

# Comportamiento Mecánico del Plástico Proveniente de Residuos Urbanos con Carga de Tensión

## *Mechanical Behavior of Urban Waste Plastic with Tensional Load*

Investigación

Dr. Alejandro Meza-de Luna<sup>1</sup>, Dra. Rosario Moreno-Virgen<sup>2</sup>, Carlos Alberto Beltrán-García<sup>3</sup>, Joel Alberto Martínez-Domínguez<sup>3</sup>, Carlos Daniel Villarreal-Varela<sup>3</sup>, Luis Fernando Cardona-Avalos<sup>3</sup>.

TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Mecánica<sup>1</sup>, Departamento de Ciencias Básicas<sup>2</sup>, Estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica<sup>3</sup>.

Av. Adolfo López Mateos No. 1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20256, Tel: 01(449) 9105002, Fax: 01 (449) 9700423, alejandro.meza@mail.ita.mx

### Resumen

El plástico es un material que ha sido utilizado para diferentes ámbitos de la vida cotidiana, su uso se ha incrementado en forma exponencial; mientras que en 1950 su explotación alcanzaba los 5 millones de toneladas, en el 2001 se lograron cifras superiores a los 100 millones de toneladas. Esto ha provocado diferentes problemas sociales, debido a que los desechos deben ir a los rellenos sanitarios, ser incinerados o incluso terminar en los océanos. Una alternativa para su reciclaje es aprovechar estos recursos como refuerzo de materiales. Con esta visión, se desarrolló una campaña experimental donde se analizó plástico de botellas de aderezo, de agua, y leche; de estos materiales se extrajeron especímenes para ser sometidos a ensayos de tensión. Los resultados indican que el comportamiento de estos plásticos no es igual en cuanto a resistencia, deformación y forma de ruptura.

**Palabras clave:** plástico, reciclaje, resistencia, deformación, tensión.

### Abstract

Plastic is a material that has been used for different areas of daily life; its use has increased exponentially; while in 1950 its exploitation reached 5 million tons, in 2001 the figures reached more than 100 million tons. This is a problem for different social sectors because the waste must be deposited in landfills, incinerated or ever end up in the oceans. An alternative for recycling is their use as a reinforcement material. With this vision, an experimental campaign was developed where dressing, water, and milk plastic bottle were analyzed; of these materials, specimens were extracted in order to be evaluated with tensional strength. The results indicate that the behavior of the plastic tested had different resistance, deformation and rupture form.

**Keywords:** plastic, recycling, resistance, deformation, tension.

### Introducción

Una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, es el manejo de desechos urbanos sólidos, debido a la reducción de espacio para el relleno sanitario [1]; la industrialización, la economía y el incremento de la población, son los factores que más han afectado [2-5].

El plástico es un material que ha incrementado su aplicación en diferentes sectores, posee baja densidad y resistencia comparada con su peso. En el mundo su uso se ha incrementado de 5 millones de toneladas en los 1950's a 100 millones de toneladas en el 2001 [1]. En los últimos diez años, en Europa, se reportó una producción de plástico de 288 millones de toneladas por año [6,7]; mientras que sólo en los Estados Unidos, se usaron 31.75 millones de toneladas [7].

Las toneladas de plástico producido, una vez utilizado, se han destinado al relleno sanitario, incineración, y otra parte ha terminado como contaminación en los océanos. En el 2003, se estimó que el 80% del material se ubicó en el relleno sanitario, mientras que el 8% fue incinerado y solo el 7% reciclado [1].

El reciclaje se define como la operación que permite una recuperación, transformación y elaboración de un material a partir de residuos, ya sea que se utilice una pieza en forma total o parcial [8]. Su finalidad es aprovechar los recursos materiales de los residuos con un fin útil, de tal manera que se puedan convertir en materia prima [9]; además el proceso de reciclar ayuda a mejorar la economía y el desarrollo sostenible, así como reduce la contaminación, y el volumen de residuos municipales [10, 11].

