

Comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato (PET) y sus aplicaciones geotécnicas

Mechanical behavior of polyethylene terephthalate (PET) and geotechnical applications

Eduardo Botero Jaramillo, Liliana Muñoz, Alexandra Ossa, Miguel P. Romo*

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Ed. 4-105 Coyoacán. CP. 04510. México D.F, México.

(Recibido el 17 de junio de 2013. Aceptado el 23 de enero de 2014)

Resumen

Durante los últimos años la producción de residuos sólidos ha aumentado significativamente, causando problemas de salud y medio ambiente. Con el fin de plantear una alternativa para mitigar estos problemas, se investiga la reutilización de los envases de Polietileno-Tereftalato (PET) como una sustitución de materiales ligeros convencionales utilizados en la nivelación o reemplazo de suelo.

Para ello, se llevó a cabo una caracterización mecánica de los envases de PET más populares en el mercado de forma individual y grupal. Los resultados de las pruebas de compresión indican que los envases de PET exhiben resistencias de compresión que sugieren que estos se pueden aprovechar en la construcción de estructuras ligeras.

----- *Palabras clave:* Polietileno Tereftalato, obras geotécnicas, reducción del impacto ambiental, Tezontle

Abstract

During the last years solid waste disposal has increasing significantly, causing health and environmental problems. In order to study an alternative to mitigate these problems, the re-use of polyethylene- terephthalate bottles as a replacement of conventional lightweight materials used on the leveling or filling of soils is investigated.

For this purpose, a mechanical characterization of the PET most popular bottles on the market was carried out. Laboratory test results indicate that PET bottles exhibit compression resistances, which suggest that this material can be used on the construction of lightweight structures.

----- *Keywords:* Polyethylene terephthalate, geotechnical structures, environmental impact reduction, Tezontle

* Autor de correspondencia: teléfono: + 52 + 55 + 56233600 ext. 8462, correo electrónico: eboj@pumas.iingen.unam.mx (E. Botero)

Introducción

Los residuos sólidos no biodegradables han presentado un incremento considerable en las últimas décadas debido a la creciente fabricación de productos para satisfacer las nuevas demandas del mercado y un cada vez menor ciclo de vida de los artículos de consumo, lo que conlleva a la acumulación de grandes volúmenes de desechos en corto tiempo. En el caso particular de México los residuos sólidos urbanos no han recibido la atención adecuada debido a una serie de factores de diversa índole como son: recolección de la basura mezclada (en el 95% del territorio nacional), servicios públicos de recolección insuficientes e ineficientes, escasa coordinación entre los distintos niveles de gobierno, falta de interés por las dependencias a cargo debido a la burocracia y carencia de preparación de los funcionarios responsables, políticas de corto plazo o inexistentes, pasividad en materia ecológica, escasa a nula cultura del reciclaje en la sociedad, y finalmente dependencia de los precios internacionales de los residuos que sirven de materia prima [1].

En México cada año se generan alrededor de 40 millones de toneladas de residuos. Específicamente en la ciudad de México (en 2010), se reporta una producción diaria de 12,513 toneladas de basura, aproximadamente, lo que significa que cada habitante produce cerca de 1.43 kilos de residuos sólidos, los cuales terminan en algunos rellenos sanitarios y en otros casos en depósitos a cielo abierto. Según cifras de la Secretaría de Desarrollo Social [2], en cuatro décadas la generación de residuos sólidos urbanos, en México, se incrementó nueve veces y su composición cambió de mayoritariamente orgánica, fácilmente integrable a los ciclos de la naturaleza, a múltiples elementos, cuya descomposición es lenta y requiere procesos complementarios para efectuarse. Lo cual implica la necesidad de implementar procesos eficientes de reciclado y reúso de las materias primas y elementos no biodegradables que se incluyen en la basura. En el país, durante los últimos años la tecnología para reciclar

desechos sólidos ha evolucionado, no así las prácticas para crear incentivos para recuperarlos de manera económicamente viable. En 2008 únicamente el 3.6% de los residuos recuperables fueron reciclados, siendo el papel y cartón los principales.

Los plásticos, en general, representan el 11% de los residuos sólidos urbanos en México [3]. La industria del plástico en el país crece a una tasa superior al 7% anual, generando un consumo per cápita de 50 kg/año. En el caso concreto del PET, se tiene que es uno de los materiales más utilizados por la industria embotelladora de bebidas, debido a su durabilidad, resistencia química, bajo peso y adecuada capacidad de disipación de energía ante la aplicación de fuerzas externas, entre otras. Lo cual lo coloca como el tercer plástico más usado. En México en 2008, cada habitante consumía aproximadamente 250 botellas al año. Para 2010, el país se convirtió en el primer consumidor de agua embotellada a nivel mundial (en una parte por la publicidad y en otra por la mala calidad del agua de abasto en la mayoría de los estados del país) y en el segundo en bebidas carbonatadas (gaseosas). Finalmente, es necesario considerar que una botella de PET tarda en degradarse alrededor de 500 años [4], por lo que aún no se ha degradado el primer residuo de PET generado en el mundo.

Es importante tomar en cuenta que la reutilización de los plásticos en empresas mexicanas, como materia prima, es mínima. En la mayoría de los casos, el proceso de transformación de botellas de PET a materia prima nueva se lleva sólo hasta el triturado de las botellas [5]. Mientras que en otras regiones este tipo de plástico no presenta un impacto ambiental tan marcado, como en el caso de Europa donde el PET es el polímero de mayor reciclaje [6].

