



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DEL USO DEL POLIETILENO TEREF TALATO
(PET) COMO MATERIAL DE RESTITUCIÓN EN SUELOS DE
BAJA CAPACIDAD DE CARGA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

LILIANA MUÑOZ PÉREZ

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO**



MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE DE 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/080/11

Señorita
LILIANA MUÑOZ PÉREZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

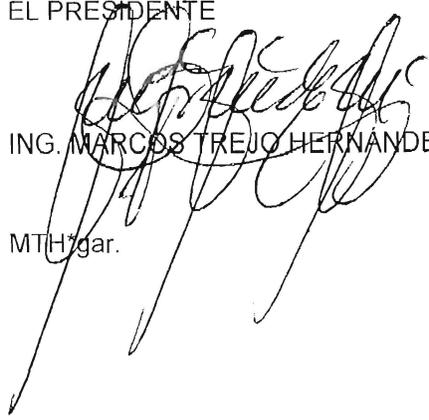
"ESTUDIO DEL USO DEL POLIETILENO TEREFALATO (PET) COMO MATERIAL DE RESTITUCIÓN EN SUELOS DE BAJA CAPACIDAD DE CARGA"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
 - II. CONCEPTOS GENERALES DEL POLIETILENO TEREFALATO (PET)
 - III. COMPORTAMIENTO BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN ESTÁTICA
 - IV. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 12 de Agosto del 2011.
EL PRESIDENTE


ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ

MTHgar.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. AMALIA ADRIANA CAFAGGI FELIX

Secretario: DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO

Vocal: M.I. ALBA BEATRIZ VAZQUEZ GONZÁLEZ

1er. Suplente: ING. HÉCTOR ALFREDO LEGORRETA CUEVAS

2do Suplente: MTRO. ALEXIS LÓPEZ MONTES

Lugar donde se realizó:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA,
UNAM

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS DEL POSGRADO DE INGENIERÍA,
UNAM

TUTOR:

Dr. Eduardo Botero Jaramillo

RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico del polietileno tereftalato (PET) bajo esfuerzos de compresión estáticos. El comportamiento es evaluado mediante pruebas de laboratorio que se llevaron a cabo a distintos envases de PET con el propósito de conocer la influencia que ejercen sobre dicho comportamiento la densidad del material (gramaje), la velocidad de desplazamiento y las distintas configuraciones utilizadas en la conformación de un grupo de envases.

En la primera etapa de la investigación se realizaron pruebas a compresión estática no confinada a diversos tipos de envases para lograr una caracterización y seleccionar aquellos que representaran las mejores 4 opciones tomando en cuenta los siguientes parámetros: mejor relación peso-resistencia, mayor accesibilidad y menor deformación. A los cuatro envases seleccionados se les rellenó con bolsas plásticas, tendencia que se ha tenido últimamente en diversos países, para después realizarles pruebas a compresión simple y comparar los resultados con aquellos obtenidos de los ensayos para los envases vacíos.

La segunda etapa consistió en estudiar el comportamiento de los envases en conjunto. Para esto se realizaron pruebas a conjuntos constituidos por 6 botellas proponiendo 3 configuraciones distintas. Estos ensayos se realizaron bajo condiciones de velocidad de desplazamiento variable para analizar la relación que existe entre dicho factor y la resistencia del material. Con base en los resultados obtenidos se propuso un modelo de tendencia del comportamiento para cada tipo de envase y para los cuatro envases juntos. Adicionalmente, en esta etapa fue evaluado el efecto de carga sostenida Creep en el comportamiento del material.

Por último se propone como aplicación del modelo el diseño de una casa de interés social medio que busca ejemplificar las cargas resistidas por las botellas y las deformaciones que debido a ellas presentan.

TÍTULO

ESTUDIO DEL USO DEL POLIETILENO TEREF TALATO (PET) COMO MATERIAL DE RESTITUCIÓN EN SUELOS DE BAJA CAPACIDAD DE CARGA

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Situación actual del PET en la República Mexicana	6
1.2 Objetivos y Alcances	9
2 ANTECEDENTES	11
2.1 El uso de los geosintéticos en la Mecánica de Suelos	12
2.1.1 Tipos de geosintéticos y sus aplicaciones	13
2.2 Utilización del PET en la Ingeniería Civil	23
2.2.1 Empleo del PET en la Geotecnia.....	25
3 CONCEPTOS GENERALES DEL POLIETILENO TEREF TALATO (PET)	29
3.1 Introducción	29
3.2 Proceso de fabricación del PET	31
3.3 Estructura del PET	42
3.4 Propiedades físicas del PET	48
3.4.1 Densidad.....	49
3.4.2 Conductividad térmica.....	49
3.4.3 Absorción de agua	49
3.4.4 Permeabilidad	50
3.4.5 Comportamiento frente a la temperatura	50
3.4.6 Comportamiento frente a factores atmosféricos	51
3.5 Propiedades químicas.....	51
3.6 Propiedades biológicas	53

4 COMPORTAMIENTO BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN ESTÁTICA	54
4.1 Introducción	54
4.2 Mecanismo de deformación por compresión del polietileno tereftalato.....	61
4.3 Evaluación del comportamiento carga – deformación del PET a nivel macroscópico	64
4.3.1 Tipo de ensayos.....	65
4.3.1.1 Un envase vacío.....	65
4.3.1.2 Un envase relleno con bolsas plásticas.....	67
4.3.1.3 Arreglo de envases con distintas configuraciones	72
4.3.2 Análisis de resultados	74
4.3.2.1 Un envase vacío.....	74
4.3.2.2 Un envase relleno con bolsas plásticas.....	79
4.3.2.3 Arreglo de envases con distintas configuraciones	80
4.4 Efectos de carga sostenida en el tiempo (Creep).....	92
4.4.1 Presentación de resultados	93
4.4.2 Análisis de resultados	93
4.5 Tendencia del comportamiento del PET	93
4.5.1 Aplicación del modelo	98
5 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	115
5.1 Conclusiones	115
5.2 Comentarios	116
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

1 INTRODUCCIÓN

En un mundo en el que las afectaciones ambientales son cada vez mayores se tienen que buscar soluciones en materia de reciclaje y reutilización de los residuos sólidos urbanos.

La sobrepoblación, las actividades humanas modernas y el consumismo provocan un considerable aumento en la cantidad de residuos generados. El hombre contemporáneo fabrica infinidad de artículos para satisfacer una creciente demanda lo que conlleva a la acumulación de un gran volumen de desechos. Aunando esta situación a la ineficiencia con que los residuos son manejados, el resultado obtenido es la contaminación de aguas, suelos y aire, manifestándose en problemas de salud pública y efectos adversos sobre el ambiente, además de conflictos sociales y políticos.

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, entre los cuales destacan:

- Recolección de la basura mezclada (en el 95% del territorio nacional)¹
- Servicios públicos de limpia insuficientes e ineficientes
- Escasa coordinación entre los distintos niveles de gobierno
- Marco jurídico incompleto y labor legislativa con visión particularizada
- Pasividad en materia ecológica y escasa cultura del reciclaje en la sociedad
- Dependencia de los precios internacionales de los residuos que sirven de materia prima, lo que deriva en acopio por temporadas

Actualmente, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) lleva a cabo estudios cuyo objetivo es el establecimiento de metodologías que permitan la validación para definir indicadores de generación de residuos en México. En el país cada año se generan alrededor de 40 millones de toneladas de residuos. Para los residuos sólidos urbanos (RSU), y según datos reportados por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) en 2004, la generación de este tipo de residuos en todo el país fue de 94,800 toneladas diarias, equivalentes a 34.6 millones de toneladas anuales. Se estima que el resto, entre 5 y 6 millones de toneladas, pertenecen a residuos peligrosos (RP).

Además del incremento en la cantidad total de residuos generados en el país, la generación per cápita a nivel nacional también ha aumentado. De 1997 a 2004 la generación anual per cápita se incrementó un promedio de 4 kilogramos al año, alcanzando la cifra de 328 kilogramos por habitante, lo que representa un aproximado de 890 gramos por día.²

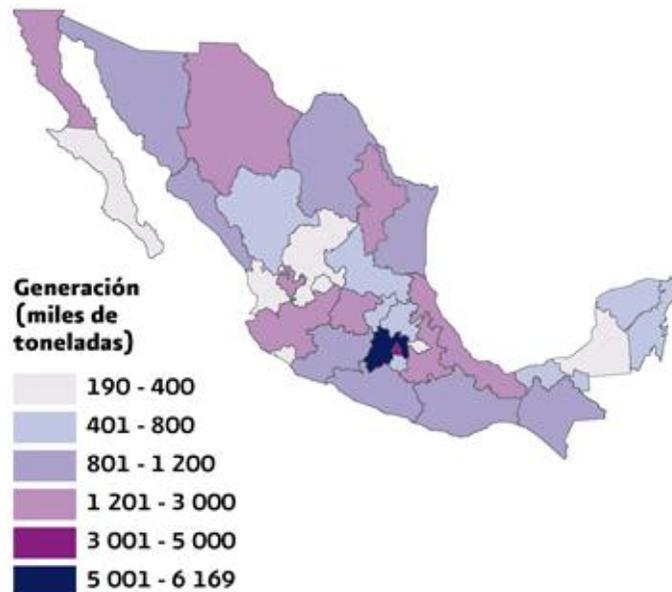
Datos más actuales muestran que el volumen estimado de generación nacional de residuos sólidos urbanos creció, entre 1997 y 2008, alrededor de 28%, pasando de 29.3 a 37.6 millones de toneladas. La generación per cápita diaria creció en el mismo periodo de 840 a 970 gramos.³

¹ Dato obtenido de estudios realizados por la asociación civil ECOCE en el año 2007.

² SEDESOL. Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. México. 2005. SEMARNAP. *Estadísticas del Medio Ambiente*. México. 1997.

³ La estimación de la generación nacional se calculó, conforme a lo establecido en la norma NMX-AA-61-1985, con base en la generación promedio de residuos sólidos por habitante (kg/hab/día), a partir de la información obtenida de muestreos aleatorios en campo. A partir de las estimaciones de generación per cápita puede calcularse la generación diaria y un estimado anual a nivel nacional. SEMARNAT, 2008.

Específicamente en la Ciudad de México, en últimas fechas (2010), se ha reportado que a diario se generan aproximadamente 12 513 toneladas de basura, lo que significa que cada habitante produce cerca de 1.43 kilos de residuos.



Generación de RSU, 2008. SEMARNAT

Reciclaje

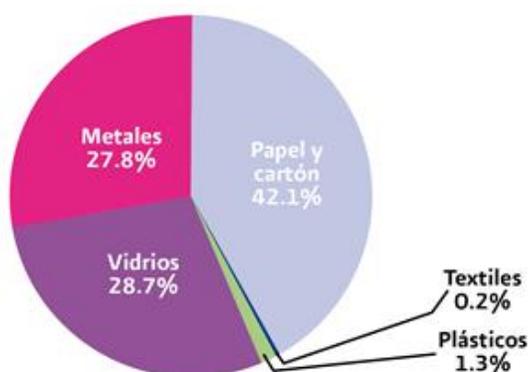
La tecnología para reciclar desechos sólidos ha evolucionado, no así las prácticas para crear incentivos para recuperarlos de manera económicamente viable. A pesar de que puede significar un gran atractivo en términos del mercado y de existir en México un gran potencial de reciclado, la mayor parte de los desechos sólidos siguen teniendo como destino final los tiraderos de basura a cielo abierto y, en el mejor de los casos, en los pocos rellenos sanitarios disponibles.

De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), en cuatro décadas la generación de residuos sólidos urbanos 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. La dependencia estima que apenas 83 por ciento de la generación nacional de residuos es recolectado. El resto queda disperso. Del total generado, sólo 49 por ciento es depositado en sitios controlados y el resto se dispone a cielo abierto.

Según datos de SEDESOL para el año 2004, en el país, el 53% de los RSU son de tipo orgánico, en tanto que el 28% son potencialmente reciclables como el papel y cartón (14%), vidrio (6%), plásticos (4%), hojalata (3%) y textiles (1%). El 19% restante son residuos de madera, cuero, hule y fibras diversas, materiales parcialmente reciclables aunque con mayor grado de dificultad. Los materiales considerados como reciclables, por orden de importancia en términos del volumen, son los productos de papel, vidrio, metal (aluminio, ferrosos y otros no ferrosos), plástico y textil. De cada uno de estos productos

la proporción promedio que se recicla con respecto a lo que se genera en los últimos diez años ha sido: 42.8% de papel y cartón, 33.3% de vidrio, 23.6% de metal, 0.2% de plástico y 0.1% de textil (SEMARNAT, 2005).

En la actualidad el reciclaje en el país continúa siendo muy bajo con respecto al total de residuos generados: en 1998 fue del 2.4% y en 2008 sólo alcanzó 3.6%. La mayor proporción de materiales reciclados en el año 2008 fue la de papel y cartón, seguida por la de vidrio y el metal.



Reciclaje de RSU por composición; SEMARNAT, 2008

Uno de los grandes obstáculos para reciclar tiene que ver con que la composición de los residuos sólidos no es homogénea en el país, sino que obedece a la distribución de hábitos de consumo y poder adquisitivo de la población.

Con base en los datos del Cuadro 1 vale la pena señalar que existe un significativo potencial para aprovechar buena parte de los residuos. Es interesante resaltar, sin embargo, que actualmente se recupera sólo un porcentaje menor al 50% del señalado potencial para el reciclaje.

Cuadro 1 Composición de las fracciones principales de los RSU, 2004	
Tipo de residuos	Porcentaje
Orgánicos	53
Potencialmente reciclables	28
Otros	19
Total	100

Fuente: Secretaría de Desarrollo Social, 2004

Plásticos

El término Plástico, en su significado más general, se aplica a las sustancias de distintas estructuras y naturalezas que carecen de un punto fijo de ebullición y poseen durante un intervalo de temperaturas propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones. Sin embargo, en sentido restringido, denota ciertos tipos de materiales sintéticos obtenidos mediante fenómenos

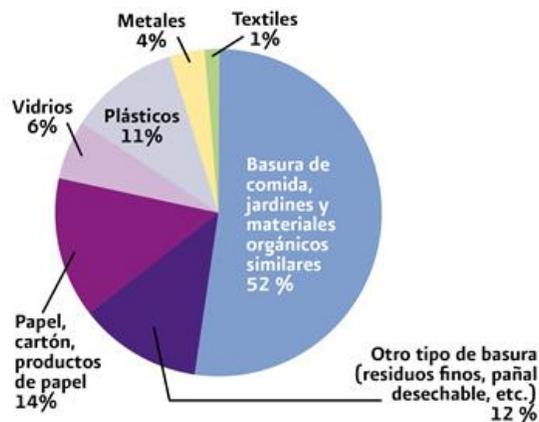
de polimerización o multiplicación artificial de los átomos de carbono en las largas cadenas moleculares de compuestos orgánicos derivados del petróleo y otras sustancias naturales.

Los plásticos se caracterizan por tener una alta relación resistencia/densidad, propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son termoendurecibles (se endurecen con el calor).

Una de las aplicaciones principales del plástico es el empaquetado. Se comercializa una buena cantidad de polietileno de baja densidad en forma de rollos de plástico transparente para envoltorios. El polietileno de alta densidad se usa para películas plásticas más gruesas, como la que se emplea en las bolsas de basura. Se utilizan también en empaquetado el polipropileno, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC) y el policloruro de vinilideno. Este último se usa en aplicaciones que requieren hermeticidad, ya que no permite el paso de gases (por ejemplo, el oxígeno) hacia dentro o hacia fuera del paquete. De la misma forma, el polipropileno es una buena barrera contra el vapor de agua; tiene aplicaciones domésticas y se emplea en forma de fibra para fabricar alfombras y sogas.

El polietileno de alta densidad se usa en tuberías, del mismo modo que el PVC. Este último se emplea también en forma de láminas como material de construcción. Muchos plásticos se utilizan para aislar cables e hilos; el poliestireno aplicado en forma de espuma sirve para aislar paredes y techos. También se hacen con plástico los marcos para puertas, ventanas, techos, molduras y otros artículos.

Según datos recabados en el año 2008 por la SEMARNAT, en México el 11% de los residuos sólidos urbanos pertenecen a este rubro.



Composición de los RSU, SEMARNAT 2008

Si bien por sus características de peligrosidad la mayoría de los plásticos sintéticos no representan un riesgo para el ambiente, sí son un problema mayor porque no pueden ser degradados por el entorno. Al contrario de lo que ocurre con la madera, el papel, las fibras naturales o incluso el metal y el vidrio, los plásticos no se oxidan ni se descomponen con

el tiempo. Su eliminación es por lo tanto, un problema ambiental de dimensiones considerables.

Cuadro2. Participación relativa en el mercado de resinas sintéticas en México

Resina	Consumo aparente (Ton)			
	1997	1998	1999	2001
<i>Resinas termoplásticas</i>	1 893 845	2 202 551	2 546 662	2 566 599
Policloruro de vinilo (PVC)	269, 705	293, 832	333,214	337, 679
Poliestireno (PS)	216, 131	240, 756	257,926	153, 346
Polipropileno (PP)	367, 939	443, 827	489, 165	575, 616
Polietileno alta densidad (PEAD)	418, 839	472, 193	507, 506	552, 915
Polietileno baja densidad (PEBD)	515, 300	585, 070	727, 675	649,852
Polietilentereftalato (PET)	105, 931	166, 873	231, 176	297,191

Fuente: Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) 1999 y 2001

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta el país en materia ambiental es el consumo del plástico. La Industria del plástico es uno de los sectores más dinámicos de la economía mexicana, pues mantiene una tasa de crecimiento anual superior al 7 por ciento, lo que demuestra su solidez y sus perspectivas de desarrollo para los próximos años. El consumo per cápita de plástico en el país es de poco menos de 50 kilogramos al año, mientras que en países como Alemania y Japón cada persona consume alrededor de 200 kilogramos anuales.⁴ Se debe considerar que los residuos plásticos al año son alrededor de 4.14 millones de toneladas, recolectándose únicamente 12% del plástico desechado.

En general los desperdicios de plásticos están básicamente formados por:

- Polietileno de Baja Densidad (PEBD)
- Polietileno de Alta Densidad (PEAD)
- Policloruro de Vinilo (PVC)
- Polipropileno (PP)
- Poliestireno (PS)
- Polietileno Tereftalato (PET)

Polietileno Tereftalato

La creciente demanda por parte de los consumidores ha impulsado de manera importante el desarrollo de nuevas tecnologías para el empaque y embalaje de diversos productos de consumo diario. La industria del empaque y embalaje es una de las más importantes en nuestro país, de hecho, se ha identificado que participa con el 1.16 por ciento del PIB y el 10.3 por ciento del PIB manufacturero.⁵

El polietileno tereftalato, mejor conocido como PET por sus siglas en inglés, es uno de los materiales comúnmente utilizados en la industria embotelladora de bebidas por sus

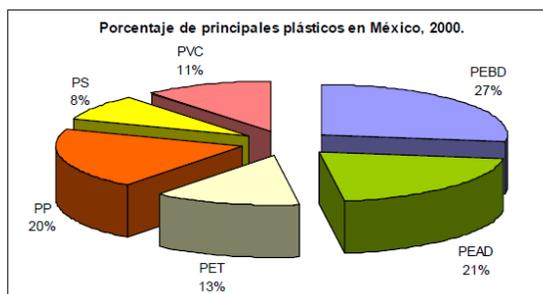
⁴ El Financiero 29 de Marzo del 2011

características muy particulares que favorecen la distribución, el almacenaje y la presentación de algunos productos. Derivado de los altos niveles de consumo de estos productos, se tiene también grandes cantidades de residuos.

En 1996, según datos del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el 4% de la producción de petróleo bruto se destinaba a la fabricación de plástico. Se realizó una estimación en donde se identificó que se requiere de 18.7 toneladas de petróleo para fabricar 3.74 toneladas de plástico.

El PET tiene una participación importante en la industria de los termoplásticos en México siendo el tercer plástico más usado, según datos del año 2000.

PLÁSTICO	Abreviatura	MILES DE TONELADAS
Poliétileno de baja densidad	PEBD	870
Poliétileno de alta densidad	PEAD	658
Tereftalato de polietileno	PET	413
Polipropileno	PP	643
Poliestireno	PS	265
Policloruro de vinilo	PVC	355
TOTAL		3,204



FUENTE: APREPET, AC. 2001

Consumo de los principales plásticos en México durante el año 2000

La Dirección General de Servicios Urbanos del Gobierno del Distrito Federal, reporta una disposición final de plásticos de 761.9 ton/día, dentro de éstas, 14.1 toneladas pertenecen a envases hechos de PET ocupando espacios innecesarios en las celdas de confinamiento de los rellenos sanitarios y con un tiempo de vida media muy largo⁶. Según estudios realizados por el PNUMA, una botella de PET tarda en degradarse 500 años dentro de un tiradero a cielo abierto, y si no se recicla, se vuelve un contaminante que se pudo haber reutilizado.

1.1 Situación actual del PET en la República Mexicana

El Polietileno Tereftalato es uno de los materiales más utilizados para el empaque y embalaje de diversos productos. Debido a sus características ha desplazado a otros materiales y tiene una demanda creciente en todo el mundo.

Las botellas de **PET** llegaron a México a mediados de la década de 1980 con gran aceptación entre los consumidores. Los envases producidos con base en esta resina se utilizan principalmente en la industria alimentaria. En particular, resultan especialmente adecuados para contener líquidos a presión, siendo el envasado de bebidas carbónicas su principal aplicación. Además, la disminución en los costos de fabricación y el desarrollo de tecnologías que mejoran substancialmente las propiedades de las botellas de PET, han permitido un crecimiento notable en el número de aplicaciones. Pero las aplicaciones

^{5, 6} Datos obtenidos del diagnóstico "El PET y su situación actual en el Distrito Federal" de la Secretaría del Medio Ambiente, 2001

de este polímero no se limitan a las botellas, también es utilizado para la fabricación de fibras textiles, cintas de video y audio, películas de rayos X y de fotografía, entre otras.

En el 2004 el PET se convirtió en la resina de mayor tasa de crecimiento y de mayor capacidad instalada en el país, lo que llevo a que actualmente este polímero represente el tercer lugar en el consumo de plásticos en México.

El éxito que ha tenido el PET en México se debe en gran parte a que en el país se consumen anualmente alrededor de 18 mil millones de litros de bebidas carbonatadas, mejor conocidas como refrescos, lo cual provocó un consumo de 700,000 toneladas de este plástico en el año 2006. La ciudad de Monterrey ostenta el más alto récord en consumo per cápita de refresco con la cifra de 196 litros al año. En promedio el consumo anual en el país es de 160 litros por persona (Conde, M., 2007).

Actualmente, México es el país con mayor consumo per cápita de agua embotellada de acuerdo al último reporte de la Beverage Marketing Corporation (Abril-Mayo de 2010), además de ocupar el segundo lugar en consumo de botellas de PET para bebidas carbonatadas, después de Estados Unidos.

El consumo de agua en envases plásticos en México representa el 13% de las ventas mundiales de agua embotellada, lo que ha aumentado sin parar con un crecimiento anual de 8.1%. El consumo per cápita de agua embotellada en el país llegó a 234 litros al año, siendo más del doble que en Estados Unidos (110 litros). Tan solo entre 2004 y 2009 este mercado creció 40%. Actualmente, la venta de agua embotellada asciende a 26,032 millones de litros al año, de los cuales se estima que 18,222 millones (70%) fueron comercializados en garrafón y 7,809 millones (30%) en botellas individuales, con todas las consecuencias que esto implica para la economía familiar y en particular para el ambiente.

Según cifras oficiales, cada año se producen en el país alrededor de 9 mil millones de botellas de plástico de PET, que representan casi una tercera parte de los residuos domésticos generados en México. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2005) calcula que unos 900 millones contaminan los bosques y ríos al ser tiradas por quienes van de día de campo.

Aproximadamente el 54% del **PET** en México se encuentra en almacenes para su distribución, en cauces, calles o tiraderos clandestinos; el resto está en centros de acopio para su reciclaje (alrededor del 9%) o en rellenos sanitarios. Los residuos de **PET** representan entre el 7 y el 10% del volumen en los rellenos sanitarios, y entre el 25 y el 30% de los residuos sólidos urbanos generados en el país.

Esto constituye un problema de disposición de residuos, considerando el potencial de reutilización que tiene el **PET**. Además, en México, del total de residuos que se reciclan, el plástico representa apenas poco más del 1%.

A pesar de que sus características físicas y químicas aseguran que este material es inerte en el ambiente, el impacto visual que produce su inadecuada disposición es alto y perceptible para la población.

Reducir la demanda de botellas de **PET** es un paso esencial en la concientización de la reducción de los residuos. De acuerdo con un estudio del Environmental Products Inc

(EPI), cada segundo se tiran a la basura 1,500 botellas de **PET**. La EPI demostró que aproximadamente 26 mil millones de litros embotellados equivalen a 17 millones de barriles de petróleo usados, la emisión de 2 millones de toneladas de gases de efecto invernadero a la atmósfera y 100 mil millones de dólares gastados, que servirían para que cada persona en el Planeta tuviera acceso al agua potable.

El problema radica en que, según la ONU, cuatro de cada cinco botellas de PET utilizadas van directamente a los basureros. Esto significa que solamente el 20% del PET utilizado se recicla y esto es verdadero para países con alta conciencia ecológica como Alemania (19%). El problema está en países como el nuestro, donde se estima que se recicla del 7 al 9%. Y esto es para la sociedad que más consume líquido embotellado en el mundo.

En México existen diversos reglamentos y normas que tratan de regular el proceso de reciclaje, sin embargo estas leyes están incompletas y por tal motivo no se aplican como debería de ser. Dichas leyes tienen como criterios prevenir y controlar la contaminación del suelo y el tratamiento del material abarcando desde la operación de los sistemas de limpia hasta la generación, manejo y disposición final de los residuos. Existen apoyos fiscales para todo aquel que participe activamente en el proceso de reciclaje eliminando hasta el 50% del impuesto sobre nómina.⁷

Pero lo más importante es que la cultura del ciudadano mexicano no es lo bastante amplia como para darle un buen uso al envase utilizado.

Datos estadísticos

Según estudios realizados por la Asociación para Promover el Reciclaje del PET (APREPET) en el año 2001 el consumo de PET en la Zona Metropolitana del Valle de México alcanzó las 124 mil toneladas. En cuanto a la situación de la Ciudad de México, en el año 2001 el consumo de PET fue de 55 800 toneladas, mientras que para el año 2007 se consumieron 170 mil toneladas. Datos recabados para el año 2010 muestran que se producen 1 millón 392 mil 600 toneladas de plástico al año de las cuales aproximadamente 830 mil toneladas son de PET. En cuanto al consumo mundial de PET se estima que en el año 2000 se consumieron 25.2 millones de toneladas. El consumo de PET a nivel nacional se muestra en el Cuadro 3.

