enfriamiento al aire, mientras que la composición de fusión a 130°C y enfriamiento en agua es la que muestra la resistencia más baja. En esta gráfica se observa que para el PEAD azul, la velocidad de enfriamiento es un factor más importante que la temperatura de fusión para obtener la mejor resistencia, esto se comprobará más adelante con el uso de Minitab® (software de estadística).



**Figura 4.5** Curvas esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD a con pigmento azul (combinaciones 1, 3, 5 y 7): corrida 5 para PEAD 105°C-agua, corrida 3 para PEAD 105°C-aire, corrida 1 para PEAD 130°C-agua y corrida 6 para PEAD 130°C-aire

La Figura 4.6 muestra filamentos con pigmento blanco y se puede observar que no hay una condición que sea mucho mejor que las otras (como en los casos anteriores) ya que las curvas se cruzan entre sí, pero la que tiene mayor resistencia a la cedencia es la de 130°C enfriado en aire aunque decae rápidamente, mientras que la de 105°C y enfriado en aire se mantiene prácticamente horizontal después de la cedencia. La peor combinación sí es más fácil de identificar, fusión a 105°C y enfriado en agua.

Para poder analizar las tres variables al mismo tiempo y poder determinar la combinación ideal de los niveles de cada una de ellas para obtener las mejores propiedades mecánicas, esto se comprobará más adelante mediante análisis estadístico utilizando Minitab®, lo que se muestra en la siguiente sección.

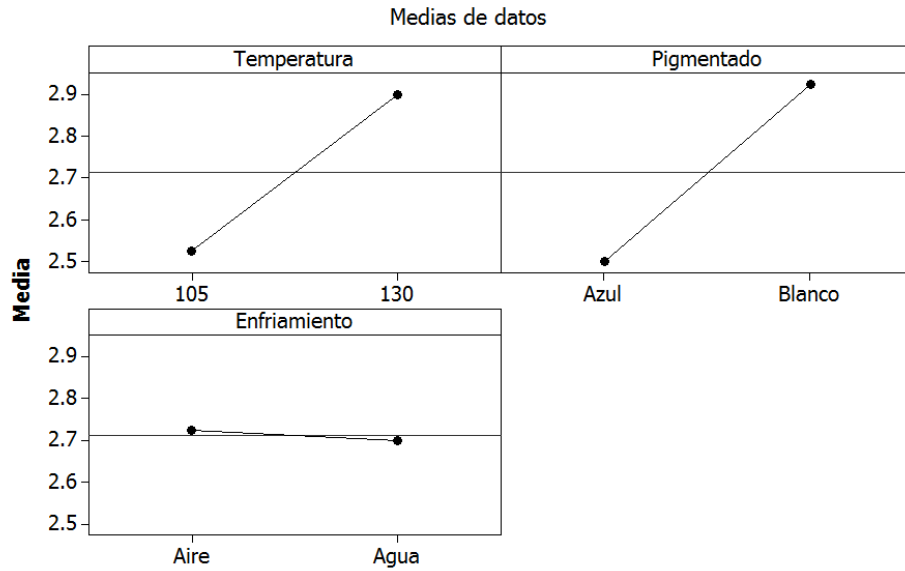


**Figura 4.6 Curvas esfuerzo y deformación de filamentos de PEAD con pigmento blanco (combinaciones 2, 4, 6 y 8): corrida 5 para PEAD 105°C-agua, corrida 2 para PEAD 105°C-aire, corrida 4 para PEAD 130°C-agua y corrida 3 para PEAD 130°C-aire**