Para destinar el plástico proveniente de residuos urbanos en el refuerzo de materiales, es necesario conocer su comportamiento mecánico. Parámetros como: resistencia, capacidad de elongación, tipo de falla y rigidez, son necesarios de analizar con el fin de considerar su factibilidad como refuerzo de materiales.

Se han realizado escasas investigaciones sobre el estudio del plástico reciclado, por ejemplo, Pesic [12] estudió fibras recicladas de polietileno de alta densidad, las fibras fueron producidas a partir de un proceso de extrusión, sus resultados indican una resistencia a tensión de 37 MPa. Turku [13] realizó un material compuesto con plástico reciclado y madera, la resistencia a tensión fue de 11 MPa. Elzubair [14] empleó fibras naturales para reforzar materiales termoplásticos, alcanzando resistencias tensionales de 28 MPa.

El objetivo que conduce esta investigación, es identificar si los plásticos destinados a diferentes usos comunes en la vida diaria tienen las mismas propiedades mecánicas. Por lo cual, se desarrolló experimentalmente ensayos a tensión pura (carga a tensión en una sola dirección) especímenes de botellas plásticas de aderezo, de agua y de leche. Previamente, las muestras fueron cortadas y calibradas para ser ensayadas en una máquina universal. Como resultado se obtuvieron gráficos de esfuerzo-deformación, donde se resaltan propiedades mecánicas como la resistencia a la fluencia, la resistencia máxima y última, además que se utilizó la teoría de Mohr para reconocer el tipo de falla que se generó en los especímenes.

En esta investigación se muestra un marco teórico donde se remarcan la Ley de Hooke, el círculo de Mohr y los diagramas esfuerzo-elongación como criterios empleados durante el análisis. En el apartado de materiales y métodos se remarcan las características geométricas de los especímenes. Finalmente, en la sección de resultados se pueden observar los datos provenientes de los ensayos de tensión aplicados a los especímenes plásticos.

**Fundamentos teóricos**

En el estudio del comportamiento mecánico mediante los ensayos destructivos a tensión es importante reconocer la Ley de Robert Hooke, quien en el siglo XVII publicó un artículo que establece que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación unitaria [15, 16]. La Ley de Hooke es mostrada en la ecuación 1.

$$\sigma = \varepsilon E \tag{1}$$

Donde:

$\sigma$  = esfuerzo

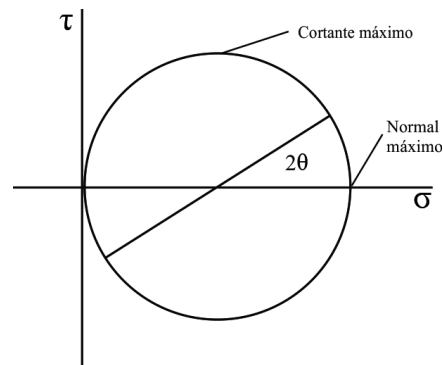
$\varepsilon$  = deformación unitaria

$E$  = módulo de elasticidad

Otro concepto importante es el propuesto por el Alemán Otto Mohr, quien en 1882 desarrollo un método gráfico para estimar en un elemento los esfuerzos principales y cortantes máximos. Su trazado se basa

en los ejes cartesianos  $x$  y  $y$ , los que representan los esfuerzos normal ( $\sigma$ ) y esfuerzo cortante ( $\tau$ ); mientras que un ángulo  $\theta$ , permite relacionar estos valores [17].

La teoría de Mohr aplicada a ensayos de tensión, correlaciona el tipo de fallo que presenta un material, indicando si el material es vulnerable a cargas normales o cortantes. El ángulo al cual rompe el material que fue sometido a tensión, se puede referenciar con el ángulo  $\theta$  del trazado de Mohr y valorar la falla que está presentando el material. La Figura 1 representa las características generales del trazado de Mohr para un estado de esfuerzos de tensión pura.