Año	Toneladas
2000	413 000
2001	467 000
2004	630 000
2005	738 000
2006	765 000
2009	790 000
2010	830 000

Cuadro 3. Consumo a nivel nacional

⁷ Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal

Consumos anuales de PET en el mundo (Kton)			
Aplicación	1990	1994	2000
Fibras y filamentos	8500	11200	17000
Botellas	1200	2500	6000
Películas	900	1000	1200
Otros	900	1000	1000
Total	11500	15700	25200

Cuadro 4. Consumo mundial de PET (Nadkarni, 2001)

Crecimiento anual

En el año 2000 el consumo de PET en el país crecía en un 10% anual aproximadamente. En el año 2005 mostró un crecimiento de 8.1% y para los últimos años el crecimiento anual ha sido de 13%.

Consumo per cápita

En el año 2000 se registró que cada mexicano consumía un promedio de 8.9 kg de plástico al año⁸. Hablando específicamente del Polietileno Tereftalato (PET) para el año 2005 el consumo fue de 7.2 kg/año por habitante aumentando a 8 kg/año en el año 2008.

Número de botellas

En el año 2009 se produjeron 7 mil 800 millones de botellas de PET únicamente para agua embotellada. Debido a esta situación y a la utilización del PET para el envasado de otros productos, se estima que en el país se desechan 21.3 millones de botellas al día. En México se consumen cerca de 200 mil botellas de PET cada hora. Según la E.J. Krause de México cada mexicano consume 250 botellas de PET al año (2008).

Como se mencionó anteriormente, se estima que una botella de PET tarda en degradarse 500 años, por lo que aún no se ha degradado el primer residuo de PET generado en el mundo.

1.2 Objetivos y Alcances

Esta investigación se realiza en función de producir una innovación tecnológica que tienda a reemplazar las materias primas no renovables utilizadas en la ingeniería civil por otras más abundantes y que no tienen un destino final adecuado como son los materiales de desecho.

Debido a la problemática existente, este trabajo pretende ser una opción viable en la reutilización de residuos, dando a los envases de PET un sitio de disposición final, siendo una alternativa más para ayudar a afrontar la situación actual.

⁸ Dato mostrado dentro de la justificación para la iniciativa de Ley Federal de Empaques y Embalajes, a cargo del Grupo Parlamentario del Partido Verde Ecologista de México.

El objetivo principal de este proyecto de investigación es la comprensión del comportamiento mecánico del Polietileno Tereftalato PET bajo esfuerzos de compresión estáticos, además de conocer la influencia que ejercen la densidad del material, la velocidad de desplazamiento y el confinamiento sobre dicho comportamiento.

2 ANTECEDENTES

La idea de agregar a los suelos materiales obtenidos de la naturaleza como bambú, raíces, maderas, ramas, pieles, etc., para mejorar sus propiedades, ha acompañado a la historia de la humanidad. La ubicación temporal de los primeros intentos por reforzar los suelos es más que imposible, pero dicho concepto ha permanecido vigente ante las crecientes necesidades del hombre.

Entre los ejemplos existentes se pueden citar las murallas de Ziggurat de Agar Quf (Mesopotamia, 1400 A.C.) y las de China (200 A.C.), donde fueron empleadas mezclas de suelos reforzados con raíces. Por otra parte, los babilonios utilizaron como reforzamiento ramas de palmera entrelazadas en la construcción de las torres gigantes, mientras que excavaciones realizadas en antiguos sitios egipcios muestran el uso de esteras hechas de hierba y lino. Un ejemplo interesante en América del Sur es la aplicación de la lana de llama mezclada con el suelo por los incas en las construcciones de las calles en el Templo de La Luna, en Perú. En diversos países sudamericanos se utilizaban también paja, caña y piedra colocadas a diferentes niveles del suelo para reforzar terraplenes.

En cuanto a México, los Mexicas reconocieron la problemática del suelo lacustre en la antigua Tenochtitlán. Para la construcción de la ciudad pusieron en práctica procedimientos y conceptos geotécnicos avanzados que continúan siendo vigentes en la actualidad, como son el mejoramiento masivo del terreno mediante el hincado de troncos, la construcción de un relleno para precargar el subsuelo y el empleo de tezontle y tepetate como relleno ligero con el objeto de reducir el peso en las calzadas.



*Visión artística de la construcción del Templo Mayor
(Original de Claudia de Teresa)*

Dichas estructuras, constituidas de materiales naturales utilizados como cuerpos extraños para mejorar un medio natural, no siempre tuvieron éxito. Lo cierto es que, en ocasiones, desmejoraban las condiciones iniciales del suelo haciendo compleja la reinstalación del material de refuerzo. Fue así como la falta de material suficiente para resistir las cargas a las que las estructuras eran expuestas, la filtración del suelo de pobres condiciones a través de la estructura de estabilización y la degradación del material natural utilizado como estabilizante (hecho que en ocasiones constituía la reaparición del estado de inestabilidad inicial), se convirtieron en ejemplos comunes de la vulnerabilidad del uso de estos materiales.

Dichos hechos significaron la búsqueda de nuevos materiales cuyas características cumplieran con los requerimientos para el mejoramiento de los suelos.

2.1 El uso de los geosintéticos en la Mecánica de suelos

Los Geosintéticos son materiales flexibles desarrollados para complementar y mejorar el desempeño de los materiales de construcción, facilitando la ejecución de los trabajos y reduciendo los costos de los proyectos. Su uso está más extendido hacia los suelos y materiales térreos. La palabra geosintético se compone del prefijo *geo* (tierra/suelo) y la palabra *sintético* que designa los productos fabricados por procedimientos industriales o por síntesis química. Se fabrican principalmente a partir de polímeros utilizados en la industria del plástico, aunque frecuentemente se utiliza también el caucho, la fibra de vidrio y otros materiales. Generalmente son delgados y laminares y se utilizan en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos

*Los geosintéticos son productos desarrollados a partir de segmentos industriales (textiles, caucho, materiales plásticos, membranas bituminosas, polímeros y bentonita) para la transformación de polímeros básicos (polietileno, polipropileno, nylon, poliamidas, fibra de vidrio entre otros polímeros altamente inertes a la degradación biológica y química) a su vez transformados para poder ser utilizados en el mejoramiento del comportamiento de los suelos.*⁹

Según la ASTM D 4439¹⁰: "Geosintético: es un producto fabricado a partir de materiales poliméricos, para ser usado con suelo, roca, tierra, o cualquier otro material geotécnico, como parte integral de un proyecto, estructura, o sistema construido por el hombre."

Un marco inicial para el uso de los geosintéticos modernos se remonta al año de 1926 en Estados Unidos de América, en donde se dio el primer intento de uso de fibras sintéticas en el refuerzo de la estructura de un pavimento. El propulsor de dicho experimento fue el Departamento de Vías de Carolina del Sur. El ensayo consistió en disponer una gruesa capa de algodón sobre la capa de base del pavimento flexible para luego verter asfalto caliente sobre la fibra y protegerlo con una delgada capa de arena. Los resultados del experimento fueron publicados en 1935, mostrando una reducción de las fallas localizadas y el agrietamiento en la estructura, además de buenas condiciones de servicio antes de que la fibra se deteriorara completamente (es importante considerar el peso de los vehículos de esa época y la repetición de las cargas).

La utilización de los geosintéticos se hizo más frecuente en la década de los cuarenta con la fabricación de los polímeros sintéticos, asociada al desarrollo de las técnicas de producción de los geotextiles tejidos (década de los cincuenta) y no tejidos (década de los sesenta).

A partir de la década de los ochenta los geosintéticos logran consolidarse a nivel mundial. Esta época se caracteriza por el uso masivo y creciente de estos productos, la diversificación de sus manejos y la aparición de nuevos desarrollos.

⁹ Sociedad Internacional de Geosintéticos (IGS).

¹⁰ American Society for Testing and Materials (ASTM); Standards D 4439: Terminology for Geosynthetics

Desde ese momento, las tecnologías y aplicaciones de los geosintéticos fueron creciendo día a día, y se intensificó cada vez más su práctica en los mercados mundiales.

Los geosintéticos en México

El concepto de la utilización de los geosintéticos se introdujo a México en la década de los setentas, pero fue en la década de los ochentas cuando esta práctica comenzó a desarrollarse verdaderamente en el país.

México fabrica ciertos geosintéticos, como los geotextiles, las geomembranas, los geobloques y las geoceldas, en bajas cantidades por lo cual la mayoría de estos productos provienen del extranjero.

Actualmente en el país son diversos los proyectos realizados mediante el uso de geosintéticos, principalmente en las obras de drenaje y de infraestructura vial, pero el número sigue siendo moderado. Esto se debe al bajo conocimiento sobre las ventajas y desventajas de su utilización en diferentes aplicaciones y a la poca experiencia en el diseño e instalación de los diferentes productos geosintéticos entre los profesionales involucrados en el diseño y construcción.

Aunado a esto, en México no existe una normatividad para el diseño, instalación y construcción con geosintéticos por lo que tanto fabricantes como diseñadores se guían por las normas de otros países.

Con todo lo anterior cabe mencionar que la experiencia en el uso de los geosintéticos a nivel mundial demuestra que mientras las partes involucradas en el desarrollo del proyecto tengan conocimiento de las características y aplicaciones de los mismos, se utilicen materiales fabricados bajo estricto control de calidad y las metodologías de diseño y construcción se hagan bajo el cumplimiento de las respectivas normas, estos materiales podrán funcionar de manera exitosa.

En los últimos años el interés por el uso de los geosintéticos ha tenido un notable crecimiento por parte de los profesionales interesados en la protección ambiental. Esto se debe a las características de impermeabilidad, durabilidad y resistencia al ataque biológico y químico de estos materiales, lo que se traduce en proyectos sustentables, además de ser una alternativa técnicamente viable y con beneficios económicos debido a la prolongación de la vida útil de la obra disminuyendo los gastos de mantenimiento.

Es claro entonces que el tema de los geosintéticos es un área de investigación en vías de desarrollo en México. En el futuro cercano se deberá trabajar en la unificación de procedimientos de diseño, instalación y control de calidad, como primer paso para la formulación y creación de una normatividad del uso de los materiales geosintéticos. Así como también se deberán realizar trabajos de análisis experimental del comportamiento de los mismos y evaluación del desempeño de las aplicaciones. (Ossa López, 2009)

2.1.1 Tipos de geosintéticos y sus aplicaciones

Hoy en día se ha incrementado el uso de materiales geosintéticos dentro de obras de la Ingeniería Geotécnica y Vías Terrestres, esto es debido a las diversas ventajas que

presentan en comparación con métodos convencionales como son la facilidad de implementación y la disminución considerable de costos. (Giroud, 2004).

Las soluciones con geosintéticos se han convertido en una de las principales alternativas a ser utilizadas en obras de diferentes sectores de la infraestructura. Entre sus diversas aplicaciones se encuentra el refuerzo de taludes, mejoramiento de suelos y terraplenes, control de erosión, rellenos sanitarios, drenaje y filtración, entre otros proyectos ambientales, de infraestructura de transporte, obras geotécnicas, hidráulicas, etc. formando parte de diversas estructuras, lo cual hace que el comportamiento de éstas esté íntimamente ligado con el del material geosintético. Esto ha generado la necesidad de fomentar el aprendizaje y las buenas prácticas para el uso de dichos productos.

El desempeño general de los geosintéticos permite proveer soluciones eficientes a la ingeniería en diversas escalas. En muchos casos las propiedades mecánicas de los suelos no satisfacen las características deseables para diferentes aplicaciones, requiriendo de diferentes procesos y tratamientos especiales para modificar su comportamiento a las condiciones deseadas. Las propiedades mecánicas e hidráulicas que poseen los geosintéticos complementan las falencias que presentan los materiales térreos, lo que ha posibilitado la ejecución de obras en difíciles condiciones y de manera económica. Algunos tipos de suelo, al igual que el concreto, presentan una buena resistencia a la compresión pero son deficientes cuando se trata de asumir esfuerzos de tensión. Por tal motivo, cuando los suelos son combinados con elementos que sean capaces de absorber esfuerzos de tensión, como son los geotextiles, se pueden lograr estructuras de suelo de mayor resistencia. Su utilización principal es en la mejora de las propiedades mecánicas de los suelos, aunque de igual forma se pueden utilizar simplemente para su protección.

El uso de los geosintéticos es novedoso y se ha visto incrementado en una forma sostenida en los últimos años debido a las ventajas comparativas frente a otros métodos de mejoramiento de condiciones in-situ dentro de las cuales cabe destacar:

- a) Un mejor desempeño de la función específica: por su estricto control de calidad y desarrollo tecnológico están calificados en el cumplimiento de funciones concretas
- b) Economía en su uso: ya sea por menor inversión inicial o por prolongación de la vida útil de la estructura
- c) Facilidad de puesta en obra
- d) Permite ahorros en tiempos de ejecución
- e) Posibilita soluciones ambientales correctas con empleo de mano de obra no calificada
- f) La utilización de materiales de calidad verificable

Algunos de los beneficios que presentan los geosintéticos debido a sus propiedades son:

- Funcionan como barrera contra la erosión de suelos
- Sirven como manto drenante en reemplazo de estratos de material granular
- Son inertes frente a la mayoría de agentes químicos
- Refuerzan el suelo mejorando sus cargas últimas
- Permiten la construcción de taludes de gran inclinación, inclusive de muros verticales de gran altura

Los geosintéticos comprenden productos fabricados a partir de procedimientos de extrusión (geoplásticos), productos que incluyen en su fabricación tecnología textil (geotextiles) y productos formados por ambas tecnologías: textil y plástica, como los geocompuestos.¹¹ Por otra parte, se pueden encontrar los tejidos o no tejidos, que se componen normalmente de termoplásticos como el polipropileno o poliéster, cuyas denominaciones químicas internacionales corresponden a PP y PS.

Se utilizan para satisfacer principalmente las siguientes funciones: separación, refuerzo, drenaje, filtración, absorción de energía, contención, barrera impermeable y protección.

La International Geosynthetic Society (IGS) los divide en 9 grupos:

1. Geotextiles
2. Geomembranas
3. Geomallas
4. Georedes
5. Geocompuestos
6. Geoceldas
7. Geotubos
8. Geobloques
9. Revestimientos geosintéticos de arcilla, GCL (Geosynthetic Clay Liners)

Geotextiles

Los geotextiles ofrecen soluciones flexibles y de costo efectivo para aplicaciones en ingeniería civil que requieren reforzamiento, control de la erosión, separación, filtración, drenaje y otras funciones. Representan el grupo más grande de los geosintéticos. Son materiales no biodegradables, flexibles y permeables. Se fabrican con resinas poliméricas biológicas y químicamente inertes, resistentes a las diversas condiciones de los suelos, formando mallas cuyas funciones principales se basan en su capacidad drenante y en su resistencia mecánica a la perforación y tensión. Se subdividen en dos familias: geotextiles tejidos y no tejidos.

Las funciones principales de los geotextiles son:

- Separación: impide la contaminación de los agregados seleccionados en el suelo natural.
- Refuerzo: todo suelo tiene una baja resistencia a la tensión. El geotextil absorbe los esfuerzos de tensión que el suelo no posee.
- Filtración: permite el paso del agua a través de sus poros impidiendo que las partículas finas del suelo traspasen el geotextil.
- Drenaje planar: drena el agua en el plano del geotextil evitando el desarrollo de la presión de poros en la masa del suelo.
- Barrera impermeable: los geotextiles no tejidos, al impregnarse con asfalto, elastómeros u otro tipo de mezclas poliméricas, crean una barrera impermeable contra líquidos.
- Protección: gracias al espesor y a la masa de los geotextiles no tejidos, éstos absorben los esfuerzos inducidos por objetos angulosos o punzantes, protegiendo materiales laminares como es el caso de las geomembranas.

¹¹ R.M. Koerner. "Durability and Aging of Geosynthetics". Elsevier Applied Science. 1989.

Se emplean como filtros en sustitución de agregados graduados, como estabilizadores de suelos blandos y como elementos para impedir la erosión de suelos y el acarreo de azolves ya que retienen partículas de suelo mayores al tamaño de sus poros; también se utilizan como elementos de distribución de cargas en los pavimentos, en los taludes y en los cortes. Son de aplicación en la preparación y sellado de vertederos, en la construcción de sub-bases de carreteras, repavimentaciones y líneas férreas, en encauzamientos, canales y presas; de igual modo se colocan entre distintas capas de suelo evitando erosiones, en conducciones y drenajes como protección anticólmatación¹², en muros de contención, balsas, canales y túneles como refuerzo y drenaje del terreno, etc.

Geomembranas

Las geomembranas son láminas poliméricas impermeables, cuya función principal es servir de recubrimiento sintético a fluidos y partículas en obras civiles, geotécnicas y ambientales.

Dichas láminas, continuas y flexibles, son elaboradas mediante materiales sintéticos relativamente impermeables. Se producen usando polímeros termoplásticos, elastómeros, compuestos de caucho o petróleo. La mayoría de las geomembranas son fabricadas a partir de polímeros extruidos tales como el polietileno de alta densidad (PEAD), el polipropileno (PP) y el cloruro de polivinilo (PVC), que son extruidos en hojas muy largas las cuales son soladas en el lugar de aplicación. También se pueden encontrar fabricadas por diferentes tipos de resinas como el caucho sintético, el clorosulfonado y polietileno de media y de baja densidad. Pueden ser plastoméricas, elastoméricas o bituminosas.

Las geomembranas se emplean en sistemas de impermeabilización tales como túneles, vertederos, depósitos o cubiertas planas de edificación. También como revestimientos de contenedores de fluidos y gases, como barreras de vapor, revestimiento de canales y lagunas además de su utilización en el control de la erosión.

Sirven para la protección de:

- Lagunas de lixiviación, de aireación y de tratamiento de aguas
- Diques de contención secundaria
- Tanques de concreto y metal
- Rellenos Sanitarios
- Fosas de aguas residuales
- Tuberías
- Lagos artificiales
- Tanque de homogenización
- Trincheras
- Canales de riego
- Confinamiento tóxico de residuos químicos e industriales
- Ollas de captación de aguas pluviales

¹² Colmatación: acumulación de sedimentos

Geomallas

Las geomallas son materiales geosintéticos que tienen una apariencia de malla abierta. Constan de dos grupos de elementos ortogonales soportantes de cargas que originan estructuras tridimensionales mono o bi-orientadas. Son fabricadas principalmente con polipropileno (PP), producidas por un método de extrusión, soldadura o tejido, y posteriormente estiradas de forma axial (mono-orientadas) o bi-axial (bi-orientadas) para incrementar sus características a la tensión. Las funciones principales que cumple son de refuerzo y estabilización superficial. Cuentan con una mayor adherencia al terreno y una mayor durabilidad en el medio que los geotextiles.

Su estructura es de forma plana, hecha mediante polímeros química y biológicamente inertes, resistentes a los procesos degenerativos de los suelos. Dicha estructura conforma una red regular de elementos conectados de forma integrada, cuyas aberturas son usualmente mayores que los componentes del suelo natural, por lo que tienen como mecanismo fundamental de funcionamiento la fricción pudiendo contar con el efecto limitante de las partículas del suelo que se alojan en sus aberturas, permitiendo un efectivo confinamiento y refuerzo del suelo.

Las geomallas tienen un elevado módulo a la tensión y una óptima resistencia a los daños por construcción durante la instalación.

Su aplicación principal es para trabajos de refuerzo de terraplenes, pudiendo así diseñarlos con taludes de mayor pendiente, y para incremento de la capacidad portante de bases y sub-bases de carreteras, produciendo así significativos ahorros en sus espesores y evitando movimientos diferenciales que acaban produciendo baches en el asfalto. También se utilizan en la estabilización de taludes, gaviones y obras marinas entre otros. Son usadas en aplicaciones como geotecnia, protección ambiental, hidráulica e ingeniería vial.

Georedes

La geored es una estructura de polímero manufacturada en forma de malla abierta, formada por dos conjuntos de hebras poliméricas gruesas y paralelas interactuando en un ángulo constante, generalmente entre 60° y 90°, formando aberturas regulares e invariables. Dichas aberturas son generalmente más grandes que los elementos que la conforman.

Las georedes son materiales de una o varias capas que se obtienen generalmente por extrusión o punzonado de polímeros termoplásticos, principalmente de polietileno de alta densidad o de polipropileno, o también tejiendo o entrelazando y cubriendo fibras de poliéster de alta resistencia. La soldadura de las dos series de hilos es obtenida por la penetración parcial en los puntos de contacto con el polímero aún en estado semi-fluido. Debido a los materiales que las conforman no son afectadas por factores térmicos ni químico-biológicos normalmente presentes en el terreno.

Debido a su capacidad de drenaje (líquidos y gases), las georedes se utilizan principalmente en los siguientes casos:

- Captación de percolaciones en rellenos sanitarios

- Como colchón drenante debajo de rellenos compactados
- Drenaje de aguas por debajo de edificios
- Drenaje de aguas en canchas deportivas

Para evitar la intrusión de los materiales que serán drenados, las georedes siempre se utilizan en conjunto con geotextiles (como filtros) y/o geomembranas (como elementos de retención) u otro material en su superficie (superior y/o inferior). Actúa como elemento para drenaje, esto es, transporta en su plano todos los fluidos a lo largo de su propia estructura.

La estructura de redes tiene amplias aberturas lo cual mejora su interacción con el suelo o con los agregados. Las georedes reducen el desplazamiento lateral y mejoran la estabilidad total del terraplén de tierra. También sirven para la estabilización de suelos blandos e incremento de capacidad de carga en el suelo (redistribución de esfuerzos en el suelo). Son indicadas para usarse entre el suelo existente y la capa superior de material granular compactado; para separar dos suelos diferentes evitando contaminación entre grava y arcilla; y para prevenir la acumulación de agua manteniendo una base bien drenada.

Además de las ventajas ofrecidas por el material que las constituye (una excelente resistencia a una amplia variedad de agentes químicos, durabilidad, buena resistencia a la tensión, presión, calor y a las variaciones de temperatura), la estructura de dos o tres series de hilos permiten la conducción de líquidos y gases en cualquier dirección y con mínima pendiente.

Geocompuestos

El nombre genérico de geocompuestos se utiliza para definir elementos formados por la asociación de dos o más productos distintos. La idea básica que se encuentra detrás de los geocompuestos es la de combinar las mejores propiedades de diferentes materiales, de manera que se resuelva un determinado problema de una forma óptima. Generalmente están compuestos de materiales sintéticos prefabricados o combinados in-situ, aunque no siempre es así. Algunas veces puede resultar más ventajoso usar un material no-sintético combinado con uno sintético para obtener un comportamiento óptimo y/o minimizar los costos.

Las funciones básicas de un geocompuesto son: separación, refuerzo, filtración, drenaje y contención, siendo habitualmente una combinación de dos o más de éstas. Un ejemplo de los geocompuestos son aquellos que están diseñados para estabilización de suelos donde se requiere tanto refuerzo como separación de una base granular y un subsuelo muy fino. Para este fin se une un geotextil no tejido a una geomalla, lo que permite una gran interacción con el suelo reforzado, completa separación de los diferentes tipos de suelo, una efectiva acción de filtración, gran resistencia a la tensión y un alto módulo elástico, gran resistencia a los daños durante la instalación y un excelente comportamiento a los agentes atmosféricos. Otra aplicación son los paneles de drenaje los cuales se pueden colocar forrando cimentaciones para reducir presiones hidrostáticas; o las mantas de drenaje que generalmente se usan para recolectar lixiviados en rellenos sanitarios. Recientemente estos drenes también se han usado para mejorar el drenaje de carreteras o como capas rompedoras de capilaridad.

Algunos otros ejemplos son: geotextil-geored, geored-geomembrana, o los drenes verticales prefabricados, los cuales están formados por un núcleo plástico drenante rodeado de un filtro de geotextil.

Como se ve, el número de posibilidades es muy amplio y dependen del ingenio y la imaginación del diseñador.

Geoceldas

Las geoceldas son sistemas tridimensionales de confinamiento celular fabricados con paneles de polietileno o polipropileno comúnmente. Se producen como redes relativamente gruesas formadas por celdas yuxtapuestas constituidas por costura o soldadura de tiras de materiales sintéticos con una altura aproximada de 100 mm, formando una estructura en forma de colmena o similar. Las celdas interconectadas son rellenas con suelo y ocasionalmente con concreto.

Algunas de sus características principales son:

- Se encuentran estabilizadas contra rayos UV
- Poseen una estructura resistente, durable y flexible
- El sistema de geoceldas se expande o comprime como acordeón, por lo que se transporta y almacena en forma compacta
- Es un sistema estable que confina efectivamente material suelto en cada celda
- Son sumamente resistentes a la distribución de cargas y a la acción de las cargas puntuales

La principal función de las geoceldas es la contención del terreno o de otros materiales sueltos colocados dentro de ellas, la estabilización de suelos blandos, el control de la erosión superficial asociada a materiales de relleno (suelo, argamasa, concreto, etc.) y en la reforestación. También son utilizadas para evitar el deslizamiento superficial en pendientes suaves y/o pronunciadas. Son muy resistentes para el confinamiento de cargas por lo que se utiliza para aumentar la capacidad de carga de suelo, sin generar problemas de contaminación y siendo muy funcionales al entorno ecológico.

Algunas de las aplicaciones en las que se utiliza el sistema de geoceldas son en el revestimiento de taludes secos, revestimiento de canales, protección de rellenos de aproximación a los puentes y muros de contención. En algunos casos, geoceldas de tiras de poliolefina de 0.5 a 1 metro de ancho, han sido conectadas con barras verticales de polímero para formar estratos profundos de geoceldas llamados geocolchones.

En cuanto a la reforestación, existen taludes en los cuales se dificulta conservar la vegetación porque el terreno: 1) es duro, árido o tiene pendientes pronunciadas (entre 30° y 80°); 2) se encuentra sujeto a condiciones atmosféricas desfavorables (fuertes vientos, precipitaciones intensas y escurrimientos entre otros), 3) está conformado de material de desecho o desperdicios (basura, cascajo, material orgánico, etc.). La solución con geoceldas proporciona estabilidad superficial al talud mediante el confinamiento del material que logra la permanencia de la vegetación, favorece el crecimiento del pasto y permite afianzar de mejor forma las raíces de la vegetación.

Geotubos

Los geotubos son elementos prefabricados hechos con material sintético, generalmente policloruro de vinilo (PVC) o polietileno de alta densidad (PEAD). Pueden ser corrugados o lisos, perforados o no. El diámetro y longitud del tubo se determina a partir de los requerimientos del proyecto y su relleno se realiza mediante el acoplamiento directo de un sistema de bombeo hidráulico del material de dragado o de relleno. Son geocontenedores textiles de sedimentos y lodos que pueden utilizarse como estructuras para confinamiento y secado de materiales. Su utilización más importante es en la construcción de estructuras hidráulicas y marítimas.

Los geotubos son contenedores de suelo encapsulado que pueden ser utilizados para reemplazar la roca como material convencional en estructuras de ingeniería hidráulica. Estos materiales tienden a ser más estables hidráulica y geotécnicamente, ya que son unidades más pesadas y más grandes en tamaño, con una relación ancho-alto superior, además de tener un área mayor de contacto entre unidades. En muchos proyectos de lagos, ríos y costas, la roca puede encontrarse a distancias que no resultan económicamente viables para su transportación. Algunas otras veces, el uso de la roca puede resultar no deseado por el riesgo que presenta a los buques de carga, mientras que los geotubos brindan un contacto suave. Otras aplicaciones de los geotubos son en espigones, rompeolas, núcleos de dunas, diques de contención de material dragado, protección de costas y playas, hábitats naturales, construcción de humedales y desecación de materiales de grano fino.