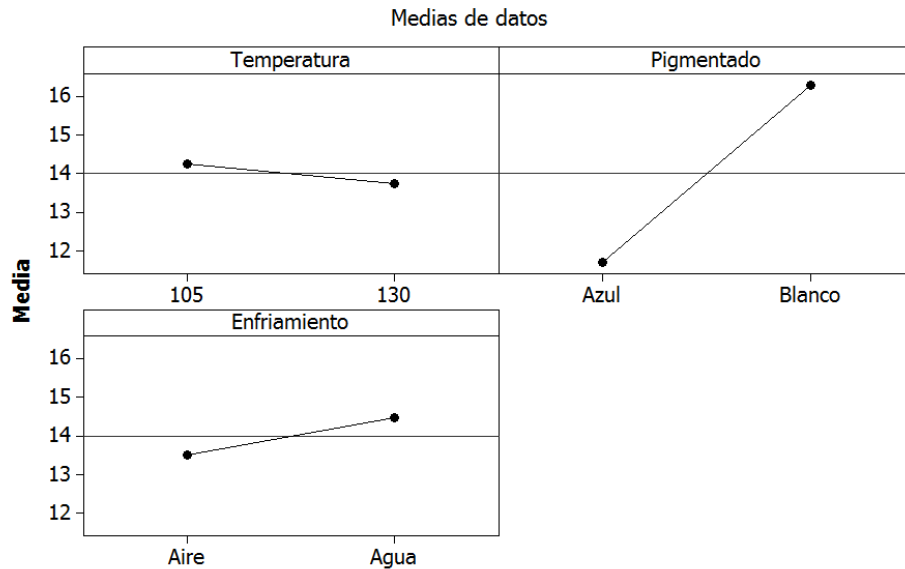
## 4.2 Análisis estadístico de la varianza

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas por medio del software de estadística Minitab®, en las que se hace un análisis de la varianza de los resultados obtenidos para determinar la mejor combinación en los parámetros de manufactura de los hilos para la resistencia a la cedencia y deformación. Este análisis de varianza permite la obtención de las figuras y tablas mostradas en esta sección.

Para analizar la influencia de un parámetro a la vez, se tienen las Figura 4.7 y 4.8 y la Tabla 4.1. En la Figura 4.7, se muestra la variabilidad o los efectos principales en la deformación en el punto de cedencia según las condiciones de las distintas variables. El tipo de fluido de enfriamiento tiene poca influencia en este parámetro, mientras que la variable con mayor influencia es el pigmento seguida de cerca por la temperatura de extrusión.



**Figura 4.7** Gráfica de efectos principales para la deformación en el punto de cedencia



**Figura 4.8** Gráfica de efectos principales para el esfuerzo de cedencia

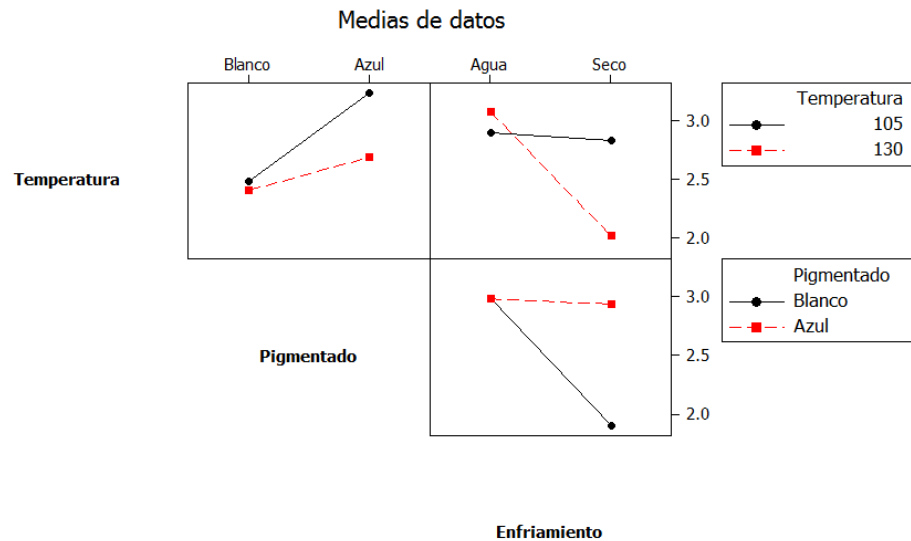
En la Figura 4.8 se muestran los efectos principales para el esfuerzo a la cedencia. Es evidente que la mayor influencia la tiene el pigmento, y tanto temperatura como fluido de enfriamiento prácticamente no influyen en el esfuerzo.