En esta investigación, se propone el uso de grandes cantidades de envases de PET reciclado en obras civiles con el fin de soportar edificaciones livianas construidas sobre suelos blandos y como alternativa al uso de materiales resistentes ligeros usados como reemplazo, relleno y en el mejoramiento de suelos.

Uso actual del PET en la ingeniería civil

El PET es usado en la elaboración de materiales geosintéticos, para lo cual es fundido, filtrado y extruido hasta obtener fibras de poliéster de aspecto liso, con buena resistencia a la tensión y baja capacidad de absorción de agua, con las que se elaboran geotextiles de tipo no tejido y geomallas de refuerzo. Adicionalmente, el PET reciclado en forma de fibras, se usa como material de mejoramiento para concretos, asfaltos [7, 8].

Planteamiento del problema

Tomando en cuenta las propiedades mecánicas de los envases de PET, existe una alta posibilidad de reúso directo luego de su desecho debido que no son necesarios procesos complejos ni que impliquen consumos de energía significativos; además, se tiene el beneficio ambiental del reciclaje de desechos sólidos. Este trabajo estudia el comportamiento mecánico de algunos de los envases de PET más comunes en el mercado, de mayor producción y facilidad de adquisición en las diferentes zonas geográficas del país. Con el propósito de evaluar su uso en aplicaciones geotécnicas, específicamente como material ligero y resistente a utilizarse en la construcción de cimentaciones de viviendas livianas sobre suelos blandos, y como alternativa en el reemplazo y relleno de suelos, se presenta un ejemplo de potencial aplicación al final de este escrito. Para la caracterización mecánica de los envases de PET, se definieron dos grupos de envases: los utilizados para el almacenamiento de agua y los empleados para agua mineral y bebidas carbonatadas. Posteriormente, a estos dos grupos de envases, se le realizaron pruebas de compresión no confinada (figura 1), tomando en cuenta la condición de envase vacío y envase lleno con bolsas de polietileno comúnmente usadas en las tiendas de autoservicio. Aquellos envases de producción masiva y que presentaron mejores características de resistencia, se conformaron en diferentes arreglos y se les

realizaron pruebas de compresión no confinada similares a las efectuadas para la condición de envase individual (Figura 2). Cabe mencionar que para cada condición evaluada se realizaron de tres a cinco pruebas conforme a la disponibilidad del PET respectivo (en este artículo se presentan los valores medios), por lo cual más de doscientos envases fueron ensayados.



Figura 1 Prueba de un envase individual

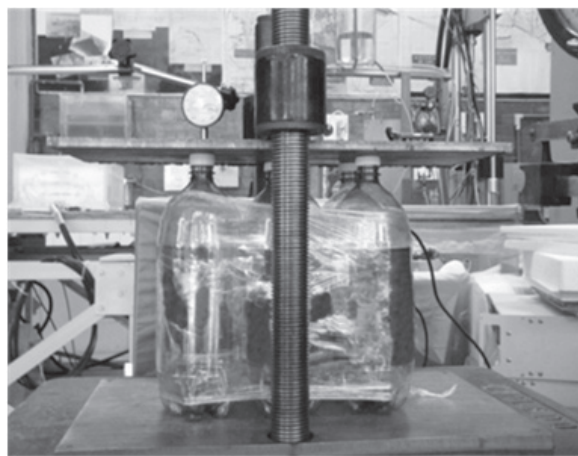


Figura 2 Prueba de un grupo de envases

Análisis de resultados

Inicialmente, los resultados se presentan para todos los tipos de envases ensayados de forma individual seleccionándose los que presentan mayor resistencia a la compresión y posteriormente con estos se realizan ensayos en grupos. Los parámetros mecánicos a analizar se relacionan con la resistencia a la compresión simple y la deformación [9].

Arreglo Individual

En la tabla 1 se presentan los resultados de las pruebas de compresión no confinada realizada sobre envases individuales de PET para almacenar agua, bebidas carbonatadas y agua mineral, vacíos. Se muestra en negrillas el grupo de envases con mayor resistencia a la compresión, y con los cuales se realizan los análisis adicionales necesarios para la su caracterización mecánica.