También se emplean estos materiales para captar y conducir fluidos en sistemas de drenaje para una vasta gama de obras de ingeniería. Algunas de ellas son:

- Conductores en drenes de pavimento (carreteras, ferrocarriles, aeropuertos);
- Conductores en drenes para muros de contención;
- Drenes primarios en sistemas drenantes para la remoción de percolados en rellenos sanitarios;
- Drenes superficiales en coberturas de rellenos sanitarios;
- Drenes horizontales profundos;

Los tubos perforados se utilizan especialmente en el drenaje de líquidos y gases, como son los lixiviados o recolección de gas en aplicaciones de rellenos sanitarios. En algunas ocasiones, el tubo perforado es cubierto con filtro de geotextil.

Los geotubos son a menudo la solución más competitiva en ingeniería marina e hidráulica, permitiendo el uso de materiales más finos como su elemento principal de construcción.

En México la utilización de geotubos representa una tecnología nueva que brinda soluciones innovadoras, sencillas y de bajo costo. Una de las aplicaciones que se les ha dado en el país es en el control de la erosión de las playas en Cancún, las cuales sufrieron una fuerte degradación por el efecto de la marea alta de tormenta que dejó a su paso el huracán Dean en 2007. Mamparas de geotubos fueron colocadas como parte del proceso de mantenimiento y recuperación de los arenales obteniendo excelentes resultados.

Geobloques

Los geobloques son prismas rectangulares fabricados de materiales sintéticos livianos y resistentes que son empleados en la geotecnia para reemplazar el suelo con el objetivo de generar una disminución de cargas en la construcción de rellenos. Son creados por expansión de espuma de poliestireno para formar una red de baja densidad de celdas cerradas llenas de gas.

Una forma de clasificar las aplicaciones de los geobloques es de acuerdo a la función que el material del que están hechos desempeña, la geoespuma¹³. Según Horvath (1995) los geobloques pueden ser utilizados como material de relleno ligero, inclusión compresible, control de vibraciones y aislante térmico.

Actualmente estos materiales aumentan su participación en el mercado de los geosintéticos. Son producidos en su mayoría con poliestireno expandido (EPS) y en algunas ocasiones con poliestireno extruido (XPS).

El poliestireno expandido (EPS) es un material liviano con una resistencia a la compresión similar a la de los suelos. Durante más de cuatro décadas este material ha sido usado en forma de geobloques en la construcción de terraplenes, principalmente aquellos cimentados sobre suelos compresibles. Su uso en la ingeniería geotécnica se extiende para la estabilización de taludes, la construcción de carreteras en forma acelerada, como aislante térmico de la estructura del pavimento y en la reducción de cargas laterales estáticas y dinámicas en estructuras de retención.

Otras aplicaciones en las que el empleo de geobloques resulta útil son en la rehabilitación de carreteras, la construcción de terraplenes para la ampliación de caminos y accesos a puentes y la construcción de respaldos compresibles en estribos de puentes.

Los bloques de polímero de poliestireno espumado han sido utilizados para obtener un volumen estable de bajo peso como la sub-base para carreteras construidas sobre suelos de grano fino blandos, arcillas y suelos de turba donde dichos subsuelos a menudo proporcionan unos cimientos inaceptables. (A. Miravete, 1995)

Revestimientos geosintéticos de arcilla, GCL

Los revestimientos geosintéticos de arcilla se podrían agrupar dentro de la clasificación de geocompuestos. Son prefabricados con una capa de arcilla bentonítica (del tipo montmorillonita que es la de mayor superficie específica, mayor actividad y mayor afección de agua entre las arcillas naturales) típicamente incorporada entre un grupo superior e inferior de geotextil o limitado por una geomembrana o una simple serie de geotextil.

Los revestimientos geosintéticos de arcilla son barreras hidráulicas usadas para detener el movimiento de líquidos tales como agua o lixiviados. Su conductividad es del orden de 1 a 5 E-11 m/s. Una de las características más importantes de los GCL's es su propiedad autosellante. Gracias a su hinchamiento en contacto con el agua sellan cualquier orificio en un sistema de impermeabilización.

¹³ El término geoespuma fue propuesto por Horvath (1995) para describir a todo aquel material fabricado mediante un proceso de expansión que pueda usarse en aplicaciones geotécnicas.

Los GCL's se usan en reemplazo de los revestimientos de arcilla compactada y en complemento con otros geosintéticos para formar sistemas de impermeabilización más confiables y duraderos. El reemplazo de dichas capas de arcilla compactada por un GCL produce muchas veces un ahorro considerable de dinero en el costo inicial de una obra de impermeabilización y siempre un ahorro de tiempo importante en el proceso constructivo.

Los geotextiles de GCL son frecuentemente cocidos a través del núcleo de la bentonita para incrementar internamente la resistencia al corte. Cuando son hidratados representan barreras efectivas de fluido y gases y son comúnmente usados en aplicaciones de revestimiento de rellenos sanitarios muchas veces conjuntamente con una geomembrana. Asimismo son usados como revestimiento secundario para tanques de almacenamiento y revestimiento para canales.

El amplio rango de aplicaciones ambientales de estos materiales incluye:

- Revestimientos para contención de fluidos, reemplazando toda o parte de la tradicional arcilla compactada.
- Aplicaciones en minería, como plataformas de lixiviación y presas de relave.
- Cobertura de rellenos, trabajando como barrera hidráulica y/o como parte de un sistema compuesto debajo de una geomembrana.

En la actualidad son muchos los proyectos e investigaciones dedicados a este tipo de materiales. Esto se debe a los grandes beneficios que presenta su utilización, sus múltiples aplicaciones y las nuevas alternativas constructivas que representan.

En México (Romo et al., 2006) se han presentado propuestas alternativas para la construcción de terraplenes sobre suelos blandos, un problema persistente en la mecánica de suelos. La propuesta consiste en la construcción de un terraplén sintético de bajo peso formado mediante tubos de polietileno de alta densidad de diámetro constante en capas dispuestas en tresbolillo denominado *tuboplén*. Entre sus múltiples ventajas se encuentra, además del bajo peso, tener propiedades estables en el tiempo. Esto debido a que el material que se utiliza para su formación, polietileno de alta densidad, es altamente resistente a la corrosión y a diversas condiciones de alcalinidad y acidez del agua que puedan entrar en contacto con él (Advanced Drainage Systems, 1996), misma que puede drenarse fácilmente a través de las tuberías que componen al tuboplén.

La alternativa propuesta se comparó, en términos de asentamientos y esfuerzos inducidos al terreno, contra un talud convencional con las mismas dimensiones. La comparación muestra que los tuboplén inducen esfuerzos hasta 60 veces menores en el terreno respecto del terraplén convencional geoméricamente equivalente, por lo que los asentamientos que se presentan son menores en el caso de los tuboplén. También se realizaron ensayos de laboratorio en mesa vibradora para monitorear el comportamiento de un tuboplén a escala. Los resultados revelan que los tuboplén tienen un comportamiento sísmico satisfactorio además de atenuar la aceleración de la excitación, a diferencia de un talud convencional donde las ondas sísmicas usualmente se amplifican a su paso por el suelo. Esto es una ventaja más de los tuboplén sobre los taludes convencionales. Todo esto convierte a los tuboplén en una alternativa atractiva para la construcción de terraplenes sobre suelos blandos.

2.2 Utilización del PET en la Ingeniería Civil

Debido a la problemática que representa el exceso de los residuos de PET a nivel mundial, se han creado soluciones perspicaces para la reutilización y reciclaje de estos productos. Muchas de estas soluciones son prácticas relacionadas con la ingeniería civil, específicamente con la construcción.

Viviendas

Una de las aplicaciones que se les ha dado a los envases de PET es en la construcción de viviendas de bajo costo con resultados realmente favorecedores. La construcción con botellas de PET surge de una sucesión de problemas que supone este plástico de forma mundial, pero específicamente para países en vías de desarrollo. Estas construcciones representan un sistema innovador que optimiza la utilización de recursos disponibles obteniendo estructuras resistentes, duraderas y económicas.

El sistema constructivo con base en botellas desechables de PET, permite ahorrar hasta el 50% en materiales, si se compara con la construcción tradicional, logrando con ello ser una solución muy útil para poblaciones en estado de pobreza. Esta técnica brinda un ingenioso recurso de **reciclado para la gran cantidad de envases desechables**, consiguiendo construcciones efectivas y evitando a la vez la contaminación que generan.



Construcciones con PET

Concreto polimérico PET

A principios del siglo XXI el profesor Nakamatsu et ál. obtuvieron por primera vez un concreto polimérico a partir de botellas de PET. Los concretos poliméricos sólo se usan en pequeña escala y en limitadas aplicaciones en las que el beneficio de sus propiedades físicas supera su elevado costo con respecto al concreto elaborado con cemento Portland (de cinco a seis veces más caro), pero este costo se ve enormemente disminuido mediante la elaboración de los polímeros a partir del reciclado del tereftalato de polietileno. Con la creación de este cemento se logra atacar parte de un importante problema de desechos sólidos a un costo muy bajo.

A través de la descomposición química del PET se obtiene poliéster insaturado el cual, mediante entrecruzamiento, forma una especie de red tridimensional resultando una estructura interconectada, amplia y muy fuerte. Si esta matriz es llenada con arena y

grava, el producto resultante es un concreto polimérico, ya que la pasta de agua-cemento es sustituida por el polímero obtenido del reciclado del tereftalato de polietileno.

Estudios realizados en Venezuela en el año 2008 al Concreto Polimérico PET (CP-PET) demostraron que dicha mezcla puede utilizarse en la construcción de elementos de obras civiles, cuyas cargas y durabilidad estén limitadas a cierto rango. Se puede utilizar como mezcla para elementos que no requieran de estética o para bloques u otros elementos que no soporten importantes cargas. La densidad del CP-PET es menor que la de los concretos o morteros convencionales lo que provoca que la mezcla sea más liviana, propiedad que la hace interesante en estructuras sometidas a bajas cargas.

Ladrillos

La utilización de plásticos reciclados para la elaboración de elementos constructivos nació de la inquietud ecológica de investigadores que reconocen la importancia del reciclado para reducir la cantidad de residuos que se entierran sin utilidad alguna, o que se acumulan y queman en tiraderos a cielo abierto produciendo contaminación.

El Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE), en Argentina, es una asociación civil que se dedica a investigar y desarrollar modelos habitacionales asequibles. Entre las patentes que han realizado se encuentran los ladrillos y paneles hechos mediante el reciclado del tereftalato de polietileno.

Los ladrillos hechos con base en la molienda del PET no requieren hornos para su secado evitando así contaminantes por el uso de combustible en hornos. El PET se utiliza como reemplazo de la arena en la creación del concreto. Se tritura hasta obtener un material con un tamaño de partícula similar al de la arena gruesa. No es necesario que los envases se encuentren limpios ni se retiran de ellos las etiquetas y tapas por lo que el costo y tiempo de producción es bajo. Las partículas plásticas se mezclan con cemento Portland, luego se agrega agua con aditivos químicos incorporados. Cuando esta mezcla adquiere consistencia uniforme, se vierte en una máquina moldeadora de ladrillos o bloques. Se realiza la compresión de la mezcla utilizando una máquina rodante. Los bloques obtenidos se dejan en reposo durante un día y pasan a la etapa de curado con agua, en donde permanecen 7 días. Después de este tiempo, se almacenan en pilas cubiertas hasta cumplir los 28 días desde su elaboración. Luego son llevados a obra para su uso en mamposterías de elevación. El objetivo de esta práctica es construir elementos constructivos más ecológicos mediante tecnologías no contaminantes y reducción de residuos.



Ladrillo hechos con la trituración del PET

Paneles

En Argentina se desechan grandes volúmenes de cáscaras de cacahuate al año lo que ha generado un problema en su disposición final. Los investigadores de CEVE detectaron la posibilidad de dar un destino sustentable a un material considerado un desecho, incorporándolo, junto con el PET, a la fabricación de componentes constructivos. Las cáscaras de cacahuates, utilizadas como materia prima y combinadas con resina poliéster obtenida del reciclaje de envases de PET, brindan una alternativa para fabricar paneles livianos y aislantes, cuya aplicación puede ser dada en cielorrasos.

Las características fundamentales de este material están dadas por su bajo peso y buena capacidad de aislación térmica. En consecuencia, su aplicación es muy pertinente para el acondicionamiento de viviendas.



Paneles de cáscaras de cacahuate y PET

Con base en las experiencias realizadas hasta el presente se puede decir que el PET reciclado puede utilizarse de manera viable como reemplazo de los agregados pétreos de concretos comunes debido a que los elementos constructivos obtenidos tienen un bajo peso específico, suficiente resistencia, excelente aislación térmica, baja absorción de agua, buena apariencia, buen comportamiento a la intemperie, buena adherencia con los materiales tradicionales de revestimiento, bajo costo y cualidades ecológicas. Además esta práctica le da valor agregado al residuo ya que mediante estos procesos se convierte en materia prima.

2.2.1 Empleo del PET en la Geotecnia

En el aspecto específico de la ingeniería geotécnica el PET se emplea casi únicamente en la confección de geosintéticos, específicamente geotextiles y geomallas. En este campo, la utilización de PET reciclado es prácticamente nula, aunque algunas empresas luchan por aumentar dicha práctica.

Los polímeros más usados en la fabricación de geosintéticos en Estados Unidos de América son:

1. Polipropileno (PP) – 85%

2. Poliéster¹⁴ (PET) – 12%
3. Polietileno (PE) – 2%
4. Poliamida (Nylon) – 1%

La mayoría de los geotextiles son hechos de filamento de poliéster (PET), polipropileno (PP), fibra de vidrio, fibra de basalto, aramida, o fibras de carbono. Los usos típicos finales, como se mencionaron anteriormente, incluyen aplicaciones en carreteras, diques, y terraplenes de ferrocarriles, entre otros. El filamento de poliéster, hecho con base en el tereftalato de polietileno, se utiliza para la fabricación de los geotextiles no tejidos, los cuales tienen aplicaciones generales para funciones de barrera tales como filtración y separación.

En cuanto a las geomallas, uno de los tipos de esta estructura que existe actualmente en el mercado es la geomalla de poliéster de alto módulo elástico, la cual se utiliza principalmente como elemento de refuerzo. Esta geomalla se diseña y proyecta para proporcionar una estabilidad adecuada al conjunto constructivo mediante un refuerzo a largo plazo.

Estos materiales por su composición y fabricación poseen las siguientes características:

- Elevadas resistencias a tracción en rotura a corto plazo.
- Baja deformación en rotura.
- Excelente comportamiento a la fluencia.
- Interacción óptima con todo tipo de suelos gracias a su estructura.
- Fácil y rápida instalación
- Unión perfecta entre componentes evitando desgarros.

Otra aplicación que tienen las geomallas de poliéster es en la construcción de muros ecológicos. Este tipo de geomallas constan de estructuras planares de alta resistencia y durabilidad que se utilizan como refuerzo en la contención de los suelos.

Sus características más importantes son:

- Resistencia a la tracción: dependen de la geometría y sobrecargas previstas en la estructura.
- Resistencia a largo plazo: contempla los diferentes factores reductores debidos a la fluencia del material, ambientales y de instalación.
- Coeficiente de interacción con el suelo: adherencia efectiva de la armadura con el suelo circundante
- Permeabilidad: capacidad de flujo de agua

El resultado es una estructura compuesta con una mayor resistencia a la masa de suelo sin reforzar. El concepto de refuerzo tensional facilita la construcción de terraplenes, taludes y muros de tierra con pendientes superiores al ángulo de reposo de los suelos y alturas mucho mayores a la de su estabilidad natural. La construcción de taludes con grandes pendientes permite aumentar la superficie útil del terreno a la vez que reduce los costos de explotación y proporciona un aspecto natural.

¹⁴ El poliéster (C₁₀H₈O₄) es una categoría de polímeros que contiene el grupo funcional éster en su cadena principal. Los poliésteres que existen en la naturaleza son conocidos desde 1830, pero el término poliéster generalmente se refiere a los poliésteres sintéticos (plásticos), provenientes de fracciones pesadas del petróleo. El poliéster termoplástico más conocido es el PET.

Las ventajas que proporcionan los muros ecológicos son: a) económicas: los costos de construcción son inferiores a los de otros sistemas de contención; b) utilidad: aumenta significativamente la superficie del suelo aprovechable sin el empleo de costosos sistemas de contención; c) estética: permite la revegetación de la superficie exterior, integrándose con el medio natural; d) eficiencia: los muros ecológicos se construyen muy rápido y e) seguridad: la metodología de cálculo y diseño está ampliamente probada.

Geosintéticos fabricados mediante PET reciclado

Los avances en la producción de tecnología de reciclaje permiten producir fibra de alta calidad a partir de hojuela de PET o de mezcla de hojuela con fibra. Cuando se reciclan las botellas de PET se producen fibras uniformes. Dichas fibras se pueden procesar usando tecnología de punzonado por agujas. El resultado es la fibra de poliéster, que es un material sólido, con gran elasticidad y acolchonamiento. La fibra de poliéster obtenida es utilizada para la elaboración de varios productos que se utilizan en el mejoramiento de concretos y asfaltos.



Hilos de poliéster con PET reciclado

El tejido geotextil que está compuesto por fibra de hilos de poliéster fabricado con PET reciclado ha logrado alta resistencia a la tensión, alto módulo de elasticidad y baja elongación. Además está diseñado para ofrecer soluciones rentables y para cumplir con los requisitos de diseños especificados en las aplicaciones de separación, refuerzo, filtración, drenaje y amortiguación.

Este tejido es aplicado como refuerzo de estructuras, para aumentar la resistencia al cizallamiento del suelo, como Sistema de Estabilización Mecánica de las Paredes de Tierra (MSEW), refuerzo de taludes, refuerzo de terraplenes, mejoramiento de suelos blandos y otras aplicaciones de la ingeniería geotécnica.

Una de las empresas líderes en la utilización de PET reciclado para la fabricación de geosintéticos es ACE Geosynthetic Enterprise. Esta empresa no sólo proporciona una amplia gama de materiales geosintéticos, sino también participa activamente en los grupos de trabajo internacionales y comités de investigación. Uno de los productos que manejan es el ACETex, que es un geotextil fabricado a partir de tereftalato de polietileno reciclado.

ACETex es de estructura tejida con hilados de alta resistencia de PET. La alta resistencia de los geotextiles en poliéster llega a sobrepasar los 1000 kN/m. El ACETex de PET

mejora la resistencia del suelo y asegura la estabilidad de la estructura, lo que fortalece su fuerza de cizallamiento, la cohesión aparente y reduce su deformación. (ACE Geosynthetics)

3 CONCEPTOS GENERALES DEL POLIETILENO TEREFALATO (PET)

3.1 Introducción

El PET es una resina termoplástica que se obtiene mediante la reacción de dos petroquímicos secundarios, el ácido tereftálico y el monoetilenglicol. Ello da lugar a la formación de gránulos o pellets blanquecinos que se utilizan para fabricar principalmente envases. Empezó a ser utilizado como materia prima en fibras para la industria textil y la producción de película fotosensible.



Pellets de PET

El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo. Se compone de petróleo crudo, gas y aire. Según la Asociación Latinoamericana de la Industria Plástica, ALIPLAST, un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire.

Distintos estudios han demostrado que la botella de PET es muy competitiva por el bajo consumo de energía necesario en su producción y en la generación de residuos en comparación con otros materiales. Los envases de PET son más amigables con el ambiente en relación a los envases fabricados con diferentes materiales por ejemplo el vidrio y el aluminio. Por ser los envases de PET los más ligeros que existen en el mercado, contribuyen a la reducción en la generación de residuos, disminuyen el consumo de energéticos y materias primas no renovables en su fabricación. Además, debido a su menor peso, el consumo de combustible y la emisión de contaminantes durante su transporte es menor que cuando se comparan con envases equivalentes de vidrio (el segundo material más utilizado en la elaboración de envases para agua y refresco y el más recomendado por cuestiones de salud).

Un camión que transporta refresco en envase de vidrio lleva varias toneladas más de peso muerto que el que transporta botellas de PET (un envase de PET es aproximadamente 7 veces más ligero). Por esta razón se ahorra combustible y se emiten menos contaminantes.

En un estudio llevado a cabo por la Franklin Associates Limited se comparó la eficiencia en cuanto a energía consumida de envases equivalentes de diferentes materiales. El resultado indica que el envase de PET requiere menos energía que la necesaria para la producción de envases de aluminio y de vidrio. Además se observó que el impacto ambiental de los envases de PET es menor.

Igualmente el PET tiene una gran versatilidad tecnológica y dependiente del producto a envasar, de las condiciones del mercado (climatología, temperatura, humedad, condiciones de almacenamiento, nivel de automatización y de la calidad del envasado) y de su diseño, lo que permite optimizar el peso del envase y adecuarlo a las necesidades requeridas.

La tecnología de producción de envases ha permitido esta optimización en el peso de los envases sin detrimento de poner en el mercado una amplia colección de diseños atractivamente comerciales.

Además, hay tres maneras de aprovechar los envases de PET una vez que termino su vida útil. Someterlos a un reciclado mecánico, a un reciclado químico o emplearlos como fuente de energía.

El reciclado mecánico es el sistema más utilizado. Los envases se muelen, lavan y secan para obtener un producto en forma de hojuelas que tiene diversas aplicaciones. Se emplea por ejemplo para fabricar fibra textil para relleno, rodillos para pintar, peluches, filtros, alfombras, fleje, telas no tejidas, termoformados, lámina acanalada y hasta prendas para vestir como camisetas. Incluso para el envasado de alimentos a través del proceso de fabricación de envases con capas múltiples.

Para el reciclado químico se han desarrollado distintos procesos, algunos de ellos a escala industrial como la metanólisis y la glucólisis. En cuanto a utilizar el PET reciclado como fuente de energía, pruebas de laboratorio y campo realizadas en conjunto con Ecoltec y Cementos Apasco, muestran que el PET puede ser usado como combustible debido a su poder calorífico de 5,373 kcal/kg y sobre todo por su combustión eficiente, ya que de la misma se obtiene básicamente dióxido de carbono y vapor de agua y no se generan emisiones contaminantes.

De esta forma, la evolución tecnológica ha permitido el desarrollo de las siguientes etapas:

1. Sustitución de otros materiales y evolución del peso del envase de PET.
2. Evolución de materiales constituyentes o relacionados con el envase.
3. Impacto en la logística – distribución.
4. Desarrollo de la industria y de la tecnología de Reciclado.
5. Desarrollo de mercados usuarios de PET.

Historia

Durante la Segunda Guerra Mundial, los países involucrados sufrieron reducciones en sus suministros de materias primas. Debido a este hecho en diferentes países se iniciaron grandes programas de investigación que llevaron al desarrollo y producción de distintos materiales que sirvieran como restitución. Alemania, por ejemplo, que perdió sus fuentes

naturales de látex, inició una investigación que llevó al desarrollo de un caucho sintético utilizable.

A lo largo de esta época la industria de los plásticos demostró ser una fuente inagotable de sustitutos aceptables. Así, buscando un material para reemplazar las fibras naturales como el algodón y el lino, provenientes de Egipto, surgió el descubrimiento del Polietileno Tereftalato, PET.

El PET fue patentado como un polímero termoplástico por los químicos ingleses John Rex Whinfield y James Tennant Dickson en 1941 basándose en investigaciones del químico Wallace Carothers.

En 1929 Carothers sentó las bases para la fabricación de los poliésteres con sus estudios sobre la condensación de compuestos bifuncionales consiguiendo la síntesis de polímeros lineales.

Posteriormente Whinfield y Dickson, partiendo de ácidos aromáticos, desarrollaron poliésteres saturados con punto de fusión más alto dentro de los cuales se encuentra el PET.

A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra textil siendo ésta su primera aplicación, la cual continúa vigente. A mediados de la década de los 50's se utilizó para fabricar películas.

Alrededor de 1973 la industria del plástico buscaba desarrollar un material irrompible, ligero y transparente para producir botellas para bebidas carbonatadas. Investigaciones realizadas por el ingeniero Nathaniel Wyeth concluyeron en que el PET era el material más adecuado. Wyeth desarrolló un método de moldeo denominado inyección soplado biorientado. Mediante esta nueva tecnología fue posible el envasado de bebidas carbonatadas con plástico. Los primeros envases de PET aparecieron en el mercado alrededor del año 1977 convirtiéndose en el envase ideal para la distribución moderna.

A principios de la década de los 80's el PET atravesó por una expansión vertiginosa, en especial en el sector eléctrico/electrónico y automotriz, debido a la creciente demanda de productos más tenaces y carentes de deformación a una temperatura de uso permanente. Dicha expansión resultó en la existencia de diferentes grados de PET que permiten su uso como plástico de ingeniería para productos donde la resistencia térmica y dieléctrica, así como su apariencia superficial de alto brillo son importantes, por ejemplo diversos dispositivos para uso eléctrico, sustituyendo gran parte de las aplicaciones de las resinas fenólicas. Los grados de ingeniería generalmente se formulan con aditivos retardantes a la flama, fibras y cargas que imparten mejores propiedades de resistencia térmica y mecánicas al polímero.

Desde entonces el PET ha presentado un continuo desarrollo tecnológico basado en su gran crecimiento a nivel mundial y en la diversificación de sus posibilidades.

3.2 Proceso de fabricación del PET

Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Es un polímero plástico lineal, con un alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento. Como todos los termoplásticos puede ser procesado mediante extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado y estirado de preforma y termoconformado.

Para evitar el crecimiento excesivo de esferulitas (aglomeraciones esféricas) y lamelas de cristales este material debe ser rápidamente enfriado. Además con esto se logra una mayor transparencia.

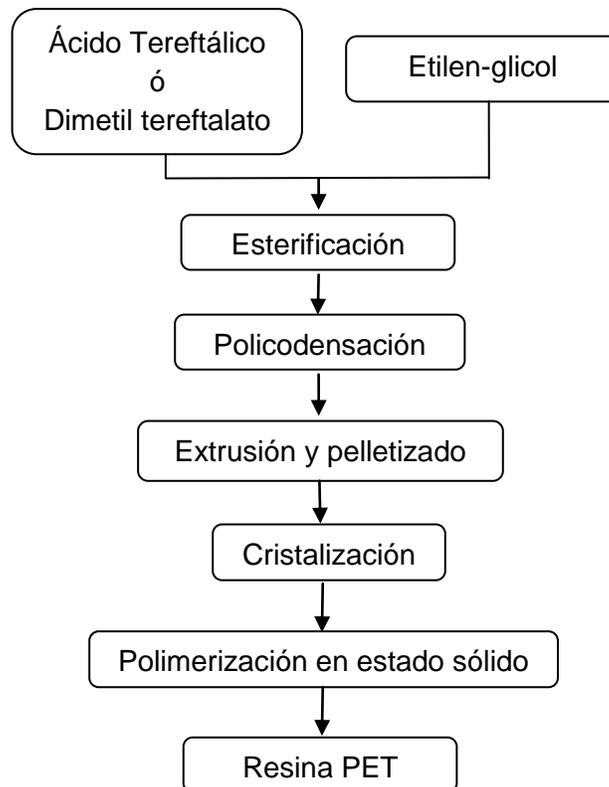
Producción de la resina PET

Existen dos rutas por las cuales se puede obtener el PET. Industrialmente se puede partir de dos productos distintos:

1. Ácido tereftálico, TPA
2. Dimetil tereftalato, DMT

Haciendo reaccionar TPA o DMT con glicol etilénico mediante el proceso de esterificación se obtiene un monómero, el cual en una fase sucesiva, por medio de policondensación, se polimeriza en resina PET. Ya teniendo la resina PET en estado sólido y amorfo se cristaliza y polimeriza con la finalidad de incrementar el peso molecular y la viscosidad. El resultado es la resina que se utiliza para los envases. El producto más comúnmente utilizado para la producción de dicha resina es el TPA.