De las Figura 4.7 y 4.8 y la Tabla 4.1, se puede ver que el factor predominante en el comportamiento mecánico de los filamentos es la presencia de pigmentos (azules). Solamente en la deformación a la cedencia

predomina ligeramente más el fluido de enfriamiento que el pigmento. En todos los casos el pigmento tiene un efecto positivo en el comportamiento de los filamentos ensayados, esto es para tener mejores propiedades mecánicas, los hilos deben ser de PEAD azul. Y dependiendo de lo que se quiera, material más resistente o más dúctil es la temperatura de extrusión.

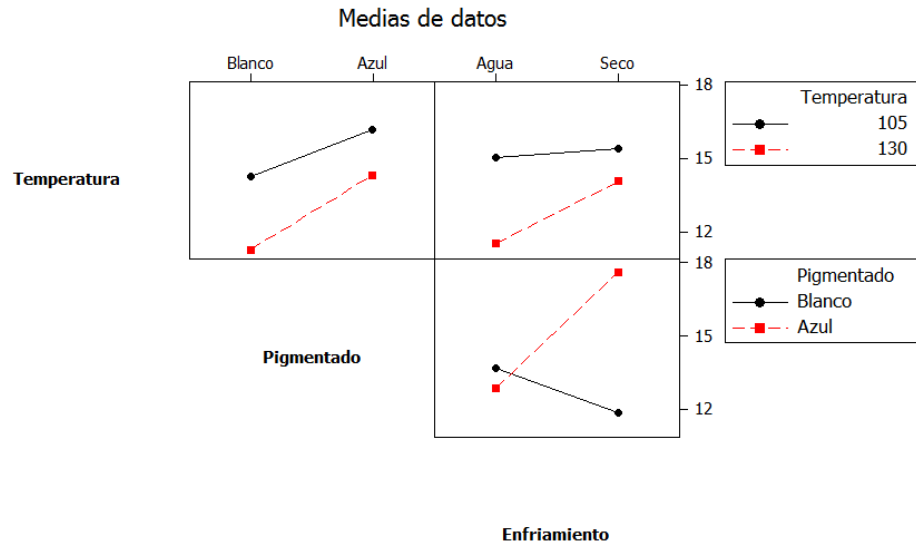
**Tabla 4.1 Efectos principales (1 factor) - ANOVA**

	Temperatura	Pigmento	Enfriamiento
$\sigma_y$	-2.427	2.492	1.472
$\epsilon_y$	-0.315	0.52	-0.565
$\sigma_{max}$	-0.5	4.6	0.95
$\epsilon_{max}$	0.375	0.425	-0.025



**Figura 4.9 Gráfica de interacción de la deformación en el punto de cedencia.**

Por otro lado, si se quiere analizar la influencia de 2 o 3 variables a la vez se deben considerar las Figura 4.9, 4.10 y la Tabla 4.2. En la Figura 4.9 se muestra la influencia de las variables de temperatura, fluido de enfriamiento y la presencia de pigmento en la deformación de cedencia (cantidad de deformación que se alcanza cuando el material entra a su estado plástico). Los mejores resultados se alcanzan con 105°C y pigmento azul. Es interesante notar que si la temperatura de extrusión es 105°C, el fluido de enfriamiento es poco relevante en las propiedades mecánicas, pero si la temperatura es de 130°C el fluido sí tiene influencia, y es mejor uno que implique un mayor delta de temperatura. Por otro lado si el PEAD es azul, el fluido de enfriamiento no tiene prácticamente influencia en la deformación.