Tabla 1 Resultados de la pruebas para la condición de envase vacío

<i>Referencia</i>	<i>Envase</i>	<i>Volumen cm³</i>	<i>Carga máxima N</i>	<i>Desplazamiento mm</i>	<i>Deformación %</i>	<i>Altura Inicial mm</i>
E1	Agua T1	1.500	144,5	1,65	0,4939	335
E2	Agua T2	1.500	80,25	2,66	0,7933	335
E3	Agua T3	1.500	106,14	6,05	1,8057	335
E4	Agua T4	1.500	62,59	2,2	0,6464	340
E5	Bebida carbonatada T1	1.500	137,54	1,52	0,4606	330
E6	Bebida carbonatada T2	2.000	186,49	1,75	0,5833	300
E7	Bebida carbonatada T3	2.000	182,96	2,98	0,903	330
E8	Bebida carbonatada T4	2.000	149,01	2,12	0,6235	340
E9	Bebida carbonatada T5	2.000	75,73	1,26	0,3706	340
E10	Bebida carbonatada T6	2.000	189,33	3,31	0,9735	340
E11	Bebida carbonatada T7	2.000	191,69	3,08	0,9059	340
E12	Bebida carbonatada T8	2.000	157,45	1,93	0,5676	340
E13	Bebida carbonatada T9	2.000	183,74	2,03	0,6971	340
E14	Bebida carbonatada T10	2.000	148,82	1,61	0,4675	345
E15	Bebida carbonatada T11	2.000	173,15	2,12	0,6145	345
E16	Bebida carbonatada T12	2.000	184,82	2,08	0,5938	350
E17	Bebida carbonatada T13	2.000	244,07	2,91	0,8314	350
E18	Bebida carbonatada T14	2.500	194,04	1,55	0,4297	360
E19	Bebida carbonatada T15	2.500	235,44	2,91	0,7973	365
E20	Bebida carbonatada T16	2.500	661,39	0,84	0,2301	365
E21	Bebida carbonatada T17	2.500	177,36	1,96	0,537	365
E22	Bebida carbonatada T18	2.500	172,56	2,05	0,5616	365
E23	Bebida carbonatada T19	2.500	184,04	2,05	0,5541	370
E24	Bebida carbonatada T20	3.000	508,65	4,31	1,1972	360
E25	Bebida carbonatada T21	3.000	198,95	2,71	0,7528	360
E26	Bebida carbonatada T22	3.000	171,48	2,46	0,6833	360
E27	Bebida carbonatada T23	3.000	183,25	2,79	0,7656	365
E28	Agua mineral T1	1.750	438,61	2,38	0,7677	310
E29	Agua mineral T2	2.000	186,59	1,76	5867	300
E30	Agua mineral T3	2.000	218,37	1,81	0,5403	335
E31	Agua mineral T4	2.000	42,58	0,27	0,0783	345
E32	Agua mineral T5	2.000	219,25	2,55	0,7391	345

Envases vacíos para almacenamiento de agua

Los resultados mostrados en la tabla 1, indican que existen variaciones en la resistencia a la compresión entre los diferentes tipos de botellas ensayadas. Sin embargo, en términos generales se observa que las resistencias a la compresión de los cuatro tipos de envases utilizados para el almacenamiento de agua, son menores que las presentadas por los envases utilizados para las bebidas carbonatadas y el agua mineral. En la figura 3 se presenta la curva carga-desplazamiento típica de los envases de agua, vacíos y tapados. Esta curva carga-desplazamiento se divide en tres zonas. En la primera zona se presenta un comportamiento elástico lineal hasta alcanzar deformaciones del orden de 1,69%. Este valor se definió con base en los resultados de pruebas de carga-descarga que mostraron deformación permanente nula al ser descargado el envase. Los valores de deformación elástica dependen principalmente de la densidad del material y la geometría del envase (forma y grabados superficiales). En la segunda zona se presenta un comportamiento plástico y la mayor deformación registrada fue de 3,5%. Es importante considerar que mientras la tapa del envase conserve su integridad, el envase seguirá deformándose sin incremento de la fuerza axial aplicada. Durante esta etapa de deformación el aire en el interior de la botella sufre un proceso de compresión hasta que alcanza un volumen en el cual el aire está facultado para recibir una mayor parte de la carga aplicada. En la tercera zona, se presenta un incremento en la resistencia debido a que el aire comprimido soporta los incrementos de carga adicionales. Esta tendencia continúa hasta que se alcance la falla de la pared del envase o se presente el colapso de la tapa.

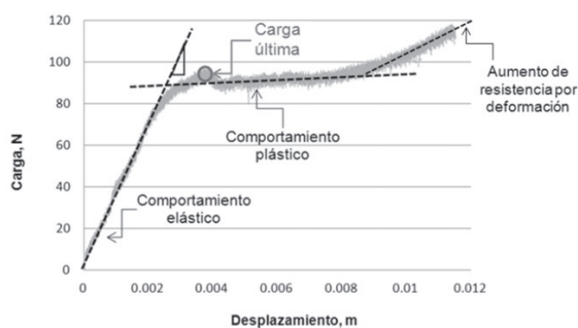


Figura 3 Comportamiento carga-desplazamiento para envases de agua

Envases vacíos para almacenamiento de bebidas carbonatadas y agua mineral

En las figuras 4 y 5 se presentan curvas carga-desplazamiento para los envases de bebida carbonatada y de agua mineral, respectivamente. Los resultados manifiestan un incremento considerable en la capacidad de carga respecto a los usados para almacenar agua. Este incremento se relaciona con el mayor espesor de las paredes, lo cual redundaría en una mayor resistencia y rigidez (diferencias en el proceso de fabricación también pueden afectar en menor medida estas propiedades). Estas características son necesarias para conservar la forma del envase, debido a la presión interna a la que se encuentran sometidas por acción del gas carbónico agregado al líquido. El incremento en la resistencia, respecto de los envases para almacenamiento de agua, es superior al 100% y en la zona elástica los desplazamientos alcanzan valores entre el 1% y el 3%. Posterior a esta zona, se presenta una zona en la cual se generan ciclos de incremento de carga y descarga, lo cual se puede deber al grabado superficial, a la geometría en sí de los envases y a las condiciones de frontera en los ensayos. Por otra parte, los resultados de resistencia a la compresión de estos dos grupos de envases (ver tabla 1) indican que aquellos de mayor altura, presentan más alta resistencia a la compresión debido a que las paredes son de mayor espesor. El subgrupo de envases referenciados como E17, E19, E20,