La siguiente figura muestra el diagrama de producción de la resina PET:

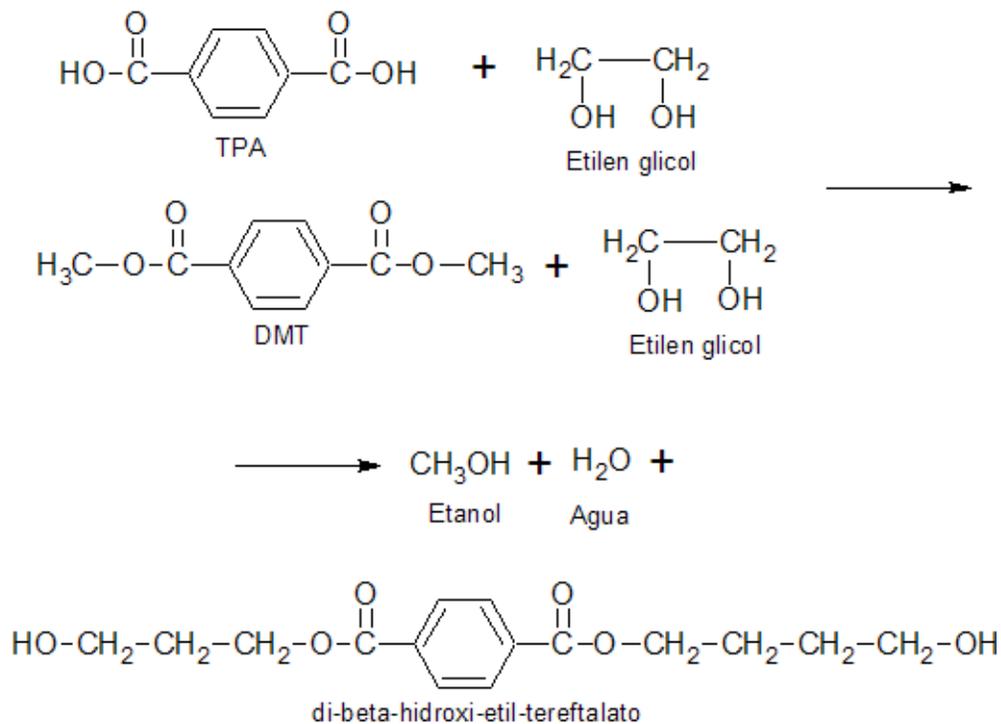


Esterificación

Se denomina esterificación al proceso por el cual se sintetiza un éster. Un éster es un compuesto derivado de la reacción química entre un ácido carboxílico y un alcohol.

El método más simple para la obtención del PET, es la reacción directa de esterificación del ácido tereftálico con el etilenglicol, formando el monómero bis-β-hidroxietil tereftalato, que posteriormente se somete a una policondensación para obtener un polímero de cadena larga.

En la reacción de esterificación se elimina agua en el proceso del TPA y metanol en el proceso del DMT.



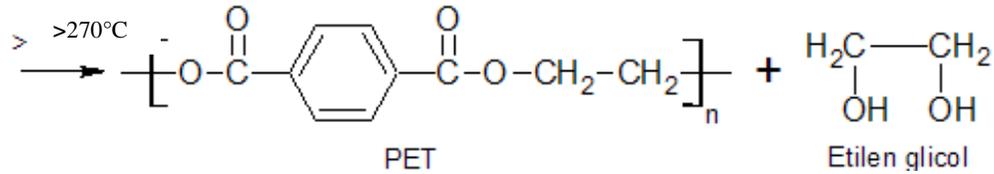
Proceso de esterificación

Policondensación

Mientras la reacción de esterificación tiene lugar por la eliminación del agua como subproducto, la fase de policondensación libera una molécula de etilenglicol cada vez que la cadena se alarga por una unidad repetida.

Conforme la cadena va alargándose existe un aumento en el peso molecular, el cual va acompañado por un aumento en la viscosidad de la masa proporcionando mayor resistencia química y mecánica. Para la fabricación de los diferentes grados de PET se emplea esta tecnología.

La eliminación del glicol etilénico es favorecida debido a que la policondensación se realiza en condiciones de alto vacío; el glicol recuperado se destila y vuelve al proceso de fabricación. La reacción de policondensación se facilita mediante catalizadores y elevadas temperaturas (arriba de 270°C).



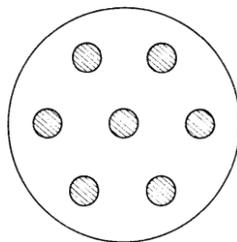
Proceso de policondensación

Extrusión y pelletizado

Una vez que se tiene la longitud de la cadena requerida y la masa del polímero ha alcanzado la viscosidad deseada (registrada en un reómetro adecuado) se rompe el vacío introduciendo nitrógeno. En este punto se detiene la reacción de policondensación y la presencia del nitrógeno evita fenómenos de oxidación.

La masa fundida por efecto de una suave presión ejercida por el nitrógeno es obligada a pasar a través de una extrusora con un dado de orificios múltiples para obtener hilos en forma de spaghetti que, cayendo en una batea con agua, se enfrían y consolidan. Los hilos son cortados en un pelletizador reduciéndose así a gránulos, los cuales, tamizados y desempolvados, se envían al almacenamiento y fabricación.

El gránulo obtenido es brillante y transparente debido a que es amorfo y tiene baja viscosidad, o sea un bajo peso molecular. Sus valores de viscosidad intrínseca, I.V., van de 0.55 a 0.65. Para volverlo apto para la producción de botellas son necesarios otros dos pasos: la cristalización y la polimerización en estado sólido.



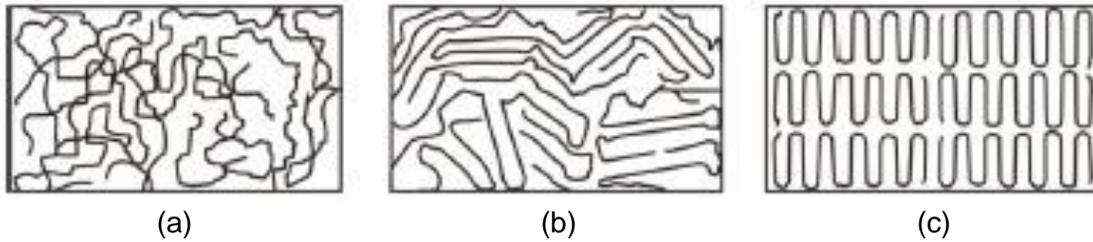
Dado de extrusión

Cristalización

Con este término se describe el cambio de estructura de los polímeros amorfos o semicristalinos que consiste en el fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura en la cual su disposición espacial es desordenada (estructura amorfa,

transparente a la luz) a una estructura uniforme y ordenada (estructura cristalina, opaca a la luz) que le confiere a la resina una coloración blanca lechosa. El proceso industrial consiste en un tratamiento térmico a 130 - 160 °C durante un tiempo que puede variar de 10 minutos a una hora, mientras el gránulo, para evitar su bloqueo, es mantenido en agitación por efecto de un lecho fluido o de un movimiento mecánico.

Los términos cristalino y amorfo se utilizan normalmente para indicar las regiones ordenadas y desordenadas de los polímeros, respectivamente. La siguiente figura muestra un esquema de un sistema amorfo, uno semicristalino y uno cristalino.



Sistemas amorfo (a), semicristalino (b) y cristalino (c)

Con la cristalización, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm³ en estado amorfo a 1.40 g/cm³ en estado cristalino. Además este proceso permite lograr la resistencia térmica.

Polimerización en estado sólido o Post polimerización

En cuanto al PET grado botella, los pellets solidificados tienen 2 factores que limitan su uso en la industria y como consecuencia se requiere de un proceso final en la fase de fabricación.

Dichos factores son:

- Posee alto contenido de acetaldehído
- Tiene bajo peso molecular

El proceso final mencionado recibe el nombre de polimerización en estado sólido; consiste en calentar el granulado en una atmósfera inerte con lo que se mejoran simultáneamente las dos propiedades proporcionando mayor facilidad y eficiencia en el proceso de producción y calidad de la botella.

Este proceso es una fase ulterior de polimerización del PET. El gránulo cristalizado se carga en un reactor cilíndrico en cuyo interior es sometido a un flujo de gas inerte (nitrógeno) a temperatura elevada (sobre los 200 ° C) durante tiempos muy largos.

Este tratamiento produce una reacción de polimerización que hace aumentar posteriormente el peso molecular de la resina hasta los valores correspondientes de I.V.

idóneos (0.72 – 0.86) para la fabricación de la botella. El aumento de la viscosidad intrínseca es directamente proporcional al aumento del peso molecular.

En esta reacción, mientras se ligan las moléculas, es eliminado parte del acetaldehído que se forma en la primera polimerización. Un buen polímero tiene valores de acetaldehído inferiores a 1 ppm.

De estos reactores se descarga PET de elevado porcentaje de cristalinidad (> 50) con viscosidad adecuada para grado botella.

Producción de los envases

Para muchas aplicaciones el PET se procesa primeramente en estado amorfo. Cuando se tiene la resina en dicha fase, para mejorar sus propiedades y hacerla apta para transformarla en diversos productos, se le proporciona una orientación uniaxial cuando se fabrican fibras, cintas y lámina por ejemplo, o, como en el caso de las botellas una orientación biaxial.

La resina se presenta en forma de pellets, los cuales, secos se funden e inyectan a presión en máquinas de cavidades múltiples de las que se producen las preformas que son recipientes aún no inflados y que sólo presentan la corona de la botella en forma final.

Después, para conferirles la orientación biaxial, las preformas son sometidas a un proceso de calentamiento preciso y gradual, posteriormente se colocan dentro de un molde y se les estira por medio de una varilla o pistón hasta alcanzar su tamaño definitivo, entonces se les infla con aire a presión hasta que toman la forma del molde y se fabrica el envase típico.

Gracias a este proceso, las moléculas se acomodan en forma de red. Esta disposición da al material propiedades de alta resistencia mecánica, química, baja permeabilidad a gases y vapores, larga vida útil, cerrado hermético y ligereza entre otros.

Son estas características las que lo han convertido en un material ideal para el empaque y embalaje de algunos productos ya que no requieren de cuidados especiales para su distribución.

El proceso para la producción de envases es el siguiente:

- 1) Secado de la resina
- 2) Extrusionado del PET (250 – 320°C)
- 3) Inyección del PET
- 4) Formación de las preformas
- 5) Enfriado de las preformas
- 6) Empaquetado y almacenamiento de las preformas
- 7) Soplado y moldeo de preformas



Proceso de elaboración de los envases de PET

Tratamiento previo

Antes de que el PET sea moldeado por cualquiera de los procesos existentes es necesario que reciba un tratamiento previo.

El PET requiere un secado antes del proceso de moldeo ya que se caracteriza por ser un material con alto grado higroscópico, esto es, que absorbe humedad del medio ambiente. Durante el almacenaje la resina absorbe humedad hasta alcanzar el equilibrio. Este valor es de 0.6% en peso. Pero si se mantiene en empaques cerrados no absorbe niveles de humedad mayores al 0.2%.

Para fabricar un buen producto de PET se requiere que la humedad sea menor de 0.004% y de ser posible hasta 0.003% antes de inyectar el material. La razón del secado es que el agua a la temperatura de fusión causa la degradación hidrolítica¹⁵ del polímero lo que implican la obtención de piezas frágiles.

Preformas

Como se mencionó anteriormente el proceso de transformación de los envases de PET comienza con la fabricación de preformas. Éstas se obtienen cuando los chips secos de

¹⁵ Al entrar en contacto el material con un medio acuoso, el agua penetra en la matriz polimérica y provoca hinchamiento, ruptura de puentes de hidrógeno intermoleculares, hidratación de las moléculas y finalmente la hidrólisis de los enlaces inestables. (Hidrólisis: reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química).

La ruptura por hidrólisis de los grupos funcionales puede ocurrir tanto en los grupos de la cadena principal como en los sustituyentes laterales. Sin embargo, el concepto degradación de polímeros se asocia a una disminución del peso molecular.

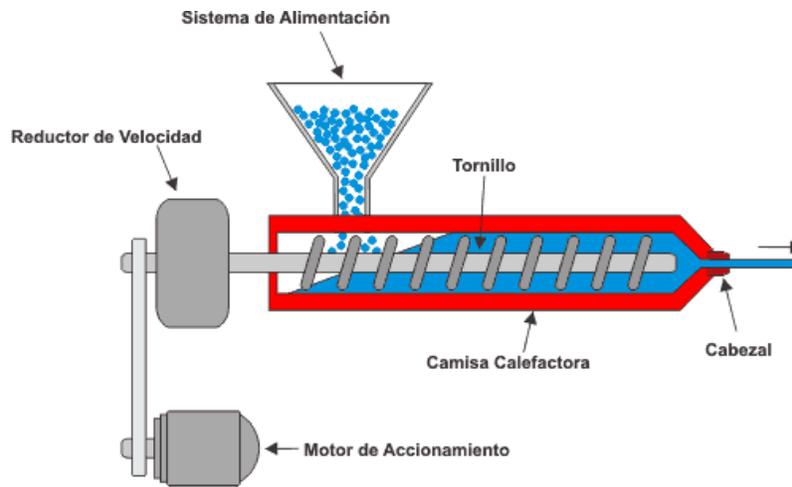
resina PET se funden a un rango entre 250 y 320 °C y mediante un proceso de extrusionado se inyectan a presión en máquinas inyectoras de cavidades múltiples (16", 32", 64", etc.).



Preformas de PET

Proceso de extrusión e inyección

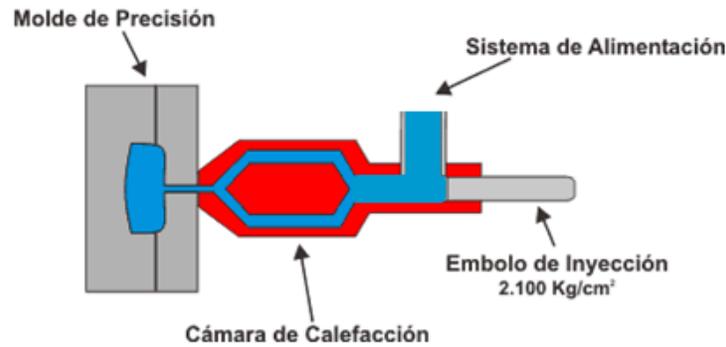
En el moldeo por extrusión los pellets se vuelcan en una tolva que desemboca en un transportador de tornillo helicoidal. Los pellets son trasladados a través de la cámara de calentamiento hasta la boca de descarga en una corriente continua. El polímero emerge de la matriz de extrusión en un estado blando. Al salir de la boquilla se inicia la fase de inyección con aire comprimido que lo expande hasta tomar la forma del molde de la preforma.



Proceso de extrusión para la producción de preformas

El moldeo por inyección consiste en introducir el polímero en estado fundido en un molde frío cerrado a presión. En ese molde el material se solidifica. La pieza o parte final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza moldeada. La inyección de preformas es el proceso que da una alta uniformidad de dimensiones en corona y peso a los envases.

El proceso consiste en un émbolo o pistón de inyección que se mueve rápidamente hacia adelante y hacia atrás para empujar el plástico ablandado. Bajo la acción combinada del calor y la presión ejercida por el pistón de inyección, el polímero se vuelve lo bastante fluido como para llegar al molde frío donde toma forma la pieza en cuestión. Pasado un tiempo breve dentro del molde cerrado el plástico se solidifica, el molde se abre y la pieza es removida. La pieza final es estable y el ritmo de producción es muy rápido, de escasos segundos.



Proceso de extrusión e inyección de preformas

Moldeo de las preformas

El PET es un polímero termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. Como se explicó anteriormente, los procesos de extrusión e inyección se utilizan para la fabricación de las preformas. En cuanto al proceso de termoformado, éste se utiliza para la producción de envases de alimentos y bandejas principalmente; pero casi no es utilizado en la producción de botellas para bebidas carbonatadas o agua que son las que interesan en este estudio. Aún así, se da una breve explicación del proceso a continuación ya que algunas botellas son moldeadas a partir de él.

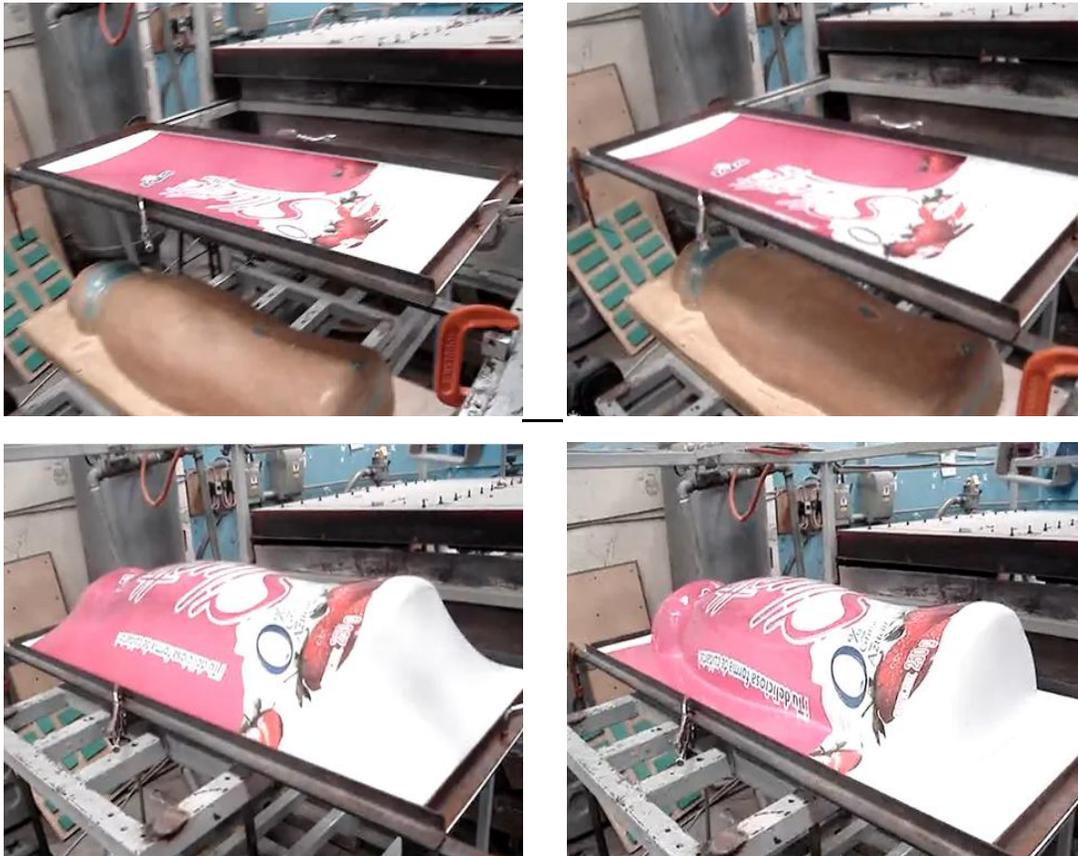


Productos de PET moldeados mediante termoformado

Proceso de Termoformado

A diferencia de otros procesos como la inyección y la inyección-soplado, el termoformado parte de una lámina rígida de espesor uniforme realizada por el proceso de extrusión.

Este proceso consiste en dar forma a una lámina plástica mediante calor y vacío. La lámina se calienta a una temperatura que varía de 120 °C a 180 °C. Posteriormente se le aplica vacío (600 a 760 mmHg) tomando así la forma del molde sobre el que se coloca. Se debe tener precaución durante el moldeo ya que un exceso de temperatura puede "fundir" la lámina y la falta de calor o una mala calidad de vacío incurrirá en una pieza defectuosa y sin detalles definidos.

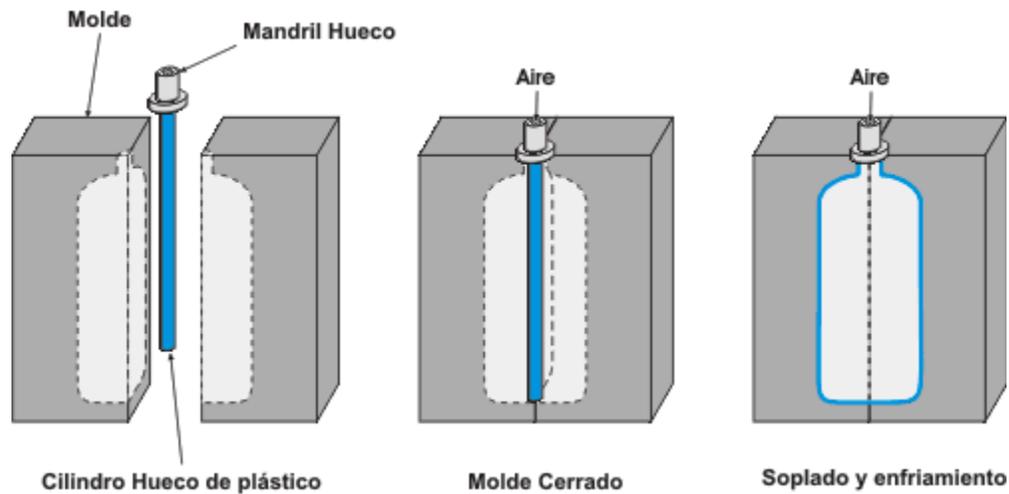


Producción de envase mediante proceso de termoformado

Moldeo por inyección-soplado

El moldeo por inyección-soplado es un proceso usado para hacer formas huecas (botellas, recipientes). Consiste en la obtención de una preforma del polímero a procesar. Posteriormente la preforma se calienta y se introduce en el molde que alberga la geometría deseada. Después se inyecta aire a presión con lo que se consigue la expansión del material y la forma final de la pieza. Por último se procede a su extracción.

En muchas ocasiones es necesario modificar el espesor de la preforma, ya sea para conseguir una pieza con diferentes espesores o para lograr un espesor uniforme en toda la pieza, pues en la fase de soplado no se deforman por igual todas las zonas del material. La ventaja de usar preformas consiste en que éstas se pueden inyectar, almacenar y producir en diferentes colores y tamaños, los cuales pueden hacerse en lugares distintos a aquel en donde se realizará el soplado. Las preformas son estables y pueden ser sopladas a velocidad alta según la demanda requerida.



Producción de envase mediante proceso de inyección-soplado

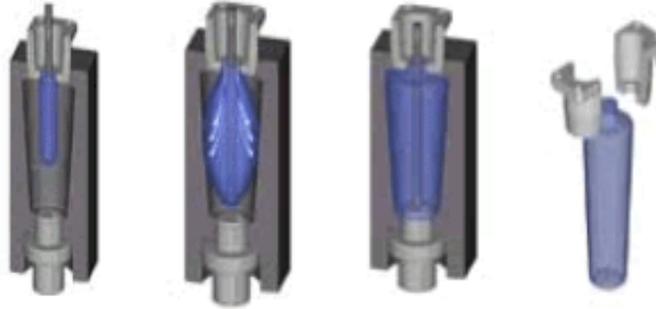
Proceso de inyección soplo biorientado o de inyección-soplado-estirado

El proceso de inyección soplo biorientado es el más utilizado en la actualidad para la producción de envases. Se trata de un proceso en el cual se produce una modificación de la estructura molecular del PET. La estructura amorfa pasa a convertirse en otra de tipo laminar, en la cual las moléculas conservan su entrelazamiento mientras son realineadas. Consiste en el estiramiento de las cadenas moleculares en dos direcciones (a 90° una de otra), la axial y la radial.

El primer paso es el acondicionamiento de una preforma. Las preformas se someten a un proceso de calentamiento preciso y gradual para después ser introducidas en la unidad de biorientación a estrictas condiciones de temperatura y presión. La preforma se expande mediante aire a presión en su circunferencia contra las paredes de la cámara mientras que, al mismo tiempo, es estirada en dirección axial por medio de una varilla hasta que toma la forma del molde.

El resultado final es un tubo con el diámetro nominal requerido y un espesor determinado que le permite soportar la presión deseada.

La orientación molecular confiere unas propiedades especiales al material y permite una notable mejora de las propiedades físico-mecánicas del envase obtenido. Además los envases obtenidos son ligeros, transparentes, brillantes, no alteran las propiedades del contenido, resistentes al impacto y no son tóxicos.



Producción de envase mediante proceso de inyección sople biorientado

Mediante un diagrama de flujo, se describe el proceso completo de producción de un envase de PET, considerando desde la materia prima hasta el producto terminado.

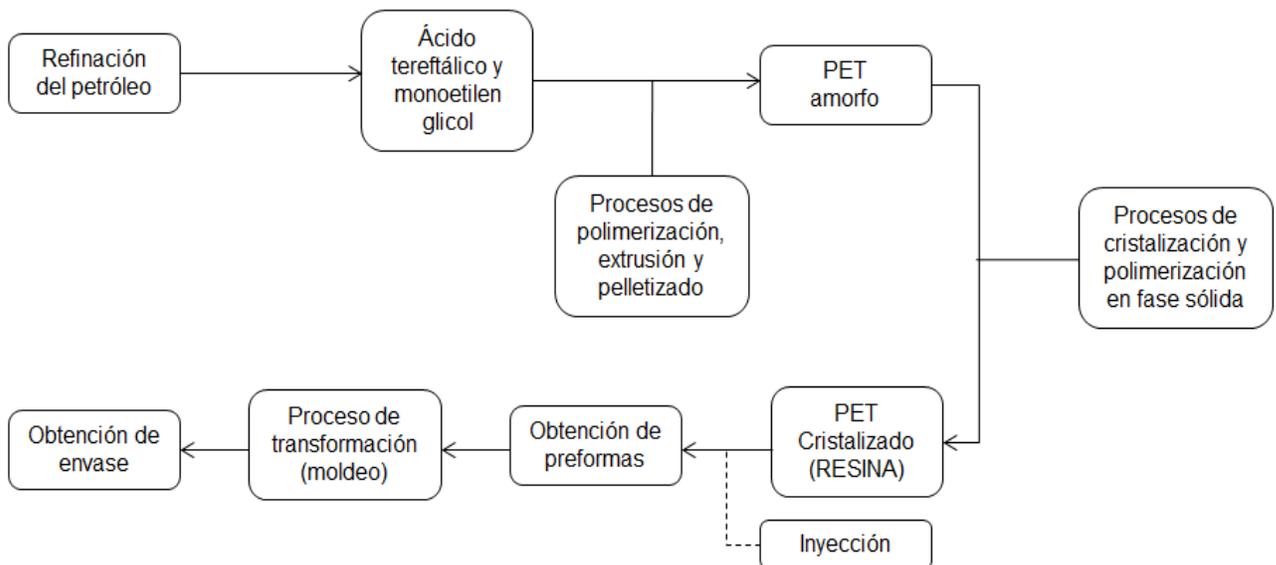


Diagrama de flujo para la obtención de PET

3.3 Estructura del PET

El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático.