**Figura 1.** Esquema representativo del trazado de Mohr para carga normal pura.

En la Figura 1, se puede reconocer los puntos donde se ubican los esfuerzos cortante y normal máximo. El esfuerzo cortante máximo, se presenta cuando  $\theta$  es igual a 45 grados (o  $2\theta=90$  grados); mientras que el esfuerzo normal máximo, se genera cuando  $\theta$  es igual a 0 grados.

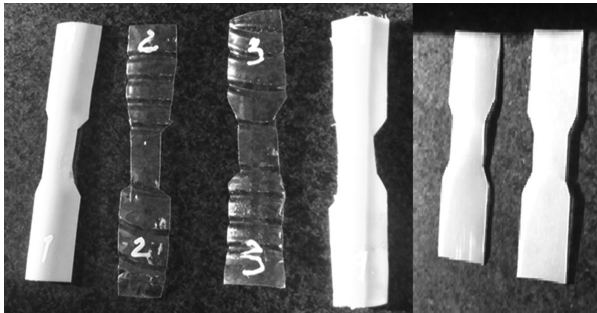
Otra herramienta para caracterizar el comportamiento mecánico de un material, es el gráfico esfuerzo-elongación. En este gráfico se puede localizar la resistencia a la fluencia, que representa la interfaz entre la zona elástica y plástica; además de la resistencia máxima y última.

**Materiales y métodos**

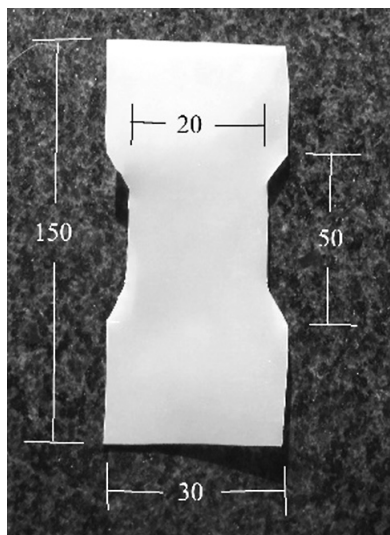
El plástico utilizado en este estudio, proviene de tres elementos de productos plásticos que se utilizan en forma cotidiana, como son: botellas para aderezos (BA), botellas para agua (BH<sub>2</sub>O), y botellas para leche (BL). De las botellas, se extrajeron un total de seis muestras: 2 de BA, 2 de BH<sub>2</sub>O y 2 de BL, ver Figura 2.

Las muestras fueron cortadas y adaptadas para ser estudiadas bajo la influencia de fuerzas tensionales. La geometría en las muestras tiene la finalidad de concentrar los esfuerzos en las partes centrales de los especímenes, con lo que se garantiza que la falla por ruptura se presente en esta sección; por otra parte, los

extremos, en los cuales se sujetará, tienen una sección transversal mayor –con el objetivo que la ruptura del material no se efectúe en esta área-. La Figura 3 muestra las dimensiones de los elementos ensayados, donde las dimensiones están en milímetros y tienen una tolerancia de  $\pm 2$  mm.



**Figura 2.** Serie de muestras ensayadas.



**Figura 3.** Características geométricas de las muestras de plástico ensayadas, dimensiones en mm.

Asimismo, las muestras fueron calibradas para tomar lecturas del espesor; para este proceso, fue utilizado un calibrador Vernier digital Mitutoyo® con una precisión de 0.01 mm. Los resultados del espesor promedio de la pared de las muestras son los siguientes: botellas para aderezos 0.94 mm, botellas para agua 0.1 mm, y botellas para leche 0.86 mm.

En la campaña experimental se utilizó una máquina universal Shimadzu® con capacidad para pruebas de tensión y compresión de 10 toneladas, ver Figura 4. Los ensayos se realizaron bajo fuerzas de tensión a una velocidad de 5 mm/min, y fueron sujetadas en sus extremos en una longitud de 20 mm.