E24, E25, E28, E30, E32, mostró los mayores valores de la relación Carga máxima / Peso del envase por lo que podrán ser potencialmente más adecuados para su uso como material aligerante de alta resistencia (ver tabla 2). Cabe mencionar, que los envases de los subgrupos E17, E20, E24, y E25 fueron excluidos por ser envases destinados

a un segmento limitado de consumidores debido al mayor costo del producto que almacenan. De esta manera, el subgrupo de envases de mayor resistencia se reduce a los subgrupos E19, E28, E30 y E32, siendo los tres últimos de consumo popular masivo.

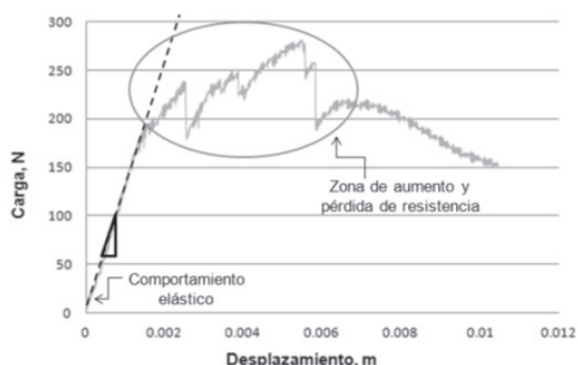


Figura 4 Envase de bebida carbonatada

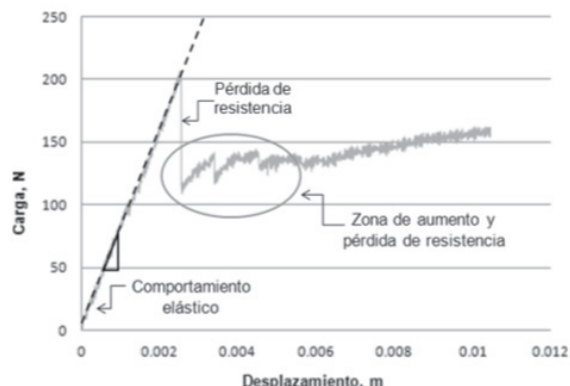


Figura 5 Envase de agua mineral

Tabla 2 Relación peso-resistencia

Referencia	Envase	Volumen cm ³	Carga máxima N	Peso N	Carga/Peso
E9	Refresco	3.000	508,65	0,63	814,4
E17	Agua mineral	1.750	438,61	0,55	803,7
E23	Refresco	2.500	661,39	1,29	513,0
E12	Refresco	2.000	244,07	0,48	504,7
E15	Agua mineral	2.000	218,37	0,50	436,7
E22	Refresco	2.000	235,44	0,55	429,6
E16	Agua mineral	2.000	219,25	0,55	402,1
E24	Refresco	3.000	198,95	0,58	352,2

Envases rellenos con bolsas de polietileno

Los grupos de envases E19, E28, E30 y E32 se llenaron con bolsas de polietileno y se compactaron en su interior, mediante una metodología definida

previamente en el laboratorio, con el fin de evaluar su aporte a la resistencia a la compresión. En la tabla 3, se presentan estos resultados, los cuales indican que la resistencia a la compresión presenta incrementos entre 16% (E28) y 140% (E32).

Tabla 3 Resistencia envases rellenos vs envases vacíos

Referencia	Envase	Volumen	Envases vacíos		Envases rellenos		Diferencia		Incremento	
			Carga máxima	Peso	Carga máxima	Peso	Carga máxima	Peso	Carga máxima	Peso
		cm ³	N	N	N	N	N	N	%	%
E22	Refresco	2.500	235,4	0,549	330,8	3,630	95,4	3,080	40,5	568,3
E16	Agua mineral	2.000	219,3	0,549	527,8	3,345	308,5	2,806	140,7	515,5
E17	Agua mineral	1.750	438,6	0,549	511,0	3,277	72,4	2,727	16,5	501,1
E15	Agua mineral	2.000	218,4	0,500	409,4	3,365	191,0	2,865	87,5	572,9

Tabla 4 Deformaciones en la carga máxima para envases vacíos vs llenos de bolsas de polietileno

Referencia	Envase	Altura inicial mm	Deformación en la carga última			
			Envases vacíos		Envases rellenos	
			mm	%	mm	%
E19	Bebida carbonatada	365,0	2,91	0,80	3,70	1,01
E28	Agua mineral	310,0	2,38	0,77	2,47	0,80
E30	Agua mineral	335,0	1,81	0,54	2,79	0,83
E32	Agua mineral	345,0	2,55	0,74	4,27	1,24

Al analizar las deformaciones que experimentan los envases vacíos y los llenos de bolsas de polietileno, se observa que los últimos presentaron un incremento en su deformación máxima hasta de un 68% con respecto a los primeros (ver tabla 4).