Poliéster

Los poliésteres son polímeros que contienen eslabones éster $-CO-O$ en su estructura molecular; estos pueden ser termoplásticos o termoestables dependiendo de su composición química.

Un termoplástico es un material que a temperatura ambiente es deformable, pero que en presencia de calor se ablanda convirtiéndose en un líquido maleable que se endurece en un estado vítreo cuando se enfría suficiente, pudiéndose moldear con nuevas formas que se conservan al enfriarse. Presenta este comportamiento debido a que sus macromoléculas están unidas por fuerzas débiles que se rompen con el calor.

Los plásticos termoestables son materiales que una vez que han sufrido el proceso de calentamiento-fusión y formación-solidificación, se convierten en materiales rígidos que no vuelven a fundirse. La disposición microscópica de sus cadenas confiere a la estructura una organización espacial similar a la de una red, por lo que la estructura macroscópica resultante es muy compacta y de gran rigidez. Estos materiales presentan respecto al resto de los plásticos una mayor resistencia térmica por lo que al aportar más calor no logra romperse la estructura de cadenas. No obstante, su fragilidad es inversamente proporcional a la resistencia térmica. Efectivamente, la resistencia térmica viene dada por la mayor compactación de las cadenas, pero ese mismo mayor empaquetamiento da lugar a una posibilidad de rotura mayor debido a que las cadenas difícilmente pueden absorber un impacto por estiramiento ya que su libertad de movimiento no es muy alta.

Termoplásticos

Consisten en macromoléculas lineales o ramificadas, unidas unas con otras mediante fuerzas intermoleculares.

Los termoplásticos se caracterizan por transformarse de sólido a líquido y viceversa por acción del calor, se disuelven o por lo menos se hinchan al contacto con solventes. La capacidad de los termoplásticos de reblandecerse o fundirse tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, pueden moldearse por calor, es decir, una lámina o un tubo puede pasar a un estado elástico, similar al de la goma blanda, y adquirir nueva forma después de enfriarla en un molde. Además, los termoplásticos pueden soldarse y sus desechos son reciclables.

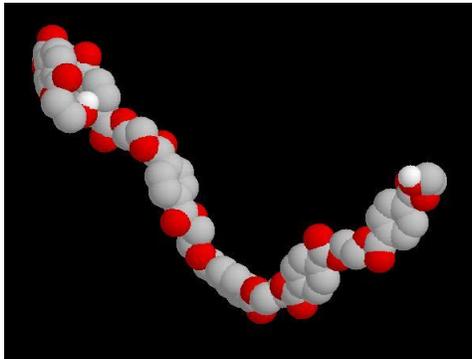
Las desventajas consisten en que el reblandecimiento provocado por el calor limita en gran manera sus temperaturas de uso, sobre todo cuando se someten a la acción simultánea de fuerzas mecánicas.

Poliéster termoplástico

El PET está dentro de la familia del poliéster termoplástico. Como se mencionó anteriormente esta familia de polímeros cuenta con la presencia de eslabones éster. Estos grupos pueden destruirse con la presencia de moléculas de agua a elevadas temperaturas, generando una reacción de hidrólisis, por lo que estos plásticos deben procesarse en un estricto estado seco. A temperatura ambiental no se ven afectados por la humedad y, en particular, la baja absorción de agua contribuye a su buena estabilidad dimensional.

PET

El polietilentereftalato es un polímero perteneciente al grupo de los poliésteres saturados y aromáticos. Se le denomina poliéster aromático – alifático. Junto con el polibutilentereftalato (PBT) es el poliéster con mayor producción.

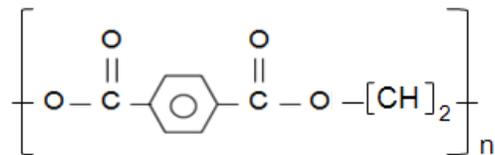


Molécula de PET

El PET es una resina poliéster de glicol etilénico y ácido tereftálico. Dicho plástico se clasifica en función de la viscosidad intrínseca, la cual es directamente proporcional a su peso molecular, y de la modificación polimérica que reduce la velocidad de cristalización y el punto de fusión.

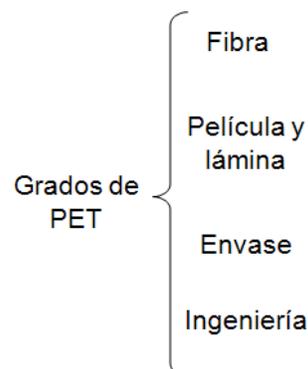
Se clasifica como una resina sintética termoplástica o un polímero termoplástico semicristalino.

La estructura química del PET es la siguiente:



Clasificación

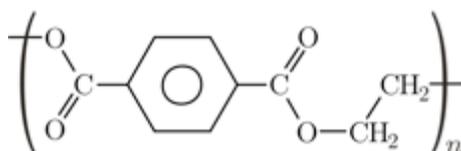
En la industria se conoce mejor este tipo de material por su grado y aplicación que está en función de la cristalinidad, del peso molecular y en consecuencia de la viscosidad intrínseca. El PET por su baja velocidad de cristalización y en función de las condiciones de operación en la transformación, se puede encontrar en estado amorfo (A-PET) o semicristalino (C-PET) con un 30 a 40% de cristalinidad, lo que quiere decir que el PET es un plástico cristalizabile.



Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, aquellos de mayor peso molecular, grado ingeniería. El peso molecular del PET grado envase se encuentra intermedio entre el grado película y el grado ingeniería. A mayor peso molecular, mejores propiedades mecánicas. En cuanto a la cristalinidad, los que la poseen en mayor nivel son para el grado ingeniería; para lámina y botella se utiliza el grado amorfo.

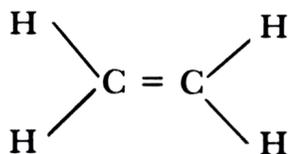
Estructura química

La resina PET es un poliéster termoplástico compuesto por cadenas de tereftalato de polietileno.

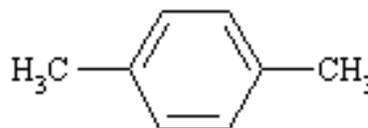


Unidad repetitiva de PET

Se fabrica a partir de dos materias primas derivadas del petróleo: el etileno ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$) y el paraxileno.

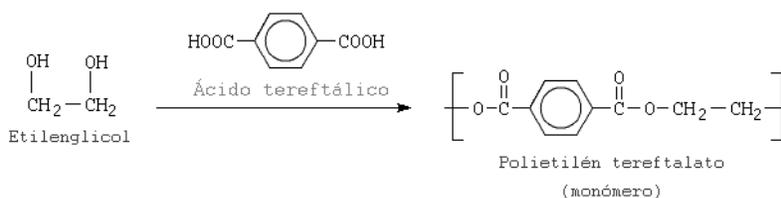


Molécula del etileno



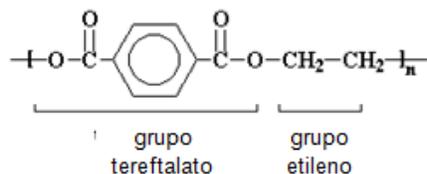
Molécula de paraxileno

El etileno se transforma en etilenglicol ($\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$) y el paraxileno se utiliza para producir ácido tereftálico. Ambos productos se ponen a reaccionar a altas temperaturas y bajo condiciones especiales de presión para obtener la resina PET en estado sólido y amorfo. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET se obtiene mediante la condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel primario en las fibras y materiales de moldeo.



Obtención del PET

Compuestos del PET



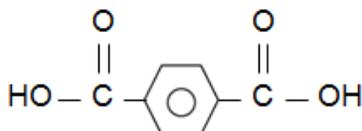
Ácido tereftálico

Propiedades

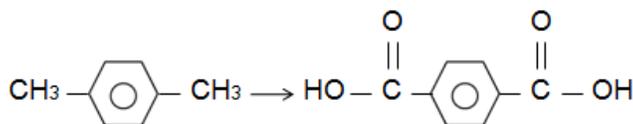
Se presenta en forma de cristales o polvo blanco; es insoluble en agua, cloroformo, éter y ácido acético. Ligeramente soluble en alcohol y soluble en álcalis, es poco combustible y tóxico. Sublima¹⁶ a temperaturas entre 300 y 425 °C.

Estructura

También llamado ácido paraftálico o ácido benceno-p-dicarboxílico, es del tipo aromático donde los radicales carboxilos se encuentran en posición *para*, en lados opuestos:

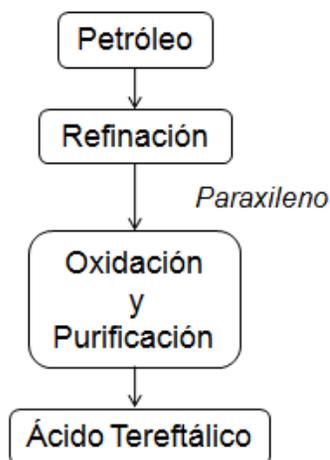


La siguiente figura muestra el diagrama de producción del ácido tereftálico a partir del paraxileno por medio de una oxidación. La reacción es:



Reacción de oxidación

¹⁶ El punto de sublimación de una sustancia es la temperatura a la cual dicho compuesto pasa de la fase sólida a la fase gaseosa directamente, sin pasar por la fase líquida.



Obtención del ácido tereftálico

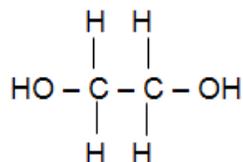
Etilenglicol

Propiedades

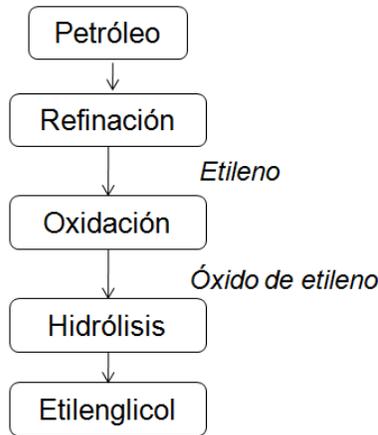
Es un líquido transparente, incoloro, de sabor dulce, higroscópico y poco volátil. Es soluble en agua, alcohol y éter. Baja el punto de congelación del agua, usándose como base en los anticongelantes.

Estructura

Conocido también con el nombre de alcohol etilénico, glicol ó 1, 2-etanodiol. Es el glicol más simple, tiene dos radicales oxidrilo, uno en cada átomo de carbono como se puede observar en su estructura:



La obtención del etilenglicol parte del etileno, que se obtiene de la refinación del petróleo. Posteriormente, se lleva a cabo una oxidación para obtener el óxido de etileno y finalmente, a través de hidrólisis se obtiene el etilenglicol. La siguiente figura representa el proceso de producción.

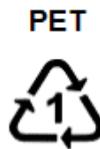


Obtención del etilenglicol

Polietileno de Tereftalato

El Polietileno Tereftalato es un polímero plástico lineal. Es extremadamente duro, resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos y tiene buenas propiedades dieléctricas. Proporciona una gran resistencia a la degradación por impacto y resistencia a la tensión.

El PET es un plástico de alta calidad que se identifica con el número uno, o las siglas PET, rodeado por tres flechas en el fondo de los envases fabricados con este material, según el sistema de identificación de la SPI (Sociedad de Industrias del Plástico).



Es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua. Su punto de fusión es alto.

3.4 Propiedades físicas del PET

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material ha alcanzado un desarrollo relevante en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas para refresco y agua.

Entre las características más importantes que presenta se encuentran:

- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes
- Alta resistencia al desgaste y corrosión
- Buen coeficiente de deslizamiento

- Buenas propiedades térmicas
- Totalmente reciclable
- Ligero
- Resistencia y rigidez elevadas
- Buena resistencia a la fluencia
- Elevada dureza de la superficie
- Gran estabilidad dimensional
- Buen comportamiento como aislante eléctrico

3.4.1 Densidad

La densidad es la cantidad de materia que tienen los materiales plásticos por unidad de volumen. Infiuye en el peso de los productos plásticos y en la productividad de un proceso. La densidad es un factor económico que vuelve favorable la aplicación de un plástico sobre otro. El transformador compra kilogramos de material y vende unidades terminadas.

DENSIDAD		
Amorfo	1.33 / 1.37	g/cm ³
Semicristalino	1.45 / 1.51	g/cm ³
Densidad aparente	0.85	g/cm ³

3.4.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica es la cantidad de calor que transmiten los materiales plásticos a través de ellos. Con esta propiedad se conoce si el material tiene un buen aislamiento térmico, siendo mejores los que presentan valores bajos. El PET presenta un valor de conductividad térmica de 0.24 W/mK.

3.4.3 Absorción de agua

Es la cantidad de agua que los plásticos tienden a retener, reflejándose en un aumento de peso en la muestra, después de estar en contacto continuo con un ambiente húmedo. Es importante esta característica al fabricar las piezas, ya que a valores altos de absorción, los plásticos varían considerablemente sus dimensiones.

ABSORCIÓN DE AGUA		
Absorción de agua ASTM	0.16	%
Absorción de agua 24 hr	< 0.7	%
Absorción de agua al equilibrio	0.1	%

3.4.4 Permeabilidad

En el envasado en plástico, particularmente en el sector alimentario, no se piensa en un envase con larga duración, que exigiría una hermeticidad total y un proceso de esterilización; es decir el envasado con plásticos, queda fuera del alcance del tiempo de una conserva o un congelado. El objetivo es el incremento de la conservación en un tiempo comparativamente muy limitado, pero sin perder la referencia de que suele tratarse de alimentos frescos, requiriendo éstos de un material con buenas propiedades de barrera.

La cualidad como barrera de un material viene definida y se cuantifica por la característica contraria: la permeabilidad. La permeabilidad que se mide en el envasado con plásticos es la cantidad de un determinado gas, generalmente oxígeno y vapor de agua (humedad) aunque con frecuencia también dióxido de carbono y nitrógeno, que traspasa el material por una determinada unidad de superficie, en un determinado tiempo y bajo unas determinadas condiciones. Cuanto menor es la permeabilidad a un gas, mayor es su barrera al mismo. El PET presenta muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.

La siguiente tabla muestra los valores de permeabilidad del PET.

Oxígeno 23°C, 100% RF	2
Nitrógeno 23°C, 100% RF	9
Permeabilidad al vapor de agua	0.9
Dióxido de carbono	5.1

3.4.5 Comportamiento frente a la temperatura

Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70 grados centígrados. Se han logrado mejoras modificando los equipos para permitir llenado en caliente. La temperatura máxima a la que el PET presenta resistencia es de 71 °C. El PET cristalizado (opaco) es una excepción ya que tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230 °C.

Dentro de la industria del envasado con PET la temperatura de transición vítrea y la temperatura de servicio son propiedades sumamente importantes. La temperatura de transición vítrea, T_g, es la temperatura en la que un material vítreo (vidrios, polímeros y otros materiales inorgánicos amorfos) deja de ser rígido y comienza a ablandarse. Es un punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido del material. Mientras que la temperatura de servicio es la temperatura máxima a la que se puede manipular un plástico sin que pierda alguna de sus propiedades.

Debido a que el PET tiene una temperatura de transición vítrea baja, los productos fabricados con dicho material no pueden calentarse para su esterilización y posterior

reutilización, por lo que el PET reciclado sólo puede utilizarse en un bajo porcentaje en la fabricación de nuevos envases para alimentos y bebidas.

La siguiente tabla resume el comportamiento que presenta el PET frente a la temperatura:

CONCEPTO	VALOR	UNIDAD
Punto de fusión	250 / 260	°C
Punto de ablandamiento según la prueba Vicat B	170	°C
Calor específico	1.04 / 1.05	kJ/(kg*K)
Coefficiente de expansión lineal	$< 6.10^{-5}$	°C ⁻¹
Temperatura de transición vítrea	80	°C
Expansión térmica	70	E-6/K
Temperatura de servicio	-40 / 100	°C

3.4.6 Comportamiento frente a factores atmosféricos

Este polímero no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos por lo que presenta buena estabilidad a la intemperie. Aún así, cuando los envases tienen una exposición prolongada al aire libre pierden su tonicidad, se fragmentan y dispersan. Las botellas enterradas duran más.

La exposición que deben tener los envases en el exterior para presentar fragmentaciones no se conoce con exactitud. Según ensayos realizados en el Centro Experimental de la Vivienda Económica en Argentina, en donde placas y mampuestos fabricados con PET reciclado fueron dispuestos a la intemperie, el PET resultó ser un material con excelente resistencia a los efectos del ambiente. Las placas y mampuestos estuvieron expuestos durante dos años, sometidos a la lluvia, al sol y a otras inclemencias del clima, sin presentar alteraciones dimensionales ni daños aparentes. Debido a los resultados obtenidos, investigadores argentinos realizaron en el laboratorio del Instituto Nacional de Tecnología Industrial un ensayo de envejecimiento acelerado a elementos hechos con PET, utilizando el método de Q.U.V Panel. El resultado obtenido muestra que los elementos probados son resistentes a la acción de los rayos ultravioleta y a los ciclos de humedad, observándose una disminución de resistencia a la compresión posterior al envejecimiento del orden del 25 %.

3.5 Propiedades químicas

Debido a sus propiedades químicas el PET representa un material con propiedades de resistencia muy buenas para alcoholes y aceites esenciales, además de una alta resistencia a diversos agentes químicos. Tiene buena resistencia general, en especial a grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes. En contra parte, presenta poca

resistencia a solventes halogenados, aromáticos, cetonas de bajo peso molecular y bases.

El PET es resistente a multitud de agentes químicos agresivos los cuales no son soportados por otros materiales. A continuación se muestra su resistencia a diversos químicos.

Alcoholes

Metanol	muy resistente
Etanol	muy resistente
Isopropanol	resistente
Ciclohexanol	muy resistente
Glicol	muy resistente
Glicerina	muy resistente
Alcohol bencílico	resistente

Aldehidos

Acetaldehído	muy resistente
Formaldehído	muy resistente

Hidrocarburos

Benceno	resistente
Tolueno	resistente
Xileno	resistente
Hidrocarburo alifático	resistente
Gasolina	resistente
Aceite mineral	resistente

Hidrocarburos clorados

Tetracloruro de carbono	muy resistente
Cloroformo	resistente
Difenil clorado	muy resistente
Tricloro etileno	muy resistente

Disolventes

Éter	muy resistente
Acetona	no resistente
Nitrobencono	no resistente
Fenol	no resistente

Ácidos

Acido formica	muy resistente
Acido acético	muy resistente
Acido Clorhídrico 10 %	resistente
Acido Clorhídrico 30 %	resistente
Acido Fluorhídrico 10 y 35 %	muy resistente
Acido Nítrico 10 %	muy resistente
Acido Nítrico 65 y 100 %	no resistente
Acido fosfórico 30 y 85 %	muy resistente

Acido sulfúrico 20%	resistente
Acido sulfúrico 80 % o más	no resistente
Anhídrido sulfuroso seco	muy resistente
Dióxido de azufre gaseoso (seco)	no resistente

Soluciones alcalinas acuosas

Hidróxido amónico	no resistente
Hidróxido cálcico	resistente
Hidróxido sódico	no resistente

Soluciones salinas

Dicromato	muy resistente
Carbonatos alcalinos	muy resistente
Cianuros	muy resistente
Fluoruros	muy resistente
Bicarbonato	resistente

Sustancias varias

Cloro	muy resistente
Agua	muy resistente
Peróxido de hidrógeno	muy resistente
Oxígeno	muy resistente

Esteres

Acetato Etilico	resistente
-----------------	------------

3.6 Propiedades biológicas

El PET es un material resistente a la degradación por microorganismos (biodegradación) ya que éstos no tienen mecanismos para atacarlo. Debido a esta característica no representa un medio adecuado para la proliferación de hongos, parásitos o bacterias de putrefacción. Es resistente al ataque de polillas, roedores e insectos. Al no ser un elemento biodegradable, mantiene su inalterabilidad en el tiempo, lo que le proporciona una larga vida útil. Aunado a esto, el PET es inodoro, reciclable y no contiene componentes tóxicos como otros plásticos.

Estudios recientes llevados a cabo en diferentes países señalan que, dentro de poco tiempo, será realidad una nueva forma de degradación de los envases de PET por una vía microbiológica. En el Instituto Tecnológico de Kyoto el investigador Kohei Oda consiguió que envases PET fuesen degradados en tan sólo ocho semanas por un consorcio de bacterias y, en la mitad de ese tiempo, por una bacteria específica aislada de ese consorcio. Las bacterias identificadas por él metabolizan poliésteres como el PET (2007).

En México, científicos de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del Instituto Politécnico Nacional, liderados por el Dr. Claudio Garibay Orijel, lograron mediante pruebas in vitro que consorcios formados por hongos y bacterias degradaran a uno de los principales compuestos del PET: el ácido tereftálico (2009).

4 COMPORTAMIENTO BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN ESTÁTICA

4.1 Introducción

Las técnicas de mejoramiento de suelos no son muy generalizadas debido a su elevado costo y tiempo de ejecución. Es por esto que se trata en lo posible de no proyectar construcciones sobre terrenos inapropiados, pero en algunas ocasiones no es posible elegir un mejor sitio. La gran actividad en el sector de la construcción en los países industrializados y en vías de desarrollo ha motivado un continuo incremento de los costes y una progresiva escasez de los terrenos edificables. Ello hace que cada día con más frecuencia sea necesario levantar construcciones de mayor tamaño sobre terrenos con baja capacidad portante. Aunado a esto, ocurre, desgraciadamente muy a menudo, que un trabajo de reconocimiento somero o mal realizado es insuficiente para poner de manifiesto los terrenos defectuosos. Por lo cual, es preciso mejorar las propiedades de los suelos deficientes en los cuales es necesario construir.

Para estos casos es posible, en principio, proponer dos soluciones básicamente diferentes:

- Una cimentación profunda (pilotes, pilas, pantallas, módulos portantes, etc.)
- Mejorar las características de resistencia del suelo

En muchos casos, el tratamiento adecuado de los suelos en los cuales se va a edificar resulta más económico que realizar algún tipo de cimentación especial.

Sería óptimo poder disponer de procedimientos que permitiesen, a elección, aumentar la cohesión o el ángulo de fricción interno, aún mejor, reducir la compresibilidad de un suelo por no considerar más que las características principales, pero tales procedimientos independientes no existen. Casi siempre actúan sobre varias características a la vez. Sólo cabe considerar, pues, su forma de actuar.

Mejoramiento de suelos

Las técnicas de mejoramiento de suelos consisten en modificar las características de un suelo mediante distintos métodos, por ejemplo por una acción física (vibración) o por la inclusión en el suelo de una mezcla del suelo con un material más resistente. Esto se hace con el fin de:

- Aumentar la capacidad y/o resistencia al corte
- Disminuir los asentamientos, tanto absolutos como diferenciales, y acelerarlos cuando suceden
- Disminuir o eliminar el riesgo de licuación en caso de sismo o de vibraciones importantes

Los ámbitos de aplicación de las distintas técnicas dependen esencialmente de la naturaleza y la granulometría de los terrenos que se desean mejorar.

En el siguiente cuadro se resumen las técnicas más comunes que pueden ser utilizadas para el mejoramiento de suelos. En dicho cuadro se indican los principios básicos para cada método, así como algunos comentarios relacionados con las técnicas utilizadas.

CUADRO 1. MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS¹⁷

	MÉTODO DE MEJORAMIENTO	PRINCIPIOS	SUELOS ADECUADOS	COMENTARIOS
TÉCNICAS DE CAMBIO DE SUELO	SUSTITUCIÓN	Se excava suelos blandos o no deseados y se reemplaza y con uno de mejores características.	Cualquier	Profundidad y área limitados a análisis de costo, generalmente menor a 10 m.
	DESALOJO	Aplicación de un relleno de sobrecarga para que los suelos blandos sean desalojados y sustituidos.	Muy blandos	Problemática con áreas fangosas y estratos compresibles.
TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN DE AGUA	TRINCHERAS	Permite en drenado de las aguas.	Blandos, finos y rellenos hidráulicos	Efectivo hasta una profundidad de 10 m. La velocidad de drenado depende del tipo de suelo y de la separación de las zanjas. Drenado mejora movilidad en la superficie.
	PRE-CARGA	Se aplica sobrecarga antes de iniciar las obras para permitir una consolidación del suelo.	Suelos finos NC, rellenos, suelos orgánicos	Económico. Larga duración. La profundidad efectiva depende de los esfuerzos generados.
	PRE-CARGA CON DRENES VERTICALES	Disminuye el tiempo de consolidación.	IDEM	Más costoso. Profundidad efectiva < 30 m.
	ELECTRO - ÓSMOSIS	La corriente de agua encausa el flujo de agua hacia un cátodo.	Limos NC y limos arcillosos NC	Alto costo. Relativamente rápida. No aplicable en suelos conductivos. De preferencia en áreas pequeñas.

¹⁷ Código de cimentaciones de Costa Rica. Asociación Costarricense de Geotecnia. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Segunda edición. Cartago, Costa Rica, 2009.

TÉCNICAS DE AUMENTO DE RESISTENCIA	COMPACTACIÓN DINÁMICA	Se deja caer de manera repetida masa de 5 a 35 toneladas sobre el terreno.	Preferiblemente suelos granulares secos y sin cohesión	Rápido y simple. Profundidad efectiva hasta 20 m. Costo moderado. Posible daño por vibración a estructuras vecinas.
	VIBRO - COMPACTACIÓN	Una aguja vibratoria induce a la densificación.	Suelos con $C = 0$ y %finos < 20	Profundidad efectiva < 30 m. Alta densidad y homogeneidad. Costoso.
	VIBRO - FLOTACIÓN	Se usa una aguja vibratoria e inyección de agua para penetrar y remover el suelo. Luego se rellena con material granular y se compacta para formar columnas.	Suelos blandos y cohesivos ($C_a = 15 - 50 \text{ kN/m}^2$)	Alto costo.
	VIBRO - FLOTACIÓN CON DESALOJO	Semejante al anterior, pero el suelo es desplazado lateralmente y no es extraído del orificio.	Suelos más duros y cohesivos ($C_a = 30 - 60 \text{ kN/m}^2$)	Alto costo.
TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN Y GROUTING	INYECCIÓN	Se inyectan los vacíos del suelo con una lechada cementante para aumentar su resistencia y disminuir su permeabilidad.	Gran rango, desde suelos granulares hasta finos cohesivos	Alto costo. Se puede inyectar a presión, crear una facturación del suelo o utilizar técnicas de compactación.
	MEZCLA A PROFUNDIDAD	Se utiliza equipo de inyección o barrenadoras para combinar mezclas cementantes en el suelo.	IDEM	Uso preferible en suelos blandos hasta 50 m.
TÉCNICAS TÉRMICAS	MÉTODO DE CALENTADO	Altas temperaturas son utilizadas para incrementar la resistencia y disminuir la plasticidad, de manera permanente.	Suelos cohesivos	Su alta demanda energética eleva los costos.
	MÉTODO DE CONGELAMIENTO	Se congela la humedad para cementar las partículas y así incrementar la resistencia y reducir la permeabilidad.	Cualquier suelo debajo del NFA. Suelos cohesivos sobre el NFA.	Alto costo. Muy efectivo en excavaciones y túneles. Aplicación lenta.
	GEOSINTÉTICOS	Uso de geosintéticos para evacuación de aguas, control de la erosión o como refuerzo.	Se puede utilizar como filtro en cualquier tipo de suelo o como refuerzo en suelos blandos	Uso muy variado.