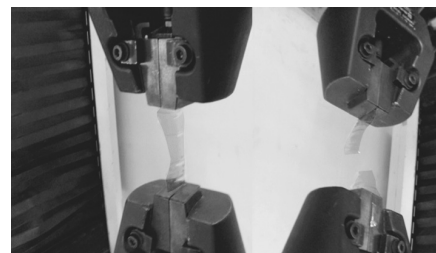
**Figura 4.** Máquina universal empleada durante la campaña experimental.

### Resultados y discusión

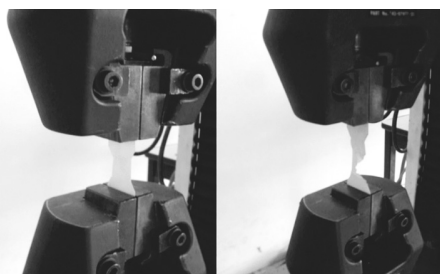
Las seis muestras de plástico BA, BH<sub>2</sub>O, y BL fueron ensayadas a tensión pura. Durante el proceso de ensaye se notó que el plástico, de los especímenes provenientes de botellas de leche, presentó una mayor capacidad de elongación, así como el tipo de falla es diferente. De acuerdo a la teoría de Mohr, la falla en el plástico de BL es frágil ante esfuerzos cortantes, debido a que la ruptura del material fue a 45 grados (ver figura 5c), mientras que para los plásticos BA y BH<sub>2</sub>O fallan por esfuerzo normal, a 0 grados (ver figuras 5a y 5b).