Sí bien los envases llenos de bolsas de polietileno son más deformables que los envases vacíos, las deformaciones a la falla son bajas, del orden del 1,24 % y se consideran aceptables para el caso en que se utilicen los envases como material de relleno sobre el cual se cimentarán estructuras ligeras. Cabe mencionar, que la condición de envase lleno presenta resistencias muchos mayores que la que alcanzan los envases vacíos lo cual puede justificar su uso. Algunas desventajas en el uso de envases llenos con bolsas consisten en que el proceso de llenado de las botellas es un trabajo dispendioso que debe hacerse de forma individual y cuidadosa de tal manera que se logre una compactación adecuada de las bolsas. Es necesario anotar que se consideró como posible material de relleno a las perlas de polietileno expandido por ser ultraligero, no biodegradable

y de sencilla colocación al interior del envase sin embargo, el procedimiento de compactación presentó serias limitaciones al momento de intentar obtener repetibilidad en el proceso y la ganancia en resistencia no es importante.

Arreglo de envases con distintas configuraciones

Para las pruebas de los envases en grupo y en diferentes arreglos, se coloca una placa metálica de 9,80 kg y dimensiones efectivas 0,26 x 0,23 x 0,02 m, para distribuir uniformemente la carga aplicada con la prensa (Fig. 2). El área efectiva (0.06m²) se considera como el rectángulo conformado por el borde exterior del cuerpo de los seis envases. Se ensayaron dos configuraciones de grupos de 6 envases vacíos tipo E19, E28, E30 y E32, los cuales se unen de una manera similar a la que tendrían los envases al momento de ser usados como solución en una cimentación. Esto se hace por medio de una membrana plástica, la cual se aplica siguiendo una metodología previamente determinada. Se reportan los resultados de las dos configuraciones que presentaron mejor respuesta.

Configuración 1

En la Figura 6 se muestra el arreglo en el cual los envases se encuentran colocados hacia arriba (con la tapa en la parte superior). En la tabla 5 se observa que el grupo de envases E28 es el que presenta mayor resistencia a la compresión ($31,086 \text{ N/m}^2$) con una deformación máxima de 0,84% de la altura inicial. Para el tipo de envases E19 se tiene una carga máxima de compresión de $24,000 \text{ N/m}^2$ y una deformación de 1,85% respecto de su altura original.



Figura 6 Arreglo de envases 1, vista frontal y superior, distribución uniforme

Tabla 5 Resultados pruebas de compresión arreglo de 6 envases ², Configuración 1

Referencia	Envase	Carga máxima	Altura inicial	Deformación a la carga máxima	
		N	mm	mm	%
E19	Bebida carbonatada	1.440,1	365	6,47	1,85
E28	Agua mineral	1.865,2	310	2,63	0,84
E30	Agua mineral	1.522,0	335	4,30	1,28
E32	Agua mineral	1.371,4	345	5,10	1,47

Configuración 2

En la Figura 7 se presenta el arreglo en el cual los envases de los extremos se encuentran colocados hacia arriba y los de la mitad hacia abajo. Con esta configuración, sólo se ensayaron envases del tipo E19 debido a que presentan una resistencia individual y en grupo significativa, además de ser del tipo envase de mayor consumo y facilidad de recolección dentro de la población estudiada. Como se puede observar en la tabla 6, la carga máxima resistida por el conjunto de botellas disminuye 20,44% y la deformación aumenta

18.77% con respecto a los resultados presentados bajo la Configuración 1, lo que indica que esta última configuración es adecuada para el arreglo de 6 botellas.



Figura 7 Arreglo de envases 2, vista frontal y superior, distribución mixta

Tabla 6 Resultados de la Configuración 2

Referencia	Envase	Configuración	Carga máxima	Altura inicial	Deformación a la carga máxima	
			N	mm	mm	%
E19	Bebida carbonatada	1	1.440,1	365	6.76	1,85
		2	1.145,8		8.03	2,2

Resistencia después de la falla

A un grupo de seis envases (tipo E19, Configuración 1), se les realizaron tres pruebas adicionales de carga y descarga a esfuerzo controlado, hasta alcanzar en cada una de ellas la deformación a la carga máxima del primer ciclo, con la finalidad de estudiar la degradación de la resistencia del conjunto después de su falla. Se define como condición de falla al estado de esfuerzos y deformaciones que ocurren en el arreglo de 6 botellas luego que se supera la carga máxima. En la tabla 7, se reportan los resultados obtenidos y se puede observar que en el primer ciclo de carga se presentó la mayor resistencia a la compresión. Posteriormente (ciclo 2), la resistencia alcanza el 73,94% de la resistencia inicial. En el ciclo 3 el 80,80% y en el 4 el 63,65%.

Tabla 7 Degradación de la resistencia por repetición de carga

Ciclo de carga	1	2	3	4
Carga máxima, N	1.328,9	1.057,5	1.155,6	910,3

Velocidad de aplicación de carga

Se realizaron ensayos para envases tipo E19 en Configuración 1 utilizando diferentes velocidades de aplicación de carga, que asemejaran condiciones de uso preestablecidas. Los resultados (tabla 8) muestran que la resistencia a la compresión de los envases de PET aumenta en la medida que es mayor la velocidad de aplicación de carga. La velocidad en la que los envases presentaron una mayor deformación fue de 0,055 mm/s y la menor deformación a 0,046 mm/s. Es importante considerar que la velocidad de aplicación influyó en una disminución de hasta 22% en la resistencia máxima del mismo envase.