**Figura 4.10 Gráfica de Interacción del Esfuerzo de cedencia.**

**Tabla 4.2 Efectos principales (2 y 3 factores a la vez)**

	Temperatura* Pigmento	Temperatura* Enfriamiento	Pigmento* Enfriamiento	Temperatura*Pigmento *Enfriamiento
$\sigma_y$	0.548	1.067	3.317	-0.357
$\epsilon_y$	-0.24	-0.495	0.52	-0.47
$\sigma_{max}$	0.2	0.85	1.75	0.55
$\epsilon_{max}$	0.275	-0.175	0.075	1.025

En la Figura 4.10 se muestra la influencia de estas 3 variables pero ahora en el esfuerzo de cedencia. Nuevamente el mejor comportamiento al esfuerzo de cedencia se alcanza con 105°C y con pigmento azul. Al contrario de lo que sucedía con la deformación en el punto de cedencia, el esfuerzo de cedencia de filamentos azules sí tiene gran variabilidad con el fluido de enfriamiento.

Analizando ambas figuras (4.9 y 4.10) y la Tabla 4.2, se observa que nuevamente el pigmento azul tiene una influencia positiva en el comportamiento (en los 4 parámetros que se midieron en los experimentos), como ya se había notado en el capítulo anterior y en la Tabla 4.1. En este caso en 3 de las 4 variables el mayor efecto es la combinación de pigmento (azul) y enfriamiento (aire).

En conclusión, para obtener filamentos de PEAD con las mejores propiedades mecánicas posibles, las hojuelas deben provenir de envases con pigmentos azules y éstas se deben extruir a 105°C y enfriarse al aire.

## Conclusiones

El procedimiento descrito en esta tesis para reciclar envases de polietileno de alta densidad a través de la obtención de filamentos de 2 mm de diámetro, resulta en propiedades similares al PET reciclado, por lo que se podría sustituir en cualquiera de las aplicaciones actuales de PET. Esto ayudaría ambientalmente al planeta ya que el PEAD es de los polímeros más producidos y consumidos en el mundo.

El procedimiento utilizado es manual lo cual conlleva variaciones en los productos finales, esto implicó ensayar a tracción varios hilos fabricados con las mismas condiciones y elegir aquellos con curvas esfuerzo-deformación similares para su análisis. Un equipo que permita la obtención de los filamentos de manera semi-manual o automática resultaría en un proceso con mejor repetibilidad y en productos de mayor calidad.

El diseño de experimentos ayudó a definir las mejores condiciones de manufactura de los hilos: las hojuelas deben provenir de envases con pigmentos azules y éstas se deben extruir a 105°C y enfriarse al aire. Es interesante que los pigmentos añadidos al polietileno no solamente sirvieron para cuestiones estéticas sino para incrementar las propiedades mecánicas.

**Tabla 0.1 Comparación de propiedades entre los polímeros PET y PEAD grado comercial y los reciclados**

	<b>PET*</b>	<b>PET reciclado</b>	<b>PEAD*</b>	<b>PEAD reciclado</b>
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	2.1-90	20.28	11-25	23.56
<b>% Elongación</b>	30-600	44.70%	200-500%	46.28%
<b>Módulo de Young [MPa]</b>	107-5,200	592.11	620-1,450	525.64
<b>Esfuerzo de cedencia [MPa]</b>	53-265	15.21	6.89-30	14.89
<b>Deformación de cedencia</b>	3.5-8	2.76%	4-9	3.06%

\*Datos del PET grado comercial (58). Datos del PEAD grado comercial (59).

Se sabe que el proceso de reciclaje de cualquier polímero reduce las propiedades de los mismos pues estos procesos implican cortar mecánicamente o térmicamente las cadenas que forman a los polímeros. A

pesar de que en las tablas 3.3, 3.6 y 3.12 se pudo notar que las propiedades mecánicas del PET y del PEAD son similares, éstas, comparadas con filamentos de grado comercial, sí tienen variaciones (tabla 5.1):