En la Figura 1 se indica la aplicabilidad de las técnicas de mejoramiento según el tamaño de las partículas de suelo.

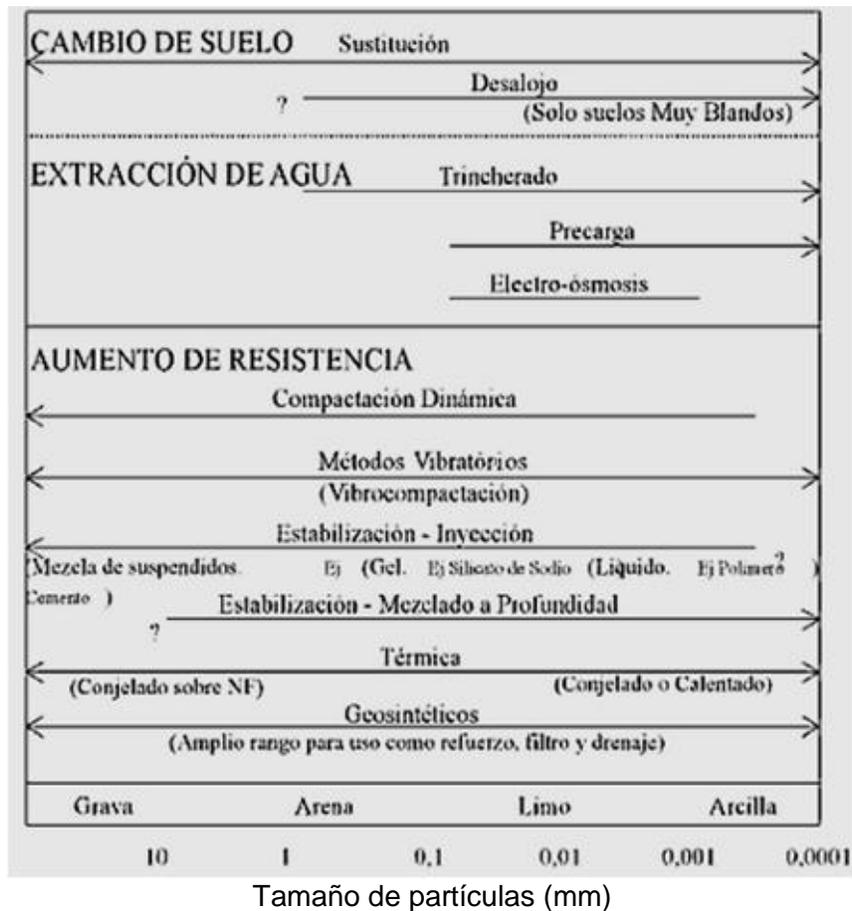


Figura 1. Código de cimentaciones de Costa Rica

Empleo de materiales ligeros

Uno de los principales métodos que se han utilizado para mejorar las condiciones del terreno natural, ya sea en lo referente a resistencia o a compresibilidad, es el uso de materiales ligeros. Convencionalmente este método trata de conseguir, dentro de distancias de acarreo tolerables, bancos de materiales de bajo peso volumétrico (cada vez más escasos) para la construcción de los terraplenes, al fin de lograr así que se reduzcan al máximo tanto las presiones comunicadas al terreno natural como las dimensiones de la sección que se construya. El problema de asentamientos suele estar ligado al de falta de resistencia, de modo que si el terraplén se hace con materiales pesados requerirá taludes muy tendidos, bermas, etc., que podrán reducirse y quizá eliminarse con el uso de materiales ligeros; siendo el hundimiento menor a menor peso del terraplén lo cual repercutirá favorablemente en el asentamiento final.

Los materiales ligeros se utilizan comúnmente en la construcción sobre suelos puramente cohesivos, tales como arcillas blandas o turbas, pues en terrenos de cimentación

friccionantes la ventaja del poco peso se neutraliza por la poca presión normal que se produce, lo que a su vez da lugar a que el terreno responda con baja resistencia. Lo que se busca es la reducción de la fuerza motoras, empleando en el cuerpo del terraplén materiales de bajo peso volumétrico. El tezontle, espuma basáltica volcánica, con peso volumétrico comprendido por lo general entre 0.8 y 1.2 ton/m³, ha sido muy utilizado para estos fines (en el valle de México los bancos de tezontle de bajo peso volumétrico están prácticamente agotados). Otros agregados ligeros, casi siempre de origen volcánico, resultan también apropiados; entre ellos figuran muchas arenas pumíticas, la piedra pómez, escoria volcánica y la virmicolita que tiene un peso volumétrico entre 0.6 y 1 ton/m³. Otras soluciones de esta línea, tales como la sustitución de parte del terraplén por tubos o cajones huecos de concreto, resultan por lo común muy costosas, por lo que su uso es limitado.

El uso de materiales ligeros debe comprenderse claramente cuando se compacten los terraplenes, pues muchos de ellos se degradan estructuralmente durante el proceso de compactación con alta energía perdiendo su característica de materiales ligeros.

En la actualidad la búsqueda de nuevos materiales ligeros ha dado lugar a la utilización de materiales prefabricados y/o reciclados que cumplen con las especificaciones requeridas para resolver problemas geotécnicos donde un material estable, resistente y ligero es adecuado. A continuación se nombran, a manera de ejemplo, algunos de los más utilizados.

Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

Se han empleado neumáticos fragmentados y granulados como material ligero en rellenos y en la construcción de terraplenes, fundamentalmente en Estados Unidos de América. Esta aplicación presenta algunas ventajas como son la utilización de grandes cantidades de residuo, peso reducido, una resistencia elevada, mejoramiento de la permeabilidad y resistencia a las heladas. Aunque el material es resistente a las radiaciones ultravioleta y no biodegradable, su utilización puede tener alguna influencia sobre el ambiente, especialmente cuando se coloca bajo la capa freática, por lo que habría que hacer los estudios pertinentes de impacto ambiental.^{18 19}

En la actualidad, el Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX, en España participa en un proyecto para la construcción de un terraplén experimental con relleno de tiras de NFU. Para la ejecución del mismo se están calculando de forma previa los parámetros de compactación, tanto de tiras de NFU como de mezcla de NFU con suelo, mediante la realización de ensayos de laboratorio y la puesta en obra de bandas de ensayo fabricadas con este tipo de materiales.

También existen otras aplicaciones como rellenos de trasdós de muros, ya que debido a su alta deformabilidad son capaces de absorber el esfuerzo de compactación del relleno sin generar grandes empujes sobre el muro (unos 2/3 de los empujes que se consideran

¹⁸ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). "Appropriate Use of Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry – An information Database", National Cooperative Highway Research Program, Project 4 – 21. Washington, D.C., 2001.

¹⁹ EPPS, J.A. "Use of recycled rubber tires in highways", NCHRP Synthesis of Highway Practice 198, Transportation Research Board. Washington, D.C., 1994.

habitualmente). Su permeabilidad elevada hace que, además, actúen como drenes. Esto permite reducir de forma importante el costo de las estructuras de contención.

También se pueden utilizar enteros o troceados como rellenos de gaviones. En el caso de utilizarse enteros, éstos son comprimidos al introducirse a los gaviones.^{1 20}

Los neumáticos fuera de uso triturados tienen una densidad sin compactar de 390 – 535 kg/m³; compactados presentan un intervalo de 630 – 840 kg/m³.



Poliestireno expandido (EPS)

El poliestireno expandido (EPS) se ha utilizado como un material geotécnico desde los años sesentas. El EPS es un material duradero y versátil. Su peso corresponde aproximadamente al 1% del peso del suelo y menos del 10% del peso de otras alternativas de materiales para rellenos ligeros,²¹ esto debido a que su estructura consiste en un 98% de aire. El EPS tiene una densidad entre 15 a 30 kg/m³.

La utilización del EPS como material para rellenos ligeros reduce las cargas impuestas sobre los suelos y estructuras adyacentes y subyacentes.

²⁰ EUROPEAN TYRE RECYCLING ASSOCIATION (ETRA). "Tyre Recycling after 2000: Status and Options". Paris, March, 2000.

²¹ <http://www.geofoam.org/>

El poliestireno expandido se caracteriza principalmente por ser un material liviano, razón por la cual es utilizado como material de reemplazo en la construcción de terraplenes de vías y accesos a puentes donde la capacidad de carga y/o los asentamientos admisibles del suelo de cimentación son excedidos debido al peso del terraplén. Los bloques de EPS también se utilizan como reemplazo parcial o total de taludes y como material de respaldo en estructuras de retención tales como muros y estribos cuya estabilidad está comprometida debido al peso de la masa de suelo.²²



Arcilla expandida

La arcilla expandida se produce a partir de arcillas que, a través de un proceso de granulación y expansión, se transforman en pequeñas esferas con una estructura interior porosa y una corteza externa dura.

Los rellenos ligeros realizados con arcilla expandida, han sido ampliamente utilizados en diversos países europeos desde 1958. La arcilla expandida posee excelentes cualidades a la hora de resolver problemas geotécnicos, principalmente derivados de las sobrecargas producidas por el elevado peso de los rellenos realizados con materiales convencionales. Presenta igual comportamiento tanto seco como saturado, es inerte químicamente e ignífuga. Es un material completamente reciclable y de bajo impacto ambiental tanto en su proceso de fabricación como a largo plazo puesto en obra.

²² Tesis doctoral “Comportamiento mecánico del poliestireno expandido (EPS) bajo carga de compresión”.

La utilización de arcilla expandida permite construir terraplenes en suelos con baja capacidad de carga evitando trabajos previos de estabilización del terreno y reduciendo así el tiempo de ejecución y por lo tanto los costos derivados de la misma.

La arcilla expandida tiene una densidad entre 250 kg/m^3 (seca) y 700 kg/m^3 (saturada). Su densidad aparente estimada "in situ" a largo plazo es de 500 kg/m^3 .



4.2 Mecanismo de deformación por compresión del polietileno tereftalato

El polietileno tereftalato, PET, presenta ciertas características que lo convierten en una opción para ser utilizado en diferentes aplicaciones dentro del campo de la ingeniería civil, como son su baja densidad y su capacidad para absorber considerables cantidades de energía transmitida por fuerzas externas.

En este estudio se observó que ante la aplicación de una fuerza de compresión, el polietileno tereftalato reacciona experimentando ciertas deformaciones, disipando con esto la energía absorbida. Es importante mencionar que al realizar el proceso de descarga del material las deformaciones generadas se revirtieron hasta igualar el estado inicial de esfuerzos. Esto sucedió en todas las pruebas realizadas para un solo envase (vacío o relleno de bolsas plásticas).

Para el conjunto de envases sucedió en algunas de las pruebas exceptuando aquellas en donde no se logró distribuir uniformemente la carga debido a errores en la metodología utilizada para configurar el sistema (sobre todo en la colocación de la placa metálica). Esto indujo una distribución no uniforme de las fuerzas de compresión en la sección

transversal del paquete de botellas lo que produjo un incremento diferencial de dichas fuerzas generando así deformaciones permanentes en los envases.

Para conocer el comportamiento del PET bajo esfuerzos de compresión estática se realizaron pruebas de las que se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento de diferentes envases. No se pudo obtener la gráfica esfuerzo-deformación del material ya que el área de la sección transversal, necesaria para determinar el esfuerzo, es prácticamente despreciable, siendo el aire confinado en el envase el encargado de brindar la resistencia a éste.

La curva carga-desplazamiento que presenta el polietileno tereftalato mostró diferencias entre las botellas utilizadas para envasar agua y aquellas utilizadas para las bebidas carbonatadas y el agua mineral, lo cual se describe en los siguientes incisos.

Envases de agua

La curva carga-desplazamiento que se obtuvo de este tipo de envases se puede dividir en tres zonas tal como lo muestra la figura 4.1. En la primera zona el PET presenta un comportamiento elástico lineal. En esta etapa la deformación muestra un rango entre el 0.44% y el 1.69%. Los valores dependen principalmente de la densidad del material y la geometría del envase.

En la segunda zona de la curva carga-desplazamiento el PET presenta un comportamiento plástico. Esta zona se extiende hasta diferentes valores, según el envase a tratar, pero aquel que presentó el mayor deformación tuvo un valor del 3.5%.

Mientras el envase sigue siendo deformado por las fuerzas axiales de compresión actuantes sobre él, el aire en su interior comienza a comprimirse. Esta zona de la curva se denomina aumento de resistencia por deformación y se da debido a la resistencia a la deformación que afronta el aire ante la carga aplicada.

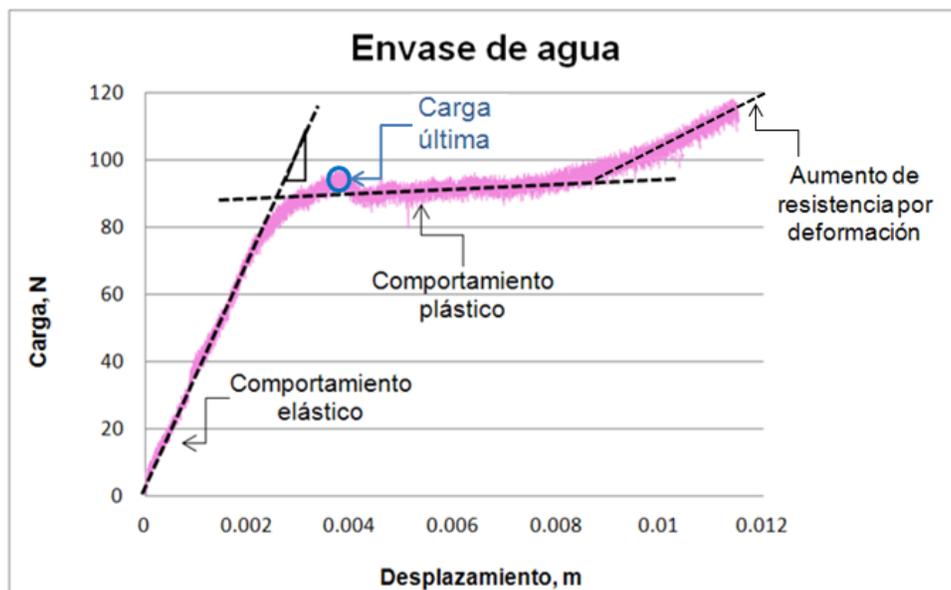


Figura 4.1 Comportamiento carga-desplazamiento de envases de agua de PET

Envases de bebidas carbonatadas y agua mineral

Es algo complicado definir un tipo de curva carga-desplazamiento representativa para los envases de bebidas carbonatadas (refresco) y agua mineral, ya que cada uno presenta un gráfico muy específico, pero en general presentan dos comportamientos similares mostrados en la figura 4.2.

Al igual que con los envases de agua en la gráfica se presenta una zona de comportamiento elástico lineal. Los desplazamientos presentan valores del 1% al 3% en esta zona.

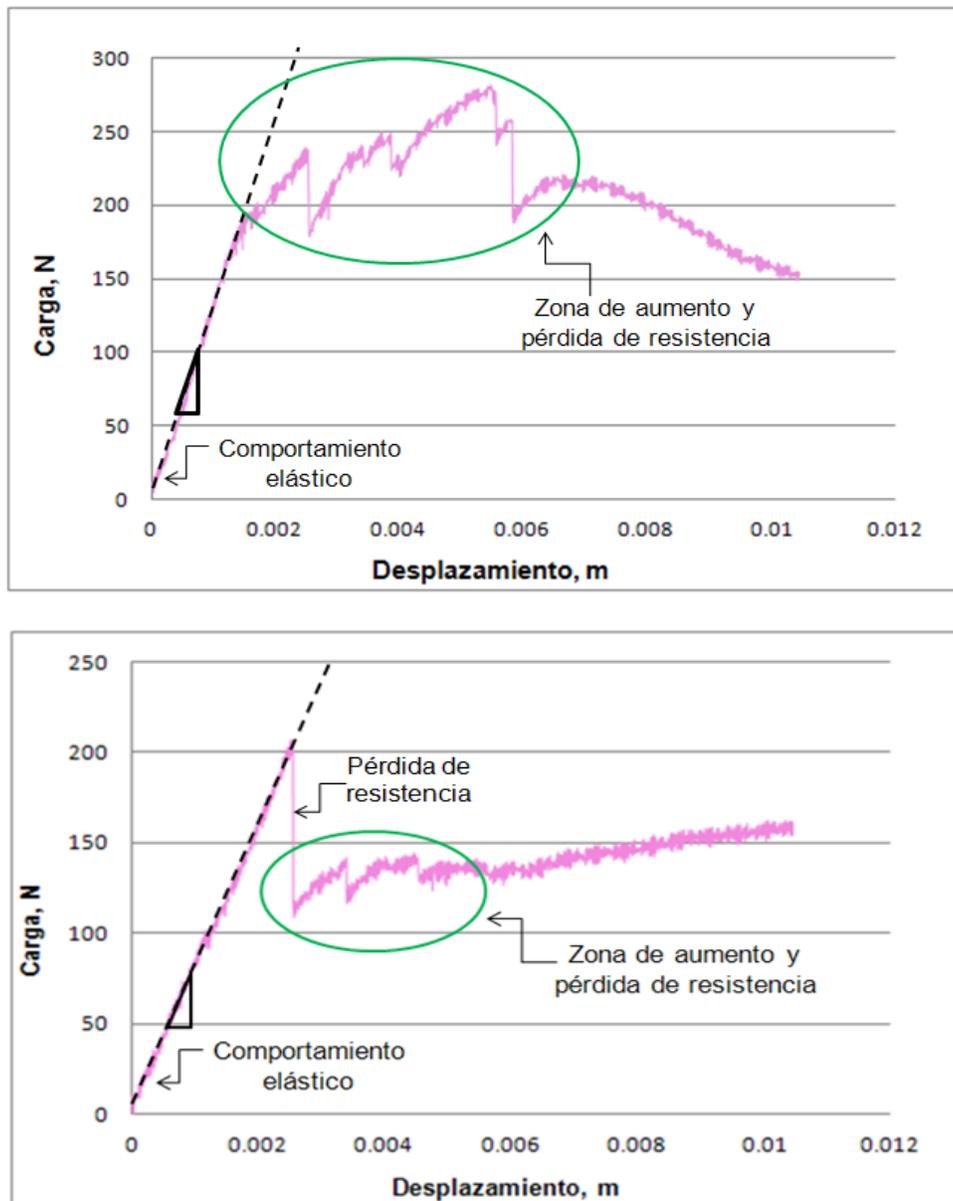


Figura 4.2 Comportamiento carga-desplazamiento de envases de refresco y agua mineral de PET

La siguiente etapa que presenta el comportamiento de este tipo de envases es una zona de aumento y pérdida periódica de la resistencia. Algunos envases presentaron una gran pérdida de resistencia antes de entrar a esta zona debido a deformaciones importantes en la muestra como lo indica la figura 4.3.



Figura 4.3 Deformaciones excesivas en algunos tipos de botellas causante de grandes pérdidas de resistencia

En esta zona todos los envases empiezan a sufrir deformaciones por lo que la resistencia a la carga aplicada disminuye, aumentando después debido a la resistencia a la compresión del aire confinado en su interior. Este comportamiento se vuelve cíclico durante un lapso de tiempo hasta que la presión del aire atrapado dentro de la botella es tan grande que evita que la deformación de ésta continúe pasando a una zona de pérdida de resistencia continua (primera gráfica de la figura 4.3) o a un aumento de ésta (segunda gráfica de la figura 4.3).

4.3 Evaluación del comportamiento carga – deformación del PET a nivel macroscópico

Los resultados de la investigación permiten ver que la resistencia mecánica por compresión del polietileno tereftalato, PET, depende de diferentes variables que influyen en su comportamiento como son la densidad del material (el gramaje utilizado en la fabricación del envase), la velocidad de deformación, la geometría y el tamaño de los envases. Sin embargo, quedan fuera del alcance de esta investigación otras variables que podrían ser importantes en el estudio de su comportamiento compresivo bajo carga estática, por ejemplo el esfuerzo de confinamiento. Por lo tanto se deben realizar investigaciones adicionales que contribuyan en el avance de este conocimiento más a fondo.

4.3.1 Tipo de ensayos

Durante la investigación se recolectaron botellas de PET con la finalidad de realizarles distintas pruebas y así conocer el comportamiento mecánico del polietileno tereftalato bajo esfuerzos de compresión estáticos.

Para hacer las pruebas de un envase vacío y de un envase relleno con bolsas plásticas (de reciclaje, tipo supermercado) se utilizó una Máquina de Ensayos Universales MTS Test System. Las pruebas que se le realizaron a las botellas fueron de compresión bajo carga estática con deformación controlada y sin confinamiento. El patrón de excitación estático fue generado con los siguientes parámetros:

Deformación final	20.00	[mm]
Tiempo	00:07:00	[h : m : s]
N muestras	2048	

En cuanto a las pruebas del arreglo de envases con distintas configuraciones se utilizó una prensa de velocidad controlada tipo Toledo modificada con una placa metálica para distribuir uniformemente la carga.

Para obtener los resultados se probaron en promedio de 8 a 10 muestras de cada tipo de envase. De cada ensaye se obtuvo la gráfica carga-deformación de la botella en cuestión. La parte elástica-lineal de dicha gráfica es la que se considera relevante en este estudio.

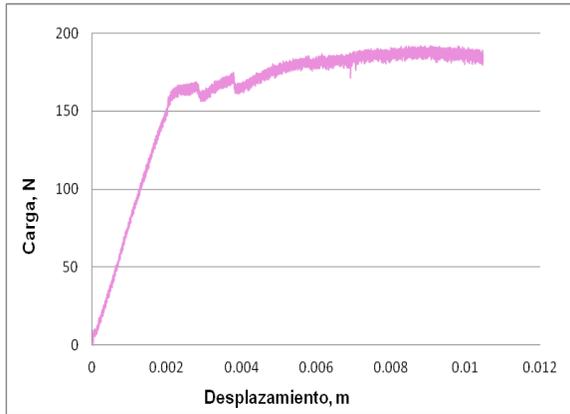
4.3.1.1 Un envase vacío

Las pruebas para envases vacíos se realizaron bajo las condiciones antes descritas. Con los resultados se obtuvo una relación de la carga última vs el peso de cada envase, ya que el peso volumétrico es un factor de suma importancia en el tratamiento de suelos de baja capacidad portante. Teniendo dicha relación y utilizando otros factores que se verán más adelante en la sección de “Análisis de resultados” se hizo la selección de los envases que mostraron tener las mejores características para el mejoramiento de suelos blandos.

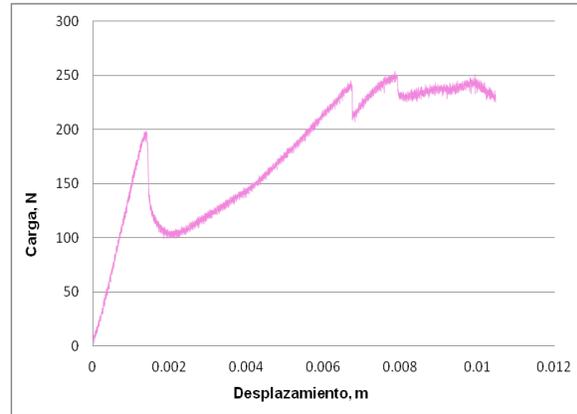


Ensayos en la MTS a envases vacíos

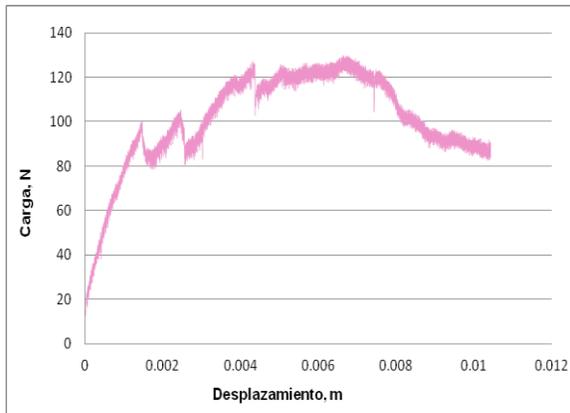
A continuación se muestran algunas de las gráficas obtenidas, cada una perteneciente a un tipo de envase diferente:



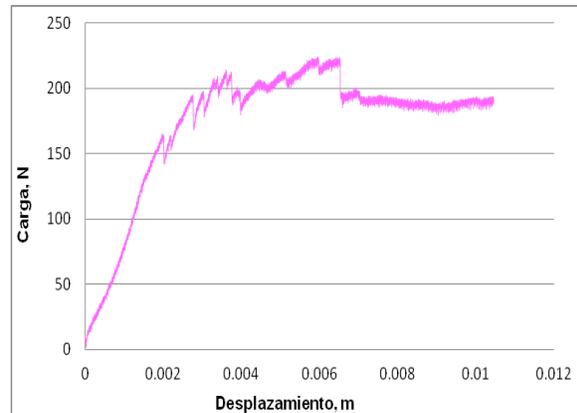
a) envase para agua de 1.5 L



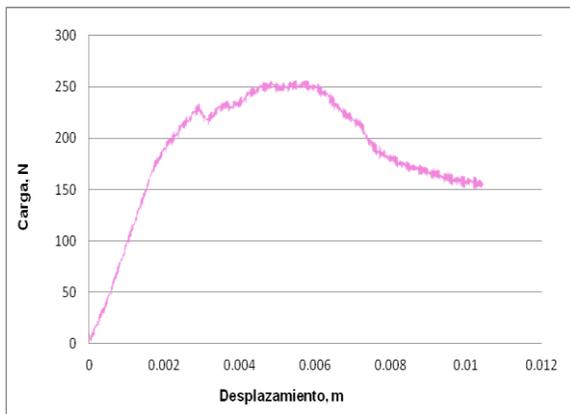
b) envase para refresco de 2.5 L



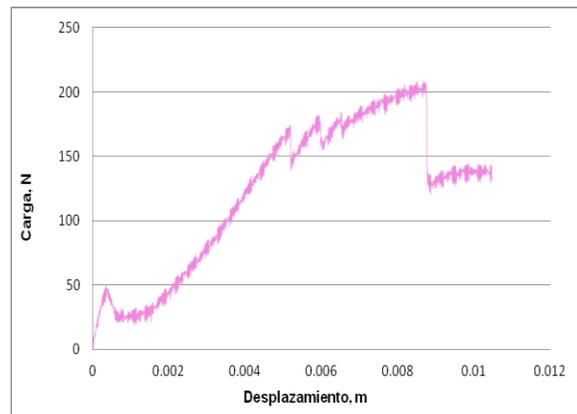
c) envase para refresco de 2 L



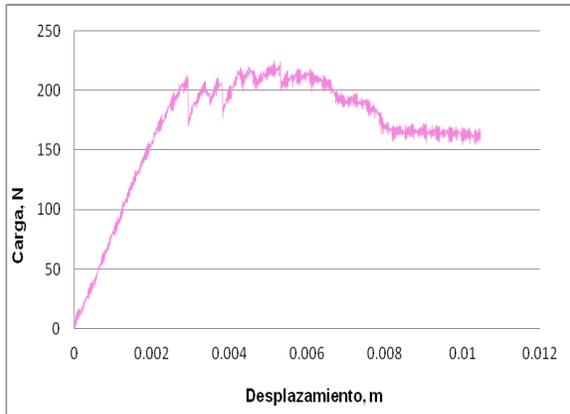
d) envase para refresco de 1.5 L



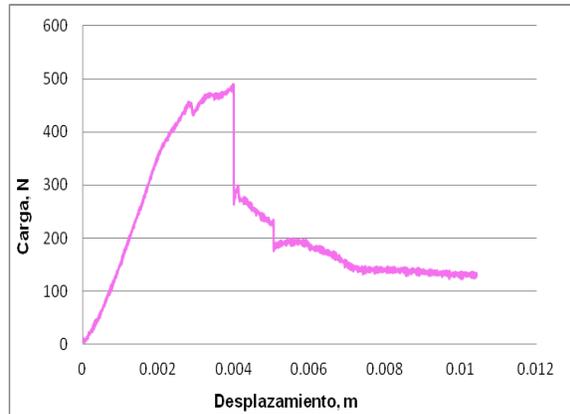
e) envase para refresco de 2 L



f) envase de agua mineral de 2 L



g) envase para refresco de 3 L



h) envase para agua mineral 1.75 L

4.3.1.2 Un envase relleno con bolsas plásticas

La utilización de envases de PET rellenos con distintos materiales ha encontrado cada vez un mayor número de aplicaciones a nivel mundial, desde construcción de casas y escuelas hasta muebles. En el uso de los envases rellenos para la construcción de pequeñas edificaciones es común utilizar materiales locales disponibles, como escombros, arena o tierra.