Tabla 8 Resultados de la Configuración 1

Velocidad mm/s	Carga máxima N	Altura inicial mm	Deformación a la carga máxima	
			mm	%
0,074	1.440,1	365	6,77	1,85
0,055	1.324,3	365	9,82	1,69
0,046	1.197,3	365	4,36	1,19
0,024	1.131,0	365	4,59	1,25

Efectos de carga sostenida en el tiempo (creep)

El fenómeno de deformación por fluencia lenta (creep) se asocia al incremento en la deformación que presenta un material viscoelástico a través del tiempo cuando es sometido a una carga constante. Los resultados de la prueba de creep se presentan en la figura 8. En ésta se puede observar la evolución de las deformaciones en el envase a lo largo de un período de 32 días sometido a una carga constante de 196,2 N.

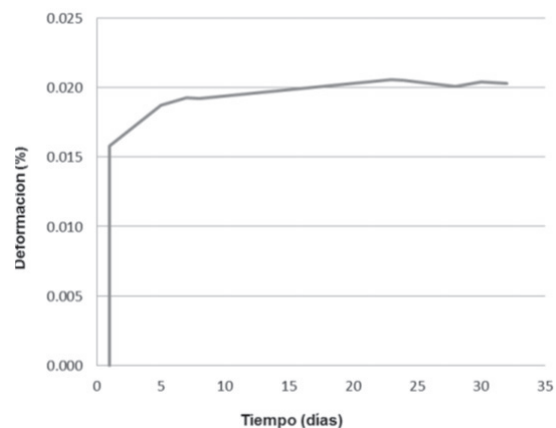


Figura 8 Resultados del ensaye de creep

Al inicio de la prueba se produjeron deformaciones instantáneas del orden de 1,58%, las cuales se encuentran dentro del rango elástico determinado por medio de las pruebas (carga y descarga) de compresión simple. Posteriormente, conforme transcurre el tiempo la tasa de deformación disminuye estabilizándose en una deformación de aproximadamente $\pm 0.2\%$ de la altura del envase. Dicha estabilización se presenta a partir del día 23 de la prueba. Lo cual permite plantear dos alternativas al momento de montar una estructura sobre un lecho de envases de PET.

La primera tiene que ver con la secuencia del proceso constructivo en el cual se garantice una deformación uniforme de los envases, evitando los asentamientos diferenciales. La segunda con la aplicación de una precarga equivalente al peso de la edificación, y cuando se estime que la deformación por creep se ha estabilizado, proceder a retirar la precarga y montar la estructura.

Aplicación de los envases de PET a un problema geotécnico en el Valle de México

Se propone un caso de aplicación enfocado al reemplazo del Tezontle como material de sustitución, relleno y nivelación de terrenos irregulares y/o de baja capacidad de carga [10-13], en un sitio donde se construirá un número considerable de casas de habitación, del tipo de las mostradas en la figura 9, sobre un depósito de suelo altamente compresible, situación que vulnera la estabilidad de las casas debido a los asentamientos diferenciales que podrían presentarse en la zona construida y a la baja capacidad de carga de dicho estrato. Es necesario considerar que el Tezontle es una roca de origen volcánico, muy porosa y en algunas ocasiones de menor peso volumétrico que el agua. En la actualidad los bancos para la explotación de Tezontle de bajo peso volumétrico cercanos al Valle de México están casi agotados. Por lo cual, el Tezontle comercial se encuentra en la actualidad con pesos volumétricos de 1.200 kg/m^3 a 1.600 kg/m^3 . En este caso se analizará la restitución y nivelación de los 40 cm iniciales de suelo, en un conjunto de casas de un piso. Se presenta el análisis para una sola de las casas. En las figuras 10a y 10b se muestra la planta y la distribución de los envases en la cimentación. El terreno de cada casa es rectangular de $7 \times 15 \text{ m}$ (área 105 m^2), figura 10a. En esta área se pueden acomodar aproximadamente 10.500 envases (figura 10b). Estos se colocan sobre una plantilla de nivelación a base de un concreto pobre, confinados por el terreno natural y en su parte superior recibirán la losa que conforma el piso de la casa (figura 11).



Figura 9 Ejemplo de casas de habitación en las cuales se podría usar los envases de PET en su cimentación

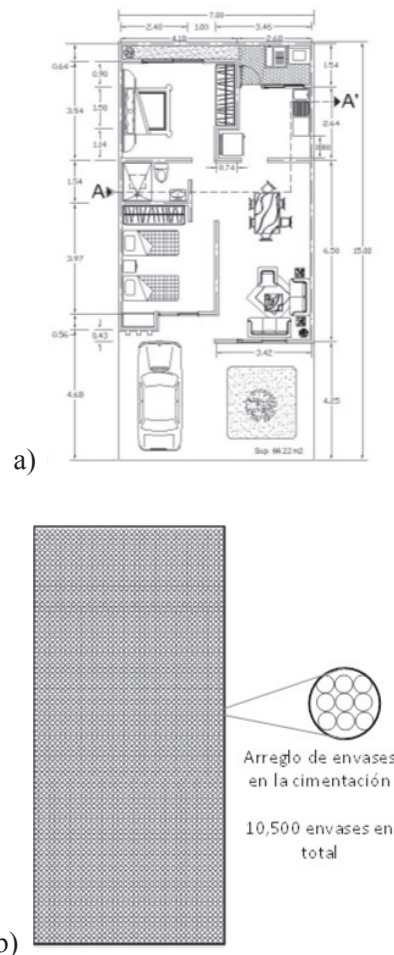


Figura 10 a) Planta de la vivienda analizada y b) distribución de los envases en la cimentación