- Los esfuerzos máximos de PET y PEAD reciclados se encuentran dentro de los rangos de los grados comerciales (GC); además, éstos son similares entre sí.
- Los porcentajes de elongación en la ruptura siguen el mismo comportamiento que los esfuerzos máximos: similares entre sí y dentro del rango del GC.
- El módulo de Young del PET se encuentra dentro del rango pero el PEAD no, haciendo al material menos rígido que en su estado comercial, lo cual podría restringir algunas aplicaciones mecánicas.
- El esfuerzo de cedencia es la propiedad más dispar entre ambos materiales. El PET tiene mayor valor que el PEAD pero mientras que para el polietileno está dentro de rango del GC, el PET está muy por debajo de éste (70% por debajo del valor mínimo).
- La deformación en el punto de cedencia para ambos materiales se encuentra por debajo de los rangos. Probablemente éste sea el factor más crítico para buscar aplicaciones de ambos materiales reciclados.
- Los pigmentos azules no sólo son un modificador estético sino que incrementan la resistencia mecánica de los filamentos, probablemente porque además del color están teniendo una función de rellenedor.
- La presencia de pigmentos tiene mayor efecto en las propiedades mecánicas que el fluido de enfriamiento de los hilos, esto es más crítico a temperaturas bajas que altas debido a que a mayor temperatura, mayor fluidez de las cadenas y menor efecto rellenedor tienen los pigmentos.
- A diferencia de los pigmentos cuyo efecto es evidente (su presencia mejora siempre las propiedades mecánicas), la temperatura y el fluido de enfriamiento no son variables que pueden analizarse por separado, de ahí que se utilizó tanto DOE como ANOVA pues su efecto en las propiedades depende de la combinación de los niveles de cada uno.
- Para polímeros pigmentados, la velocidad de enfriamiento tiene mayor efecto en las propiedades mecánicas que la temperatura de extrusión. Y es mejor enfriamientos lentos para obtener mejores valores.

## Recomendaciones para trabajos futuros

Esta tesis sólo muestra resultados de PEAD proveniente de botellas de yogurt líquido y de envases de suavizante de telas (botellas azul claro). Sería interesante analizar el comportamiento del polietileno de alta densidad de otros empaques con otros pigmentos (Figura 0.1) para comprobar y cuantificar la influencia de los pigmentos en las propiedades mecánicas de los filamentos obtenidos.



Figura 0.1 Envases de polietileno de alta densidad de distintos colores <sup>(60)</sup>

A su vez, se podría realizar el análisis de la viabilidad de obtener filamentos de polietileno de baja densidad ya que por ser de baja densidad se esperaría que sus propiedades se vean perjudicadas en mayor grado que las del PEAD. Este análisis podría incluir fuentes que contengan pigmentos de distintos colores (Figura 0.2).



Figura 0.2 Bolsas de polietileno de baja densidad de distintos colores <sup>(61)</sup>