**Figura 5a.** Muestra de plástico proveniente de envase de aderezo.

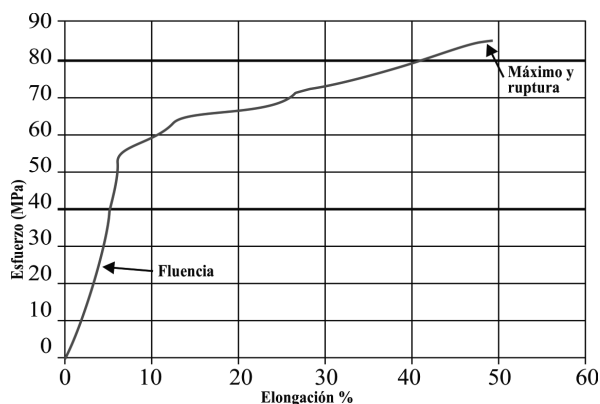


**Figura 5b.** Muestra de plástico proveniente de envase de agua.

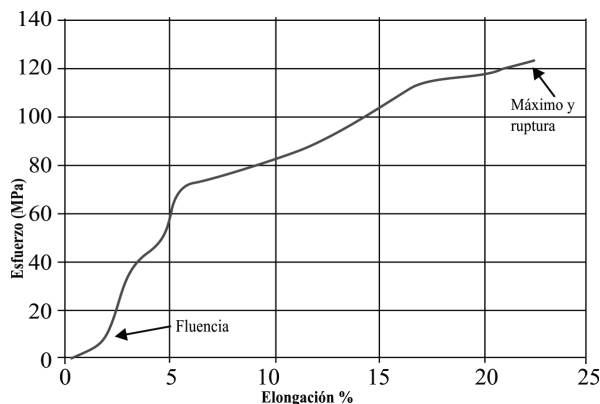


**Figura 5c.** Muestra tipo de plástico proveniente de envase de leche.

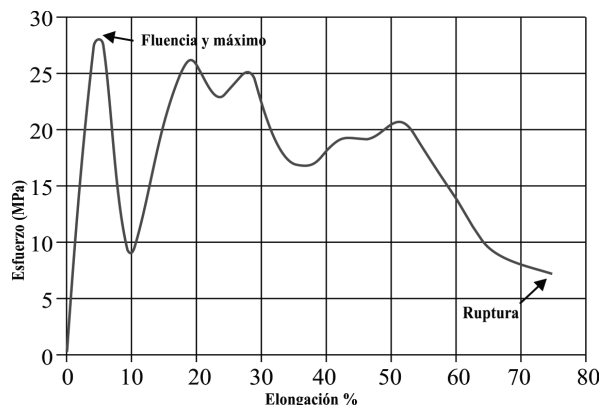
Una caracterización mecánica que demuestra el comportamiento de un material, es el gráfico esfuerzo-elongación. Con el cual se puede conocer propiedades importantes como: el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo último, además de la capacidad de deformación. Las Figuras 6a, 6b y 6c, muestran los resultados de los ensayos efectuados de cada uno de los especímenes tipo, donde los valores de esfuerzo y elongación corresponden a los promedios de las muestras ensayadas BA, BH<sub>2</sub>O, y BL.



**Figura 6a.** Gráfico esfuerzo-elongación promedio para muestras de plástico proveniente de envase para aderezos.



**Figura 6b.** Gráfico esfuerzo-elongación promedio para muestras de plástico proveniente de envase para agua.



**Figura 6c.** Gráfico esfuerzo-elongación promedio para muestras de plástico proveniente de envase para leche.

Las Figuras 6a, 6b y 6c, denotan una mayor capacidad de elongación de las muestras de las botellas de leche y aderezo en comparación con las de agua. Las primeras alcanzaron una elongación de 75% y 71.8% respectivamente, mientras que las de agua 22%. Así mismo, la mayor rigidez se observó en las muestras de leche, este parámetro fue valorado con el módulo de elasticidad, con un valor de 602.8 MPa; seguido por las botellas de aderezo con una reducción en su valor del módulo de elasticidad de 1% y las botellas de agua con una disminución de 20.7% (todas en referencia con las botellas de leche).

Por otra parte, el plástico de botellas de leche generó un comportamiento que difiere de las otras, mientras que las muestras de plástico de aderezo y agua su carga va aumentando hasta alcanzar su valor máximo y a la misma vez su ruptura, en las de leche tiene una oscilación de capacidad de carga, con un máximo global y varios máximos parciales, hasta llegar a la ruptura en un valor de carga relativamente bajo.

Otro parámetro analizado fue el esfuerzo máximo que soporta cada material, en este rubro el plástico de botella de agua alcanzó 123.5 MPa, mientras que el correspondiente al de aderezo generó un 27.1% y el de leche un 77.1% menor que el del agua. Estos efectos son atribuidos a las propiedades intrínsecas que presenta el plástico. La Tabla 1 muestra una comparación de los resultados de los experimentos.

**Tabla 1.** Resultados de los experimentos de los ensayos en diferentes plásticos producto de residuos urbanos.

Material	E	σ	ε	σ	ε	σ	ε
		Fluencia		Máximo		Ruptura	
	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%
BA	597	24	4	90	72	90	72
BH <sub>2</sub> O	478	8	2	124	22	124	23
BL	603	25	28	28	5	7	75

E= Módulo de elasticidad σ = Esfuerzo normal ε = Elongación



Como referencia de resistencia del plástico, se ha reportado que el nylon tiene una resistencia máxima de 40 a 80 MPa, mientras que el polipropileno de 7 a 28 MPa [16]. Aunque existen datos básicos del comportamiento mecánico de los plásticos, existe escasa información documentada donde se muestren el comportamiento de los materiales plásticos utilizados en productos comerciales.

### Conclusión

En la presente investigación se analizó el comportamiento mecánico de plásticos provenientes de residuos urbanos. Con el propósito de estudiar materiales comunes, se emplearon botellas para aderezo, de agua y de leche, las cuales fueron cortadas y calibradas para ser sometidas a tensión.

De acuerdo a los resultados a tensión en los tres plásticos, el comportamiento no es igual. En el plástico utilizado para leche, su capacidad de elongación fue mayor que el correspondiente a los plásticos para agua y aderezo; pero su resistencia también fue menor.