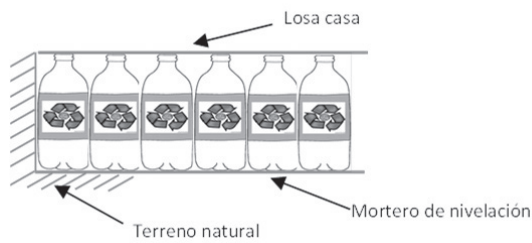


Figura 11 Corte esquemático de la colocación de los envases de PET

El peso de los envases de PET que se utilizarán para restituir y nivelar el material sobre el cual se apoyará la cimentación de la vivienda es de $5,5 \text{ kg/m}^2$. Mientras el peso del Tezontle para los mismos fines (asumiendo un peso volumétrico de 1.200 kg/m^3) es de 480 kg/m^2 . Para evaluar la influencia, en particular, de cada uno de estos materiales en los asentamientos por consolidación que experimentaría el depósito de suelo debido a la construcción de las viviendas, se utilizó la ecuación (1), la cual se basa en la Teoría de Terzaghi [14, 5]:

$$\delta = \Delta H m_v D\sigma \quad (1)$$

Dónde: δ deformación del suelo, ΔH espesor del estrato compresible, m_v módulo de compresibilidad volumétrica y $D\sigma$ esfuerzo inducido al suelo. Se consideró un valor de m_v de $0.35 \text{ cm}^2/\text{kg}$ el cual corresponde a valores típicos de arcillas normalmente consolidadas del lago de Texcoco ubicado al nororiente de la Ciudad de México. Nótese que la expresión 1 no toma en cuenta la consolidación secundaria de la arcilla, por lo que la comparación que se presenta adelante sólo considera los asentamientos por consolidación primaria contra los asentamientos debidos a la deformación del PET. De igual manera, los efectos potenciales de deformación por creep del PET (los cuales, para el nivel de esfuerzo serían mínimos) no se incluyen en el cálculo correspondiente. Una vez evaluada la ecuación 1 se encontró, que los asentamientos por consolidación que generaría

la restitución de $0,40 \text{ m}$ de suelo por envases de PET sería del orden de $1,925 \times 10^{-4}$ veces el espesor del estrato compresible, mientras que los asentamientos que se generarían al utilizar una restitución de Tezontle sería de $0,0168$ veces el espesor del de dicho estrato. Lo anterior, indica que el uso de Tezontle incrementa en un 87% los asentamientos a presentarse en el sitio sólo por efecto de la restitución del suelo. En cuanto a la carga que deberá soportar el grupo de envases, se determinan las cargas vivas y muertas (con los diferentes materiales considerados) para la casa y se relacionan con la capacidad de carga por m^2 de los cuatro tipos de envases. Se define como carga límite, el 80% de la resistencia máxima del grupo de envases (tabla 9).

Finalmente, se calcula la carga total de acuerdo a los diferentes materiales comunes en este tipo de edificaciones (tabla 10).

Para la Opción 1, la casa es construida con materiales tradicionales (tabiques, losa de concreto, trabes y castillos). En la opción 2, se utiliza para la losa de azotea el elemento denominado comercialmente como losa-cero (lámina de $2''$ de calibre 22 con un espesor de 10 centímetros). Los muros, castillos y trabes son idénticos al caso anterior. Para la opción 3 se utilizan los mismos materiales del caso anterior pero se cambió a una losa aligerada con casetones de poliestireno expandido (EPS). La opción 4 utiliza algunos de los materiales de la opción 3, pero los muros y la losa de azotea se conformaron mediante multipáneles. Finalmente la opción 5 utiliza panel W en la losa de azotea y en los muros. Este tipo de panel está formado por una estructura tridimensional de alambre de acero de alta resistencia y un núcleo de barras poligonales de poliuretano o poliestireno, recubriéndose la estructura con concreto. Los paneles que se utilizan para muros estructurales y losas de azotea tienen un espesor de $2''$, $3''$ y $4 \frac{1}{2}''$. Los demás elementos de cálculo son iguales a los de la opción 4 (losa de planta, castillos y trabes).

Tabla 9 Datos para el diseño

<i>Referencia</i>	<i>Envase</i>	<i>Resistencia límite N/m²</i>	<i>Resistencia para diseño N/m²</i>
E19	Bebida carbonatada	24.000	19.201
E28	Agua mineral	31.086	24.869
E30	Agua mineral	25.366	20.293
E32	Agua mineral	22.857	18.285

Tabla 10 Opciones analizadas

<i>Elemento</i>	<i>Peso, en N/m²</i>				
	<i>Opción 1</i>	<i>Opción 2</i>	<i>Opción 3</i>	<i>Opción 4</i>	<i>Opción 5</i>
Losa de azotea	4.365	3.737	3.417	1.789	2.844
Losa de planta	4.914	4.512	4.512	4.512	4.513
Muro	1.858	1.858	1.858	91	882
Columnas 0.14x0.14m	513	513	513	513	513
Trabes 0.14x0.14m	241	241	241	241	241
Carga total	11.891	10.861	10.541	7.146	8.993

Debido a que los valores de cargas transmitidas por la construcción de las viviendas (opciones 1 a 5), mostrados en la tabla 10, son menores que las resistencias máximas presentadas por los grupos de envases indicados en la tabla 9, se considera que la opción de utilizar dichos envases en la restitución y nivelación de suelos sobre los que se apoyará la cimentación de las casas es viable, incluso este material podría utilizarse de manera similar a la anteriormente expuesta para el caso de viviendas de dos pisos.