# Referencias Bibliográficas

1. **Martínez, Ana Citlalic González.** Costos y beneficios ambientales del reciclaje en México. *Instituto Nacional de Ecología*. [En línea] 27 de Agosto de 2007. [Citado el: 27 de Octubre de 2016.] <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetitas/335/reciclaje.html>.
2. **S.L.U., Reciclajes AVI.** ¿Sabes cuántos años tardan en degradarse el cartón, el plástico o el vidrio? *Reciclajes AVI S.L.U.* [En línea] s.f. [Citado el: 27 de Enero de 2018.] <http://reciclajesavi.es/sabes-cuantos-anos-tardan-en-degradarse-el-carton-el-plastico-o-el-vidrio/>.
3. *La situación de los envases de plástico en México.* **Cristán Frías, Arturo, Ize Lema, Irina y Gavilán García, Arturo.** 69, Diciembre de 2003, Gaceta Ecológica: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos, págs. 67-82.
4. **Reyes, José Ángel Mora.** El problema de la basura en la ciudad de México. *Adolfo Christlieb Barrolo: Publicación de estudios urbanos y metropolitanos*. [En línea] 23 de Abril de 2004. [Citado el: 02 de Noviembre de 2016.] [http://www.paot.org.mx/contenidos/paot\\_docs/pdf/basura\\_df.pdf](http://www.paot.org.mx/contenidos/paot_docs/pdf/basura_df.pdf).
5. **INSTITUTO NACIONAL DE SALUD PÚBLICA.** Programa de Gestión Ambiental. *INSTITUTO NACIONAL DE SALUD PÚBLICA*. [En línea] Diciembre de 2012. <https://www.insp.mx/lineas-de-investigacion/saludambiental/pga-lim-10.html>.
6. **Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México.** *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. Ciudad de México : Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2016. págs. 23-27. 183.
7. *La CdMx, segunda ciudad del mundo que genera más basura; ya no habrá dónde ponerla.* **Lira, Ivette.** Ciudad de México : s.n., 03 de Noviembre de 2016, Sin Embargo.
8. **Greenpeace.** La destrucción de México: La realidad ambiental del país y el cambio climático. *Greenpeace*. [En línea] 2009. [Citado el: 02 de Noviembre de 2016.] [http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2009/6/destruccion\\_mexico.pdf](http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2009/6/destruccion_mexico.pdf).
9. **INEGI.** Basura. *Cuéntame territorio*. [En línea] 2012. [Citado el: 02 de Noviembre de 2016.] <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/ambiente/basura.aspx?tema=T>.
10. **El Economista.** En México sólo se recicla el 15% del plástico: ANIPAC. *El Economista*. 14 de Febrero de 2011.
11. **Freinkel, Susan.** *Plastic: A Toxic Love Story*. New York : Houghton Mifflin Harcourt, 2011. 978-0-547-15240-0.
12. **Foundation, Ellen MacArthur.** [En línea] [Citado el: 3 de Marzo de 2019.] <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>.
13. *Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene.* **Pavel Oblak, Joamin Gonzalez-Gutierrez, Barbara Zupančič, Alexandra Aulova, Igor Emri.** April, April de 2015, Polymer Degradation and Stability, Vol. 114, págs. 133-145.
14. **Escuela Colombiana de Ingeniería.** Curso de proceso de manufactura: Plásticos. *Escuela colombiana de ingeniería "Julio Gravitó"*. [En línea] 2004. [Citado el: 02 de Noviembre de 2016.] [http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734\\_plimeros.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2734_plimeros.pdf).
15. **Groover, Mikell P.** *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. [ed.] William Estenquist. 1a. s.l. : Pearson, 1997. págs. 187-188.
16. **Callister, William D.** *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. NY : John Wiley & Sons, Inc., 1996. págs. 510-512. Vol. 2.
17. **Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 4. NJ :