Otra diferencia detectada en el comportamiento mecánico, es la falla que se presentó en los materiales; mientras que en los plásticos para agua y aderezo su falla fue bajo esfuerzos normales, en la de leche se presentó bajo esfuerzos cortantes; este concepto se dedujo bajo el criterio de la teoría de Mohr.

El estudio de las propiedades mecánicas de los materiales reciclados es importante, sobre todo cuando estos se desean reutilizar para reforzar un material y conformar un material compuesto.

El presente estudio se realizó considerando que el plástico analizado tiene un comportamiento isotrópico, es decir que sus propiedades mecánicas son iguales en todas sus direcciones. Futuras investigaciones, pueden requerir de un análisis con un tratamiento anisotrópico.

### Agradecimientos

Se agradece al TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, por su apoyo en la Convocatoria Fomento a la Investigación 2017, en el proyecto “Fibras de plástico producto de residuos urbanos para reforzar el concreto”. De la misma forma se agradece a la Universidad Tecnológica de Aguascalientes por dar las facilidades en parte de las campañas experimentales de la investigación.

### Referencias

- [1] Siddique, R.; Khatib, J.; Kaur, I., (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Material*, vol. 28, pg. 1835-1852.
- [2] Arabani, M. and Pedram, M., (2016). “Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottle”. *Construction and Building Materials*, vol. 116, pg. 378-383.
- [3] Mansour, A.; Mansour, H.; Ali, S., (2015). “Reusing waste plastic bottles as an alternative sustainable building materials”. *Energy for Sustainable Development*, vol. 24, pg. 79-85.
- [4] Dutta, S.; Nadaf, M. B.; Mandal, J.N., (2016). “An overview on the use of waste plastic bottles and fly ash in civil engineering applications”. *Procedia Enviromental Sciences*, vol. 35, pg. 681-691.
- [5] Mastali, M.; Dalvand, A.; Sattarifard, A., (2017). “The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages”. *Composites Part B*, vol. 112, pg. 74-92.
- [6] Borg, R. P.; Baldacchino, O.; Ferrara, L., (2016). “Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete”. *Construction and Building Materials*, vol. 108, pg. 29-47.
- [7] Gu, L. and Ozbakkaloglu, T., (2016). “Use of recycled plastic in concrete: a critical review”. *Waste Management*, vol. 51, pg. 19-42.
- [8] Castells, E.; (2012). “Clasificación y gestión de residuos”. Colección Monografías. Editorial Díaz de Santos, España.
- [9] Cabildo, M. et, al.; (2010). *Reciclado y tratamiento de residuos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, España.
- [10] Pardavé, W.; (2007). *Estrategias ambientales de las 3R a las 10R*. Colección Textos Universitarios, CEP, Colombia.
- [11] Gutiérrez C. y Cánovas C.; (2009). *La actuación frente al cambio climático*. Universidad de Murcia, Edit. Um, España.
- [12] Pesic, N.; Zivanovic, S.; Garcia, R.; Papastergiou, P., (2016). “Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres”. *Construction and Building Materials*, vol. 115, pg. 362-370.

- [13] Turku, I.; Keskisaari, A.; Karki, T.; Puurtinen, A.; Marttila, P., (2017). "Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends". *Composite Structures*, vol. 161, pg. 469-476.
- [14] Elzubair, A.; Miguez, J., (2012). "Mechanical behavior of recycled polyethylene/piassava fiber composites". *Materials Science & Engineering A*, vol. 557, pg. 29-35.
- [15] Fitzgerald, R. W., (1996), *Mecánica de materiales*, Ed. Alfaomega, Worcester Polytechnic Institute.
- [16] Mott, R. L., (1992), *Diseño de elementos de máquinas*, Ed. Prentice Hall, México.
- [17] Gere, J. M., (2002), *Mecánica de materiales*, Ed. Thomson Learning, México.

**Recibido:** 15 de agosto de 2017

**Aceptado:** 15 de noviembre de 2017