Mueble fabricado con envases de PET

En países como Colombia se utilizan botellas de PET rellenas de residuos inorgánicos domésticos en la construcción de mampostería para casas de bajo costo. No se encontró información que mostrara que dicha acción mejora la resistencia del material pero tiene la ventaja de brindar un sitio de disposición final a un mayor número de residuos.

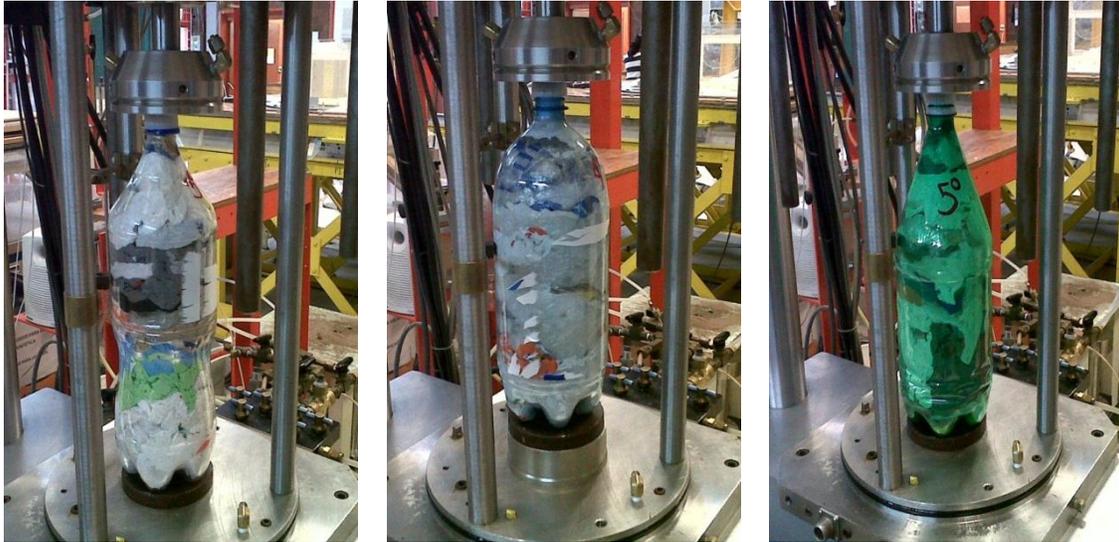
Debido a esto se decidió realizar pruebas con envases rellenos de bolsas plásticas utilizadas para transportar la mercancía desde el supermercado, mismas que representan un problema importante de residuos a nivel mundial. Dichas bolsas están fabricadas comúnmente con polietileno o polipropileno, ambos derivados del petróleo, una fuente de materia prima no renovable y cada vez más costosa. Así, además de colaborar al agotamiento de este recurso, su utilización potencia la enorme contaminación que origina su obtención, transporte y transformación en plástico. Cuando las bolsas de plástico están serigrafiadas todavía es peor ya que las tintas contienen residuos metálicos también contaminantes. Las pinturas de impresión contienen plomo y cadmio, metales pesados altamente tóxicos.

De acuerdo con la Agencia Ambiental de los Estados Unidos, en la actualidad se producen en el mundo entre 500,000 millones y un billón de bolsas de plástico por año. Cicloplast asegura que del mercado total apenas se reciclan alrededor de un 10%. Según datos de El Financiero para el 2011 en México se produjeron 68 mil millones de bolsas de plástico, de las cuales en el Distrito Federal se consumieron 32 millones por día.



Edificaciones hechas con envases de PET rellenos de materiales térreos

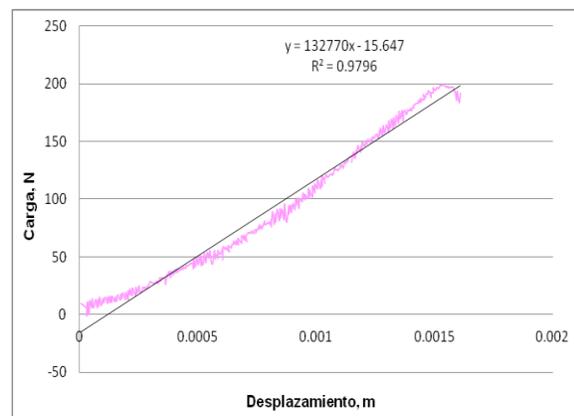
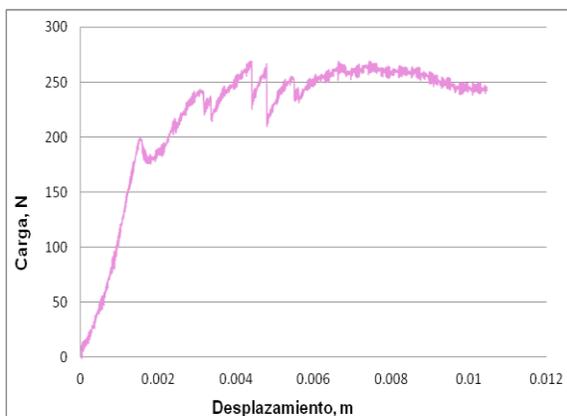
Los envases probados en esta etapa del proyecto fueron aquellos que se consideraron óptimos según los ensayos hechos con las botellas vacías. El método de llenado consiste en introducir algunas bolsas en su interior para después ser compactadas con una vara y repetir los mismos pasos hasta terminar de colmar el envase. El procedimiento realizado para hacer las pruebas de compresión estática es el mismo que para los envases vacíos.



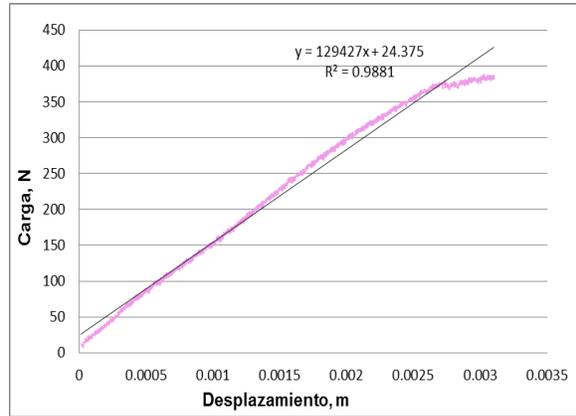
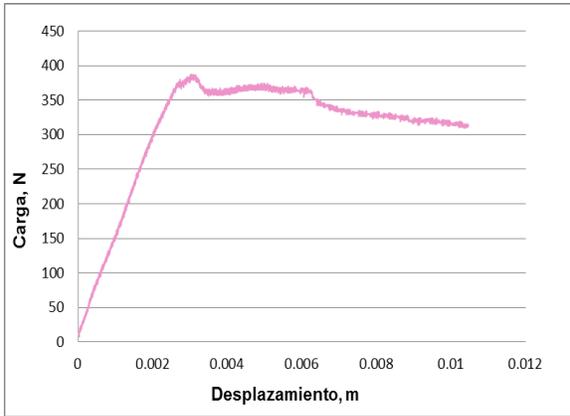
Ensayos en la MTS a envases rellenos con bolsas plásticas

A continuación se muestran las gráficas carga-desplazamiento más representativas de cada envase. También se presentan las gráficas que se obtuvieron para el mismo tipo de botella en las pruebas realizadas con los envases vacíos, esto con la finalidad de realizar una comparación del comportamiento general del material y observar la diferencia entre el comportamiento del aire y las bolsas de plástico.

1) Envase para agua mineral de 2 L tipo 1 (Peñafiel)

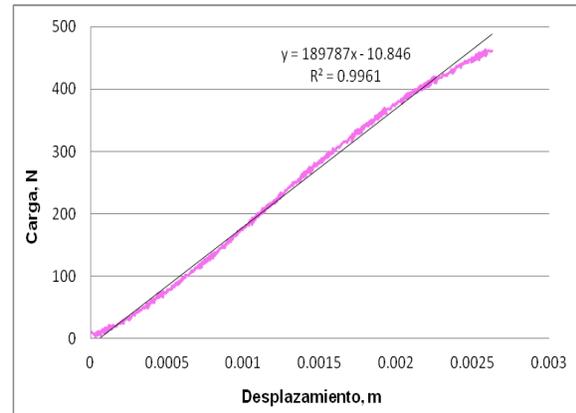
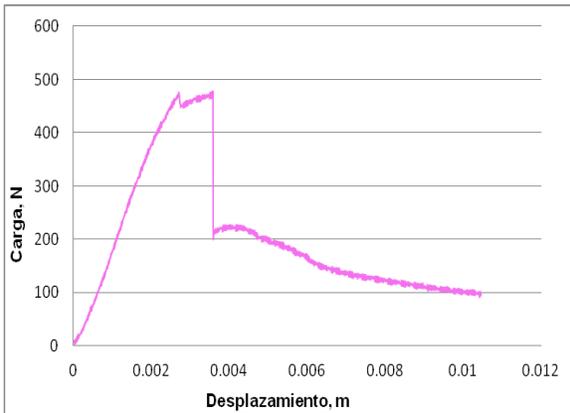


a) Comportamiento con el envase vacío

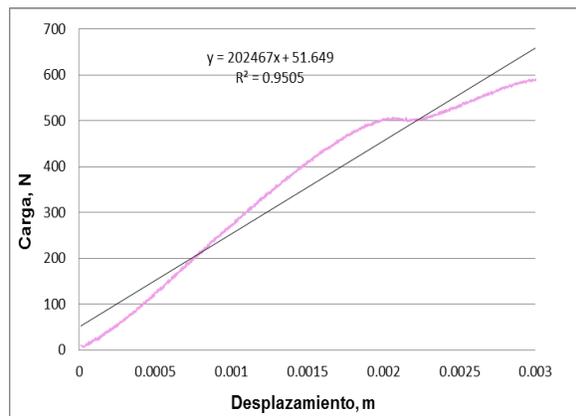
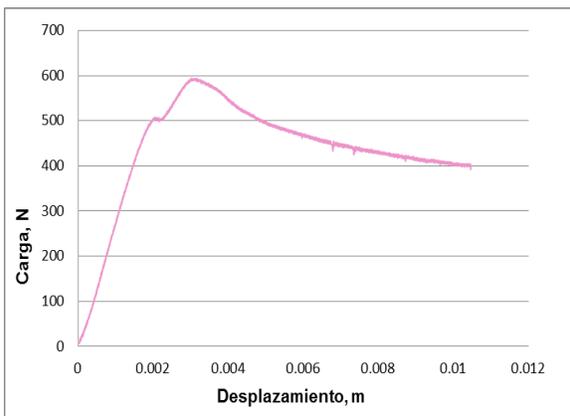


b) Comportamiento con el envase relleno de bolsas plásticas

2) Envase para agua mineral de 1.75 L (Ciel sifón)

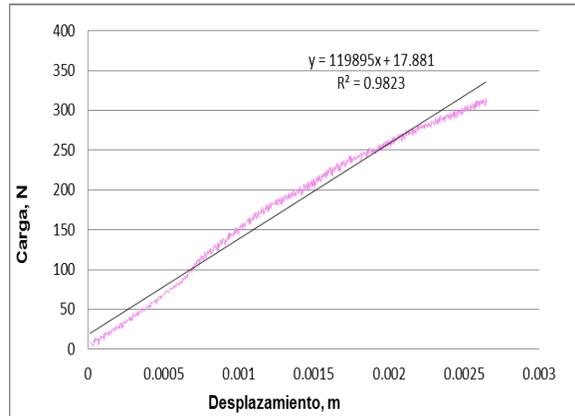
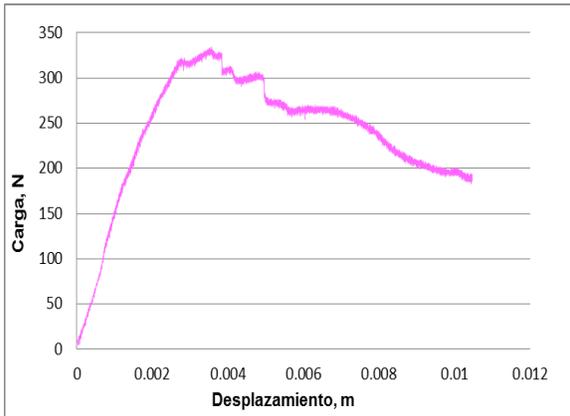


a) Comportamiento con el envase vacío

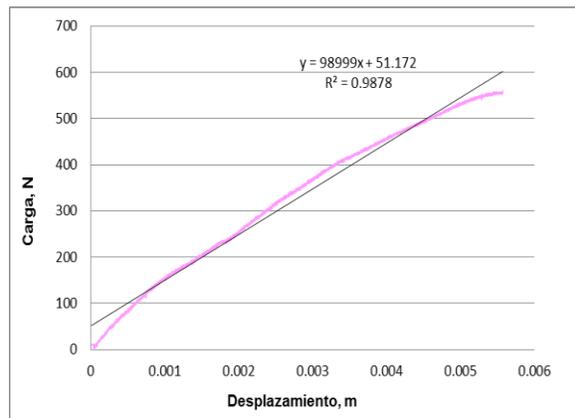
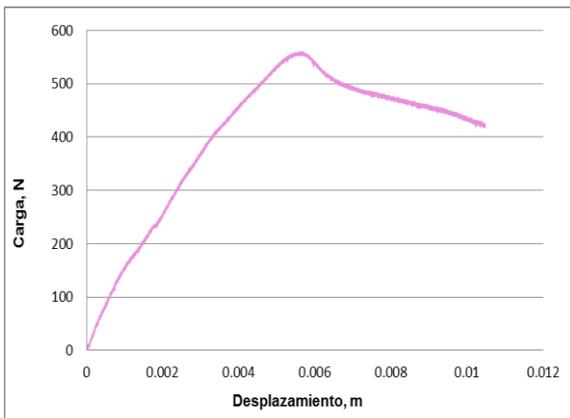


b) Comportamiento con el envase relleno de bolsas plásticas

3) Envase para agua mineral de 2 L tipo 2 (Ciel mineral)

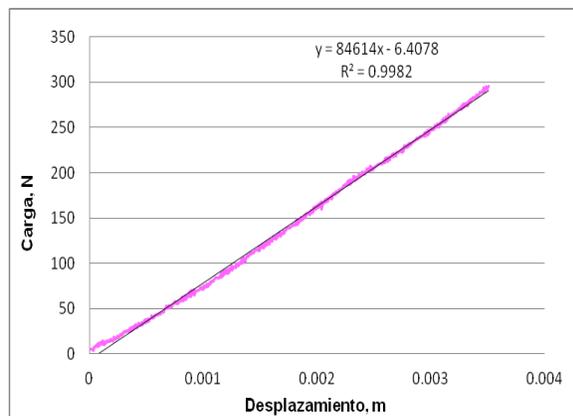
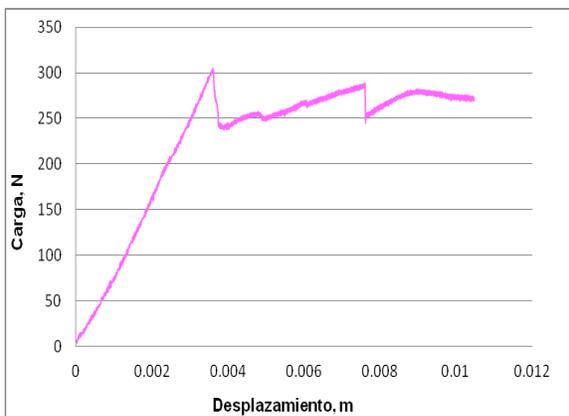


a) Comportamiento con el envase vacío

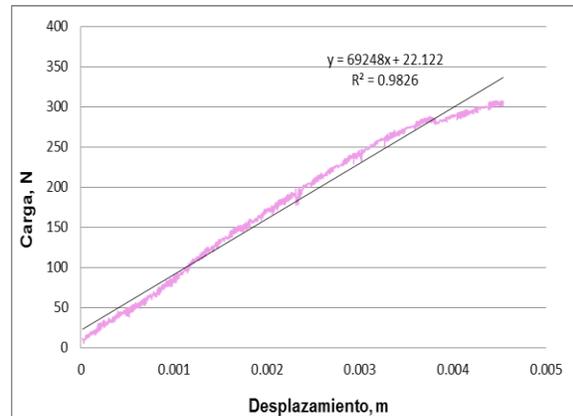
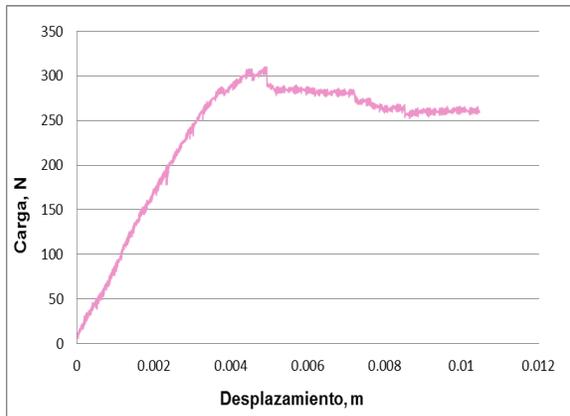


b) Comportamiento con el envase relleno de bolsas plásticas

4) Envase para refresco de 2.5 L (Coca-cola)



a) Comportamiento con el envase vacío



b) Comportamiento con el envase relleno de bolsas plásticas

4.3.1.3 Arreglo de envases con distintas configuraciones

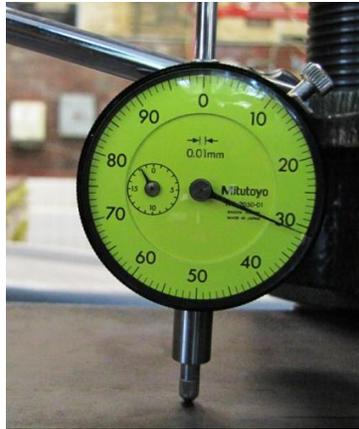
Después de realizar los ensayos de compresión estática para los envases individuales (vacíos y rellenos de bolsas plásticas) y de haber seleccionado los envases que cumplían de manera más adecuada los requerimientos necesarios para la investigación, se llevaron a cabo los ensayos de envases en paquetes formados con distintas configuraciones.

Las pruebas se realizaron, como se mencionó anteriormente, en la máquina Toledo utilizando una placa metálica de 53 x 23 cm para distribuir uniformemente la carga. El peso de la placa es de 9.80 kg. Para medir las deformaciones axiales se colocaron micrómetros encima de la placa. Se envolvieron los grupos de envases con 2 vueltas de plástico para envolver muebles para brindarles un ligero confinamiento.

Se realizaron pruebas con arreglos en distintas configuraciones para obtener aquella en la cual las botellas presentarían un mejor comportamiento en conjunto. También se realizaron ensayos a distintas velocidades de aplicación de la carga para conocer su influencia en el comportamiento.

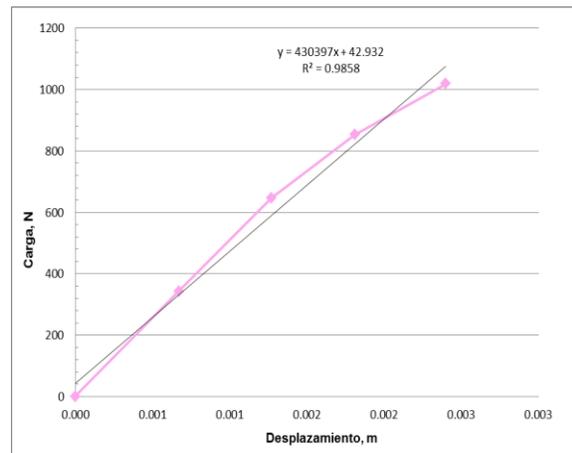
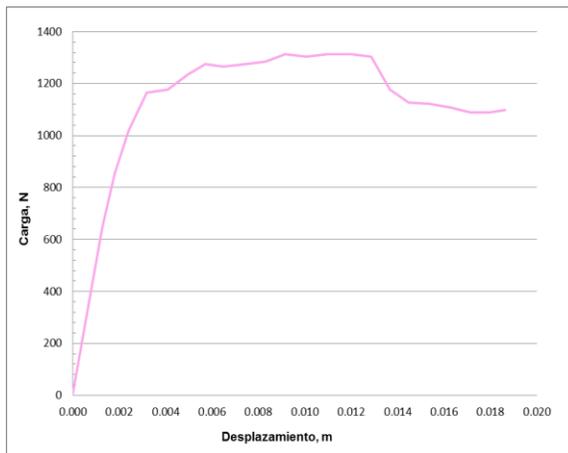


Ensayos en la Máquina Toledo a conjuntos de envases

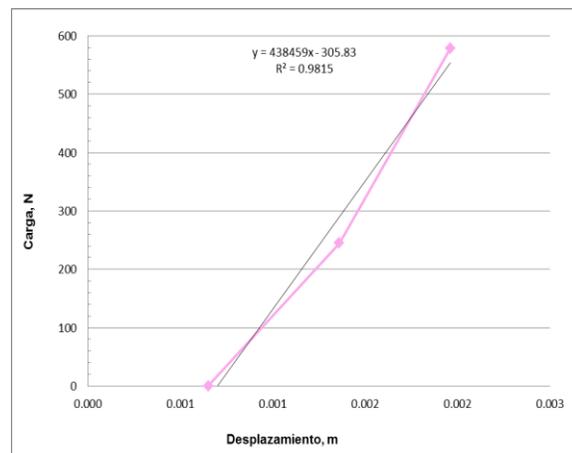
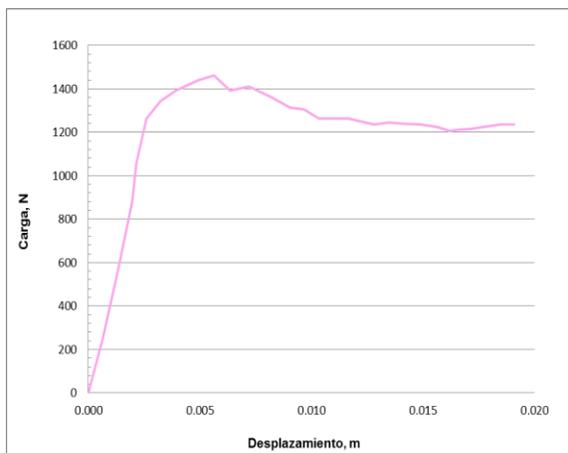


Micrómetro Mitutoyo

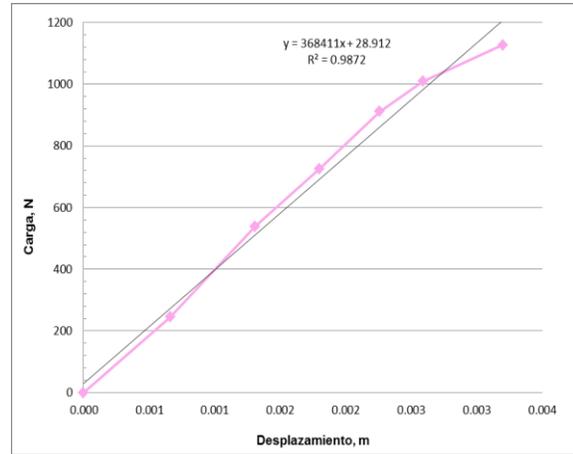
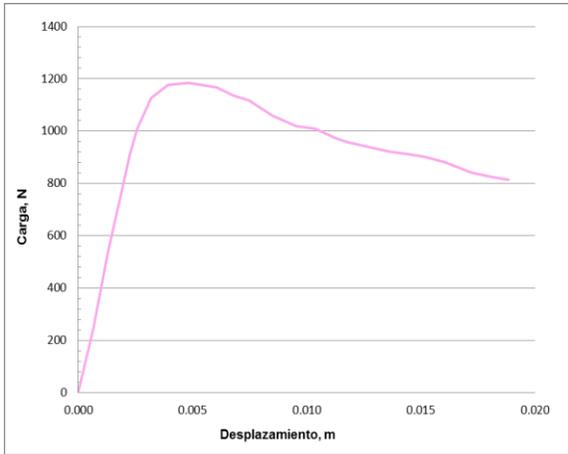
A continuación se muestran las curvas carga-deformación características que presentó cada tipo de envase en su comportamiento en conjunto.