- Prentice Hall, 2002. pág. 185.
18. **Ferreira, Pedro Carrasco.** Polímeros Naturales - Polímeros Sintéticos. *SlidePlayer*. [En línea] <http://slideplayer.es/slide/5405022/>.
  19. **Sarmina, Carlos A. Del Razo.** Manual de propiedades y aplicaciones de plásticos. [Manual escolar]. 13 de Junio de 2007. págs. 10-16.
  20. **Ortuño, Ángel Vian.** *Introducción a la química industrial*. Barcelona : Editorial Reverte, 1994. pág. 350. Recuperado en octubre 2017.
  21. **Girón, Iván Ernesto Roca.** Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad. *Trabajo de graduación presentado a junta directiva de la Facultad de Ingeniería*. Septiembre de 2005.
  22. **Billmeyer, Fred W.** *Ciencia de los polímeros*. NY : Editorial Reverté, 2004. pág. 393. Recuperado octubre 2017.
  23. **Escuela Colombiana de Ingeniería.** Protocolo: Identificación de los plásticos. *Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Gravito"*. [En línea] 2004. [Citado el: 02 de Noviembre de 2016.] [http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1960\\_idplasticosr2.pdf](http://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1960_idplasticosr2.pdf).
  24. **Universidad Nacional del Nordeste.** El PVC en la construcción. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. [En línea] 2004. [Citado el: 03 de Noviembre de 2016.] <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-017.pdf>.
  25. **Centro de Información Técnica.** Poliestireno: Características y ventajas respecto al medio ambiente. [ed.] Centro de Información Técnica. *Boletín Técnico Informativo N° 38*. Mayo de 2011, 38, pág. 3. Recuperado octubre 2017.
  26. **Hernández, María Laura Ortiz.** El impacto de los plásticos en el ambiente. [ed.] Laura Angulo. *La jornada ecológica*. 2013. Recuperado octubre 2017.
  27. **Multiservicios Pedrola.** Cómo fabricar pellets. *Todobiomasa*. [En línea] <http://todobiomasa.es/blog/como-fabricar-pellets/>.
  28. **Ciencia y Cemento.** "Ciencia y Cemento". "Peletizados" una tecnología clave para el avance de la biomasa. [En línea] 15 de Mayo de 2014. <http://wp.cienciaycemento.com/peletizados-la-fabrica-de-pelets-clave-para-el-avance-de-la-biomasa/>.
  29. **ASECONSIST.** HUMPLAST. ¿Cómo se desarrolla el proceso de moldeo por inyección del plástico? [En línea] 17 de Octubre de 2017. <https://humplast.com/2017/10/17/como-se-desarrolla-el-proceso-de-moldeo-por-inyeccion-del-plastico/>.
  30. **Termoformado.** Termoformado. [En línea] 26 de Enero de 2012. <http://termoformadodelaminas.blogspot.mx/2012/01/termoconformado.html#!/2012/01/termoconformado.html>.
  31. **Textos Científicos.** Textos Científicos. *Propiedades del Polietileno*. [En línea] 2005. <https://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades>.
  32. **Mathers, Gene.** The Welding Institute. *Bend Testing*. [En línea] Noviembre de 2004. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/bend-testing-073>.
  33. **Rodríguez, Noemí.** Viviendo Consciente. *Botellas de plástico y de vidrio. Cómo saber si son saludables*. [Blog]. 2016. Recuperado octubre 2017.
  34. —. Botellas de plástico y de vidrio. Cómo saber si son saludables. *Viviendo Consciente*. [En línea] 2016. <https://viviendoconsciente.com/botellas-de-plastico-vidrio-saludables/>.
  35. **Universidad de Piura.** Reciclaje de plásticos. *Universidad de Piura*. [En línea] 2003. [Citado el: 02 de Noviembre de 2016.] [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_63\\_186\\_28\\_558.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_63_186_28_558.pdf).
  36. **Vázquez Morillas, Alethia, y otros.** El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente. *Universidad Autónoma Metropolitana*. [En línea] 2014. [Citado el: 03 de Noviembre de