Es importante considerar que en los análisis efectuados no se toma en cuenta el aspecto sísmico. Por lo tanto, además de la reducción significativa del peso de la vivienda a lo largo de las cinco opciones, se tendrán que considerar que las características de rigidez e inercia sean adecuadas para la zona sísmica en la que vayan a estar ubicadas. Otro aspecto que se debe de considerar es que el recinto donde se coloquen los envases debe estar totalmente aislado del nivel freático y sellado en su parte posterior para evitar la filtración de agua de lluvia.

Conclusiones

Los envases de PET representan una alternativa potencial para su uso como material de reemplazo, aligeramiento y nivelación en áreas extensas que vayan a ser utilizadas para construcciones livianas.

La resistencia química del PET ante la acción de agentes externos promedio, hacen que su durabilidad supere en gran medida la vida útil de la vivienda que se construya sobre ellos.

Esta es una alternativa para uso a gran escala de importantes cantidades de envases de PET, que contribuye a crear conciencia de su reúso y la necesidad de la existencia de canales adecuados de recolección de material para reciclar.

Cuando se usa Tezontle como material de restitución pueden presentarse variaciones significativas en el esfuerzo transmitido al suelo debido a diferencias en el peso volumétrico asociado con su origen natural, y a deficiencias en el proceso de colocación en el cual se pueden conformar zonas de mayor concentración de Tezontle. Al contrario de lo que puede ocurrir

con los envases de PET, los cuales al provenir de un proceso industrial su peso volumétrico es controlado por lo tanto, al ser un elemento de dimensiones y geometría definidas su distribución de carga aportada por la vivienda, es totalmente uniforme.

Agradecimientos

Se agradece a la DGPA de la Universidad Nacional Autónoma de México por el invaluable apoyo para la realización de esta investigación mediante el proyecto PAPIIT TB100212.

Referencias

1. L. Siliceo. *Propuesta de empresa de reciclaje de plástico en el sector de envase y embalaje en Puebla*. Tesis. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México. 2004. pp. 15-22.
2. J. Careaga. *Manejo y Reciclaje de los Residuos de Envases y Embalajes* (Serie Monografías 4) Ed. Sedesol. Instituto Nacional de Ecología. México D.F., México. 1993. pp. 6.
3. SEMARNAT. *El Medio Ambiente en México en resumen*. Gobierno Federal. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. México D.F., México. 2009. pp. 48.
4. DPASR Dirección de Proyectos de Agua, Suelo y Residuos. *El PET y su situación actual en el Distrito Federal*. Secretaría del Medio Ambiente. México DF., México. 2001. pp. 20.
5. E. Juárez, A. Rico. *Mecánica de suelos*. Tomo I. 1ª ed. Ed. Limusa. México D.F., México. 1974. pp. 642.
6. N. Torres, J. Robin, B. Boutenvin. "Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled polyethylene terephthalate before and after injection molding." *Elsevier. European Polymer Journal*. Vol. 36. 2000. pp. 2075-2080.
7. M. Juárez, M. Santiago, J. Vera. "Estudio de Factibilidad para la Manufactura de Empuñaduras de Pet Reciclado". *e-Gnosis*. Vol. 9. 2011. pp. 1-12.
8. H. Rondón, E. Rodríguez, L. Moreno. "Resistencia Mecánica Evaluada en el Ensayo Marshall de Mezclas Densas en Caliente Elaboradas con Asfaltos Modificados con Desechos de Policloruro de Vinilo (Pvc), Polietileno de Alta Densidad (Pead) y Poliestireno (Ps)". *Revista Ingenierías, Universidad de Medellín*. Vol. 6. 2007. pp. 91-104.
9. L. Muñoz. *Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) como Material de Restitución en Suelos de Baja Capacidad de Carga*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México DF., México. 2012. pp. 54-98.
10. L. Aguirre, M. Zarate. *Problematic of Geotechnical Performance of the Mexico City International Airport Runways Built on Ancient Texcoco Lake*. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, USA. 1985. pp. 2381-2384.
11. L. Aguirre, E. Juárez, M. Zarate. *Geotechnical Problems in Designing an Apron on Ancient Texcoco Lake*. Memoria del Simposio Internacional de Ingeniería Geotécnica de Suelos Blando. México DF., México. 1987. pp. 181-184.
12. Geosol S.A. Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. *Viabilidad desde el Punto de Vista Geotécnico de la Alternativa Texcoco-Caracol*. Informe. México DF., México. 2001. pp. 20-31.
13. B. Sherwell. *Estudio del Uso del Polietileno Tereftalato (PET) como Material de Refuerzo de Estructuras Têrreas Conformadas con Suelo Fino*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México DF., México. 2013. pp. 7-19.
14. K. Terzaghi. *Theoretical soil mechanics*. 3rd ed. Ed. John Wiley and Sons. New York, USA. 1965. pp. 265-296.