- 2016.] <http://www.anipac.com/origendelosplasticos.pdf>.
37. **González, Viridiana.** México: Conoce el proceso para transformar botellas de plástico PET en nuevos envases. *Veo Verde*. [En línea] 11 de Junio de 2012. [Citado el: 07 de Noviembre de 2016.] <https://www.veoverde.com/2012/06/mexico-conoce-el-proceso-para-transformar-botellas-de-plastico-pet-en-nuevos-envases-de-la-recicladora-petstar/>.
  38. **TV Pública de Argentina.** *Científicos Industria Argentina - Ladrillo de PET*. 10 de Octubre de 2015.
  39. **Ciencia & cemento.** “Ladrillos PET” a base de residuos plásticos. *Ciencia & cemento*. [En línea] septiembre de 2015. <http://wp.cienciaycemento.com/ladrillos-pet-a-base-de-residuos-plasticos/>.
  40. *¡Tenis a partir de plásticos en el mar! Muy interesante*. 03 de Junio de 2015, Muy interesante.
  41. **Nava, Ivan.** Esta marca creó unos tenis hechos con plásticos reciclados. *Merca 2.0*. [En línea] julio de 2016. <https://www.merca20.com/esta-marca-creo-unos-tenis-hechos-plastico-reciclado-del-oceano/>.
  42. **González, Viridiana.** México: Un ambientalista crea su propia pintura reciclando PET. *Veoverde*. [En línea] julio de 2012. <https://www.veoverde.com/2012/07/mexico-un-ambientalista-crea-su-propia-pintura-reciclando-el-pet/>.
  43. **Paz, Carlos.** Papel hecho con botellas de plástico representará a México en España. *Milenio*. 20 de Mayo de 2016.
  44. **Muerza, Alex Fernández.** 10 cosas que no te imaginas que están hechas con material reciclado. *El Huffington Post*. [En línea] 11 de Mayo de 2016. [http://www.huffingtonpost.es/2016/05/11/cosas-material-reciclado\\_n\\_9881460.html](http://www.huffingtonpost.es/2016/05/11/cosas-material-reciclado_n_9881460.html).
  45. **s.a.** Las camisetas recicladas de Nike durante el mundial. *Paréntesis*. [En línea] julio de 2010. [http://www.parentesis.com/noticias/tecnologia\\_verde/Las\\_camisetas\\_recicladas\\_de\\_Nike\\_durante\\_el\\_mundial](http://www.parentesis.com/noticias/tecnologia_verde/Las_camisetas_recicladas_de_Nike_durante_el_mundial).
  46. **Nortpalet.** Nortpalet. *¿Quiénes somos?* [En línea] s.f. <https://nortpalet.com/es/info/quienes-somos/>.
  47. **Nortpalet Fábrica.** Almacenaje y logística. *Interempresas*. [En línea] s.f. <https://www.interempresas.net/Logistica/FeriaVirtual/Noticias-Nortpalet-Fabrica-S-L-214720.html>.
  48. **Grolms, Martín.** New bio-based polyol with excellent characteristics. *Materials Views*. [En línea] 01 de Septiembre de 2015. <http://materialsviews.com/new-bio-based-polyol-excellent-characteristics/>.
  49. **PC World.** Carreteras sostenibles hechas con plásticos reciclados. *PC World*. [En línea] 01 de Noviembre de 2016. [Citado el: 07 de Noviembre de 2016.] <http://www.pcworld.com.mx/Articulos/36739.htm>.
  50. **Menon, Aparna.** The Better India. *Roads Made of Plastic Waste in India? Yes! Meet the Professor Who Pioneered the Technique*. [En línea] 2015. <https://www.thebetterindia.com/43685/plastic-waste-in-road-construction-plastic-man-india-prof-vasudevan/>.
  51. **Alcalá, Roberto Gutiérrez.** Proyecto UNAM: Aprovechan plástico de desecho en concretos. *El Universal*. 04 de Julio de 2015.
  52. **Montgomery, Douglas C.** *Diseño y análisis de experimentos*. [ed.] Limusa Wiley. 1994. Vol. 2.
  53. **SPC Consulting Group.** SPC Consulting Group. *Diseño de Experimentos - DOE*. [En línea] enero de 2013. <https://spcgroup.com.mx/doe/>.

54. **Manufacturing Terms.** Manufacturing Terms. *El Choque Térmico*. [En línea] s.f. <http://www.manufacturingterms.com/Spanish/Thermal-shock.html>.
55. **SA.** <http://www.instron.co.uk/en-gb/our-company>. *Instron*. [En línea] 2017. <http://www.instron.co.uk/en-gb/our-company>.
56. **DeWolfe, Andrew.** How to Perform an ASTM D638 Plastic - Tensile Strength Test. *ADMET*. [En línea] 6 de julio de 2010. <https://www.admet.com/how-to-perform-an-astm-d638-plastic-tensile-strength-test/>.
57. **Azteca Noticias.** Tiene familia mexicana promedio de 4 integrantes: INEGI. *Azteca Noticias*. [En línea] 4 de marzo de 2011. <http://www.aztecanoticias.com.mx/notas/finanzas/44419/tiene-familia-mexicana-promedio-de-4-integrantes-inegi>.
58. **MatWeb, LLC.** MatWeb Material Property Data. [En línea] [Citado el: 18 de Dec de 2018.] <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599ea20>.
59. —. MatWeb Material Property Data. [En línea] [Citado el: 18 de Dec de 2018.] <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=482765fad3b443169ec28fb6f9606660&ckck=1>.
60. **Capital, Reciclagem.** [En línea] <http://reciclagemcapital.com/produto/74801/>.
61. **Industriais, Solucoes.** [En línea] 2018. <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/embalagens/utiliplast/produtos/plastico/pebd-reciclado-preco>.