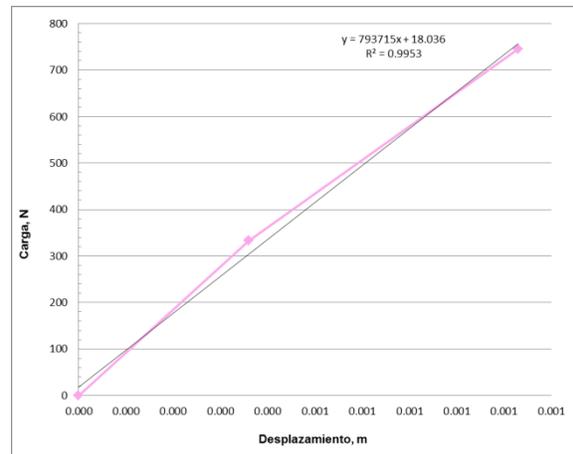
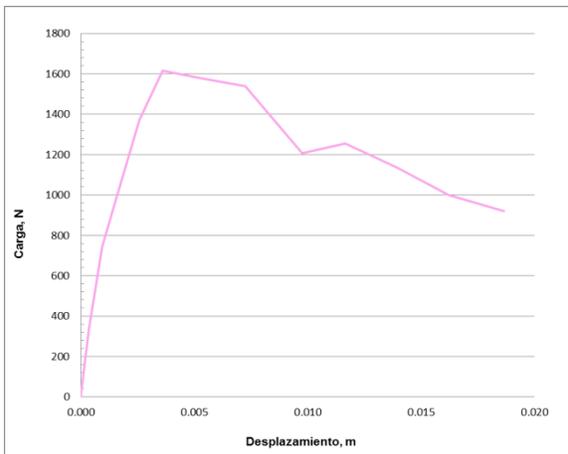
a) Envase para refresco de 2.5 L (Coca-cola)



b) Envase para agua mineral de 2 L tipo 1 (Peñafiel)



c) Envase para agua mineral de 2 L tipo 2 (Ciel mineral)



d) Envase para agua mineral de 1.75 L (Ciel sifón)

4.3.2 Análisis de resultados

A fin de realizar la interpretación de los resultados obtenidos con las pruebas, se realizaron tablas resumen para poder tener un manejo más sencillo de la información obtenida en el laboratorio. Las variables que se analizaron son la resistencia de los envases, su peso, la deformación presentada, la influencia de la velocidad de deformación en su comportamiento, la influencia de la temperatura y la resistencia obtenida después de su falla.

4.3.2.1 Un envase vacío

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos de las pruebas para un envase vacío. Los tipos de envases subrayados con color rosa son los que mostraron tener una mayor resistencia. Se tomaron en cuenta dos consideraciones al momento de seleccionar la resistencia de cada envase: i) la carga máxima si la deformación axial no rebasaba el 10% o ii) la carga aplicada en el momento en que la deformación llegara al 10%.

ENVASE	VOLUMEN	CARGA MÁXIMA	DEFORMACIÓN	DEFORMACIÓN	ALTURA INICIAL
	L	Kg	mm	%	
Agua	1.5	14.73	1.65	0.4939%	335.00
Agua	1.5	8.18	2.66	0.7933%	335.00
Agua	1.5	10.82	6.05	1.8057%	335.00
Agua	1.5	6.38	2.20	0.6464%	340.00
Refresco	2	18.84	2.08	0.5938%	350.00
Refresco	2.5	19.78	1.55	0.4297%	360.00
Refresco	3	18.68	2.79	0.7656%	365.00
Refresco	2	15.17	1.61	0.4675%	345.00
Refresco	3	51.85	4.31	1.1972%	360.00
Refresco	2	15.19	2.12	0.6235%	340.00
Refresco	2	7.72	1.26	0.3706%	340.00
Refresco	2	24.88	2.91	0.8314%	350.00
Refresco	2.5	18.76	2.05	0.5541%	370.00
Agua mineral	2	4.34	0.27	0.0783%	345.00
Agua mineral	2	22.26	1.81	0.5403%	335.00
Agua mineral	2	22.35	2.55	0.7391%	345.00
Agua mineral	1.75	44.71	2.38	0.7677%	310.00
Refresco	1.5	14.02	1.52	0.4606%	330.00
Refresco	2	19.30	3.31	0.9735%	340.00
Refresco	2	19.54	3.08	0.9059%	340.00
Refresco	2	16.05	1.93	0.5676%	340.00
Refresco	2.5	24.00	2.91	0.7973%	365.00
Refresco	2.5	67.42	0.84	0.2301%	365.00
Refresco	3	20.28	2.71	0.7528%	360.00
Refresco	2	18.65	2.98	0.9030%	330.00
Agua mineral	2	19.02	1.76	0.5867%	300.00
Refresco	2	18.73	2.03	0.5971%	340.00
Refresco	2	17.65	2.12	0.6145%	345.00
Refresco	3	17.48	2.46	0.6833%	360.00
Refresco	2.5	18.08	1.96	0.5370%	365.00
Refresco	2.5	17.59	2.05	0.5616%	365.00
Refresco	2	19.01	1.75	0.5833%	300.00

Tabla 1. Resultados de la pruebas para un envase vacío

Como se puede observar en la tabla anterior, contrario a lo que se pensaba al iniciar los ensayos, los envases no mostraron tener deformaciones axiales mayores al 10% por lo que en todos los casos se consideró como carga última la carga máxima alcanzada. Es de interés estudiar las deformaciones radiales de las muestras para su consideración, sin embargo éstas quedaron fuera de los alcances de esta investigación.

En seguida se obtuvieron los pesos de los envases seleccionados por tener una mayor resistencia. Los resultados se muestran en orden descendiente en cuanto a la relación peso-resistencia.

ENVASE	VOLUMEN	CARGA MÁXIMA	PESO	CARGA/PESO
	L	Kg	g	
Refresco	3	51.85	63.57	0.82
Agua mineral	1.75	44.71	55.63	0.80
Refresco (retornable)	2.5	67.42	131.43	0.51
Refresco	2	24.88	49.30	0.50
Agua mineral	2	22.26	50.97	0.44
Refresco	2.5	24.00	55.86	0.43
Agua mineral	2	22.35	55.48	0.40
Refresco	3	20.80	59.06	0.35

Tabla 2. Relación peso-resistencia

Los resultados marcados con color rojo se descartaron, a continuación se presentan las causas. El envase de mayor resistencia del total de la población ensayada fue el de refresco de 2.5 litros con una carga máxima de 67.42 kilogramos, pero era un envase retornable, por lo que no se tomó en cuenta. De los envases no retornables el que presentó una mayor resistencia y relación carga-peso fue el de refresco de 3 litros con una carga máxima de 51.85 kilogramos pero también fue el de mayor peso (63.57 g). Aunado a eso también es el envase más difícil de conseguir (su característica de consumo está enfocada a un mercado no masivo), seguido por el envase de refresco de 2 litros con una relación carga/peso de 0.50, causa por la cual se decidió también excluirlo. Finalmente los envases subrayados con color rosa son los que seleccionaron para seguir con la investigación.

Curiosamente de los 4 envases seleccionados al final, 3 representan los envases de más fácil recolección por ser de los más utilizados según la colecta que se realizó. El otro, aunque no es el de mayor facilidad de obtención, tampoco implica ser una botella de difícil acceso.

Como se puede observar los parámetros que se utilizaron para la selección final de los envases que representan la mejor opción a utilizar en el resto de la investigación fueron:

- I. Carga máxima resistida
- II. Peso
- III. Accesibilidad

Así el resultado final, mostrado por orden de importancia, fue el siguiente:

- 1) Envase de agua mineral de 1.75 litros
- 2) Envase de refresco de 2.5 litros
- 3) Envase de agua mineral de 2 litros tipo 1
- 4) Envase de agua mineral de 2 litros tipo 2

Es interesante hacer notar que tres de las cuatro mejores opciones pertenecen a envases para agua mineralizada.

Resistencia después de la falla

A distintos envases, tomados de manera aleatoria, se les realizó una segunda prueba de compresión bajo carga estática con los mismos parámetros que la prueba inicial. Esto con el fin de estudiar la resistencia obtenida después de haber llevado al material a su falla. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

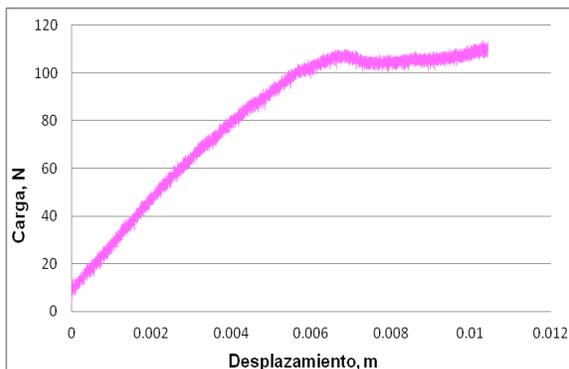
PRUEBA 1	PRUEBA 2	PÉRDIDA DE RESISTENCIA
Carga [kg]	Carga [kg]	%
18.25	10.99	39.78%
20.59	13.76	33.17%
16.69	11.27	32.47%
14.35	10.07	29.83%
11.22	8.10	27.81%
10.98	8.35	23.95%
22.03	17.56	20.29%
15.18	12.24	19.37%
11.24	9.47	15.75%
24.68	22.01	10.82%
11.02	10.38	5.81%

Tabla 3. Resistencia después de la falla

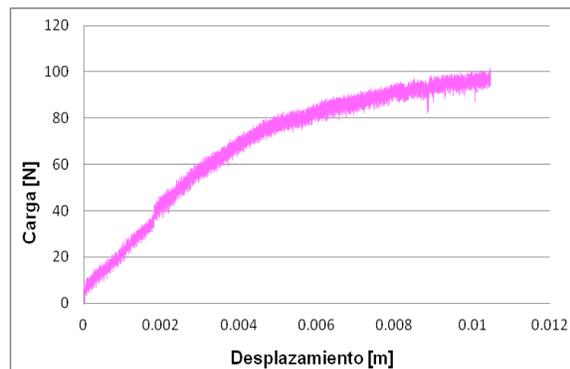
La pérdida de resistencia entre cada tipo envase resultó ser muy distinta. Los envases que mostraron una menor pérdida fueron los de agua, teniendo un promedio de pérdida del 16.52%, mientras que los de refresco fueron los que obtuvieron el mayor porcentaje de pérdida de resistencia con un promedio de 35.13%.

En las siguientes gráficas se pueden observar la diferencia en el comportamiento del PET después de haber llevado la muestra a la falla.

1) Envase de agua

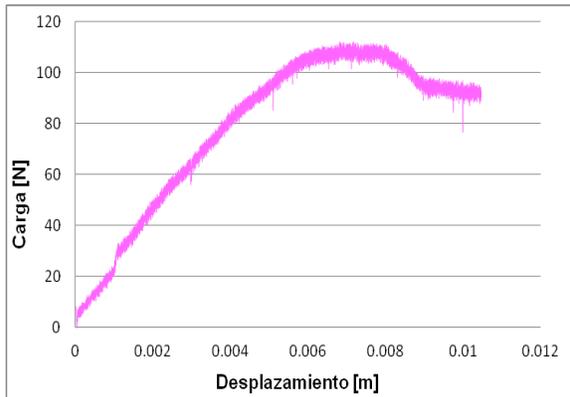


a) Prueba inicial

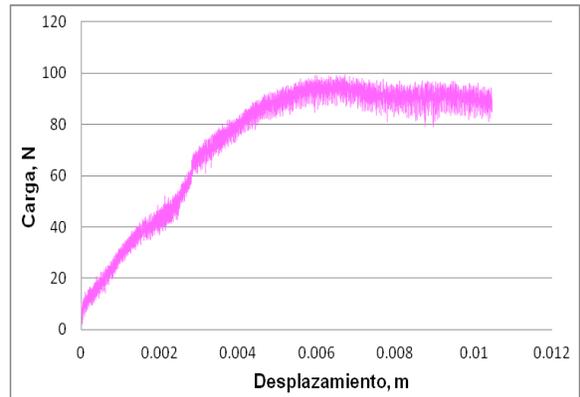


b) Prueba después de la falla

2) Envase de agua

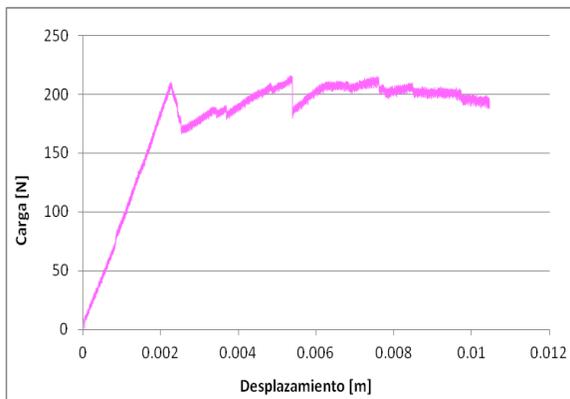


a) Prueba inicial

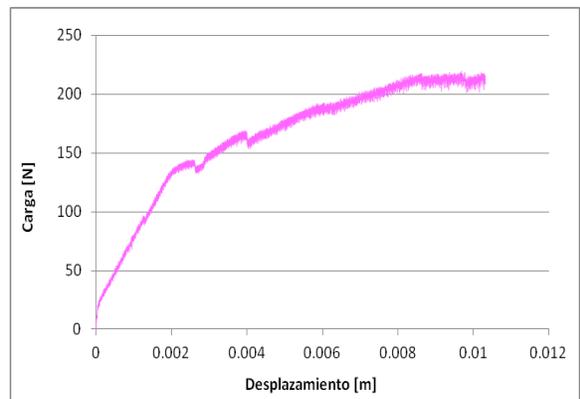


b) Prueba después de la falla

3) Envase de refresco

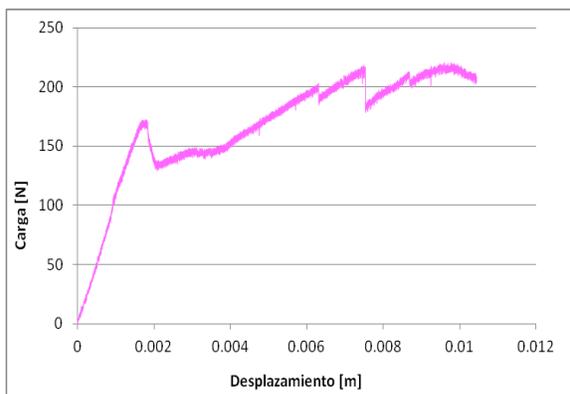


a) Prueba inicial

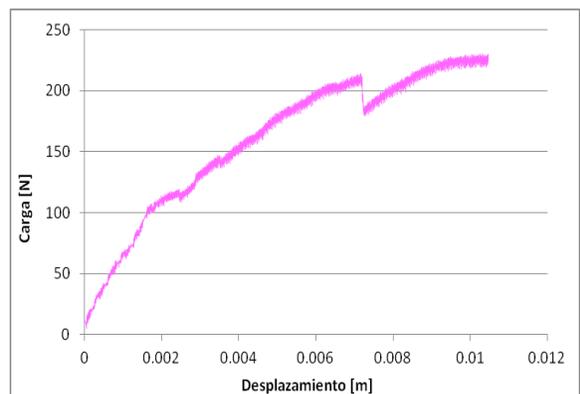


b) Prueba después de la falla

4) Envase de refresco



a) Prueba inicial



b) Prueba después de la falla

4.3.2.2 Un envase relleno con bolsas plásticas

Los resultados de las pruebas para envases rellenos con bolsas plásticas se resumen a continuación:

ENVASE	VOLUMEN	CARGA MÁXIMA	PESO
	L	Kg	g
Refresco	2.50	33.72	370.12
Agua mineral tipo 2	2.00	53.80	341.50
Agua mineral	1.75	52.09	334.40
Agua mineral tipo 1	2.00	41.73	343.00

Tabla 4. Resultados envases rellenos de bolsas plásticas

Haciendo una tabla comparativa para analizar si se obtuvo una mejoría con el relleno de las botellas se deduce que para el planteamiento de este trabajo no es conveniente.

Aunque se tuvo un considerable aumento en la resistencia de los envases (16.50% para el que presentó el menor incremento y 140.70% para aquel que presentó el mayor) el aumento en el peso de éstos (501.11 – 572.94%) hace que sea más ventajoso utilizarlos vacíos. Estos resultados son igualmente importantes ya que este conocimiento puede resultar bastante útil para otras aplicaciones donde los suelos no requieran un mejoramiento o la construcción de edificaciones realizadas con materiales de bajo peso específico.

ENVASE	VOLUMEN	ENVASES VACÍOS		ENVASES RELLENOS		DIFERENCIA		INCREMENTO	
		CARGA MÁXIMA	PESO	CARGA MÁXIMA	PESO	CARGA MÁXIMA	PESO	CARGA MÁXIMA	PESO
		L	Kg	g	Kg	g	Kg	g	%
Refresco	2.50	24.00	55.38	33.72	370.12	9.72	314.74	40.49	568.32
Agua mineral tipo 2	2.00	22.35	55.48	53.80	341.50	31.45	286.02	140.70	515.54
Agua mineral	1.75	44.71	55.63	52.09	334.40	7.38	278.77	16.50	501.11
Agua mineral tipo 1	2.00	22.26	50.97	41.73	343.00	19.47	292.03	87.48	572.94

Figura 4.4 Tabla comparativa de envases vacíos vs envases rellenos con bolsas plásticas

En cuanto a la deformación que presentaron los envases rellenos en comparación con los envases vacíos se observa que el aire comprimido trabaja mejor que el plástico, ya que en los envases rellenos la deformación se incrementó, aunque este incremento fue en muy baja magnitud.

ENVASE	VOLUMEN	LONGITUD INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA ÚLTIMA			
			ENVASES VACÍOS		ENVASES RELLENOS	
			L	mm	mm	%
Refresco	2.50	365.00	2.91	0.7973%	3.70	1.0133%
Agua Mineral tipo 2	2.00	345.00	2.55	0.7391%	4.27	1.2384%
Agua Mineral	1.75	310.00	2.38	0.7677%	2.47	0.7979%
Agua Mineral tipo 1	2.00	335.00	1.81	0.5403%	2.79	0.8330%

4.3.2.3 Arreglo de envases con distintas configuraciones

Se realizaron ensayos con paquetes formados por 6 envases para estudiar el comportamiento de las botellas trabajando en conjunto. La decisión de que los paquetes se conformaran con 6 botellas se tomó debido a las dimensiones de la máquina Toledo, en la cual se realizaron los ensayos.



Marco metálico

Máquina Toledo

Configuraciones

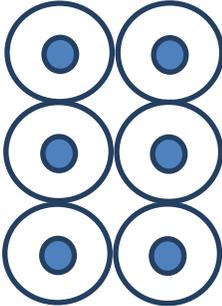
Se estudiaron paquetes de botellas con distintas configuraciones para obtener aquella que mostrara el mejor comportamiento. Debido a las dimensiones del marco metálico de la máquina Toledo la geometría de dichas configuraciones se vio limitada por lo que no se pudo ensayar un paquete con arreglo a tresbolillo, el cual se cree que aportaría una

mayor resistencia al conjunto de envases ya que se sabe es el mejor arreglo para componentes cilíndricos por brindar una mayor cantidad de puntos de contacto a los elementos y un menor espacio entre ellos.

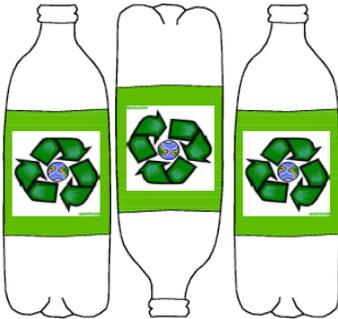
Las configuraciones que se utilizaron fueron las siguientes:



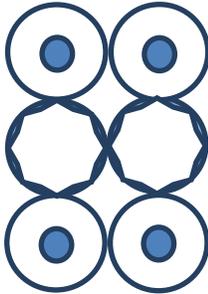
a) Corte transversal



b) Vista en planta



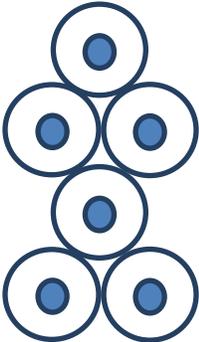
a) Corte transversal



b) Vista en planta



a) Corte transversal



b) Vista en planta

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:



A. Configuración 1

Esta configuración se tomó como la configuración base, por lo que los 4 envases seleccionados anteriormente se probaron con esta disposición. Posteriormente se ensayaron paquetes de dos tipos distintos de envase para probar las configuraciones restantes y realizar una comparación.

ENVASE	VOLUMEN	CARGA MÁXIMA RESISTIDA	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	L	Kg	mm	mm	%
Agua mineral	1.75	190.13	310.00	2.630	0.8484%
Agua mineral tipo 1	2	155.15	335.00	4.303	1.2843%
Refresco	2.5	146.80	365.00	6.765	1.8534%
Agua mineral tipo 2	2	139.80	345.00	5.100	1.4783%

En la tabla se puede observar que el envase para agua mineral con volumen de 1.75 litros es el más resistente, pero presentó en todas las pruebas un tipo de falla característico que se explicará más adelante, en la cual los envases de las orillas fallaron primero provocando una inclinación excesiva en la superficie de aplicación de la carga (la placa).

En la aplicación real de la utilización de envases en suelos, es posible que esto no suceda o suceda con mucha menor frecuencia ya que todos los envases tendrían un confinamiento. Con los otros tipos de envases, esta falla sólo se presentó en el envase de refresco de 2.5 litros una vez.



B. Configuración 2

Como se puede observar en los resultados obtenidos la carga máxima resistida por el conjunto de botellas disminuyó al utilizar esta configuración. También se nota que la deformación aumenta.

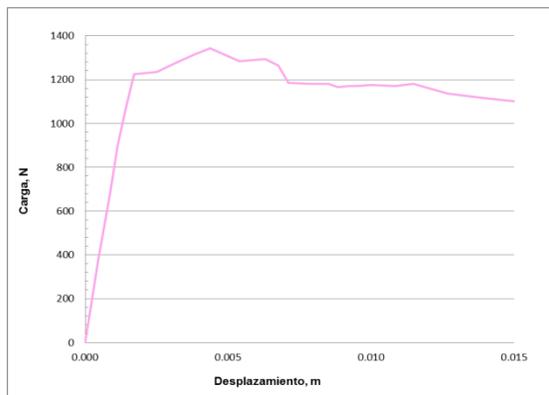
ENVASE	VOLUMEN	CARGA MÁXIMA RESISTIDA	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	L	Kg	mm	mm	%
Refresco	2.5	116.80	365.00	8.035	2.2014%

TABLA COMPARATIVA

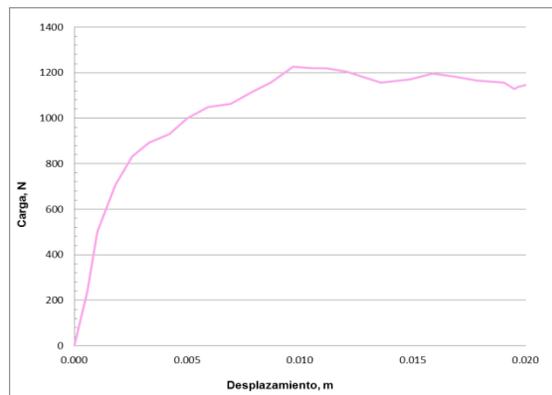
ENVASE	VOLUMEN	CONFIGURACIÓN	CARGA MÁXIMA	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	L		Kg	mm	mm	%
Refresco	2.5	1	146.80	365.00	6.765	1.8534%
		2	116.80		8.035	2.2014%

La resistencia disminuyó 20.44% mientras que la deformación aumentó 18.77%.

FIGURA 4.5 GRÁFICAS COMPARATIVAS DE CONFIGURACIÓN



Configuración 1



Configuración 2



C. Configuración 3

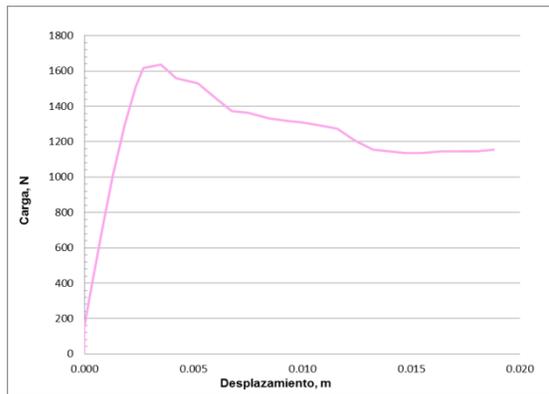
Los resultados muestran que la configuración 1 posee una mayor resistencia y una menor deformación. Con la configuración 2 el paquete de envases presentó una disminución de 6.51% en la resistencia y un aumento de 60.91% en la deformación. Es muy posible que la deformación excesiva se deba a la falta de simetría en la configuración, aun así demostró tener muy poca pérdida de resistencia por lo que una configuración similar a ésta pero con simetría podría ser una buena opción. Unir un gran número de botellas en esta disposición formaría una configuración a tresbolillo, en la que existe simetría, por lo que se vería disminuida la deformación y posiblemente aumentada la resistencia.

ENVASE	VOLUMEN	CARGA MÁXIMA RESISTIDA	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	L	Kg	mm	mm	%
Agua mineral tipo 1	2	145.05	335.00	6.923	2.0667%

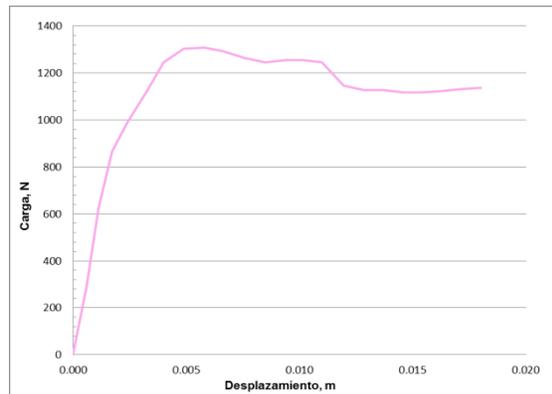
TABLA COMPARATIVA

ENVASE	VOLUMEN	CONFIGURACIÓN	CARGA MÁXIMA	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	L		Kg	mm	mm	%
Agua mineral tipo 1	2	1	155.15	335.00	4.303	1.2843%
		3	145.05		6.923	2.0667%

FIGURA 4.6 GRÁFICAS COMPARATIVAS DE CONFIGURACIÓN



Configuración 1



Configuración 3

Fallas características

El comportamiento óptimo del grupo de botellas es aquel en el que cada uno de los envases se comporta de manera similar al resto, trabajando así el conjunto como un solo componente y no como elementos individuales. Con esto, cada elemento del grupo presenta una deformación similar llegando prácticamente al mismo tiempo a la falla.

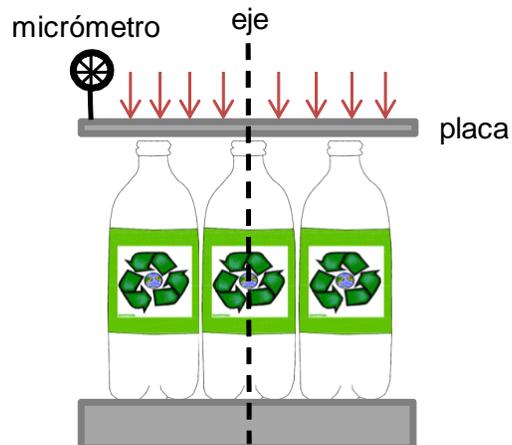




Figura 4.7 Prueba con comportamiento óptimo. En la imagen de la derecha se observa el nivel marcando la horizontalidad de la placa después de haber fallado los envases

Este comportamiento no se presenta en todos los casos ya que depende de diferentes factores como son la homogeneidad en la producción de los envases (forma, gramaje, etc.), la simetría del arreglo formado y la distribución uniforme de la carga.

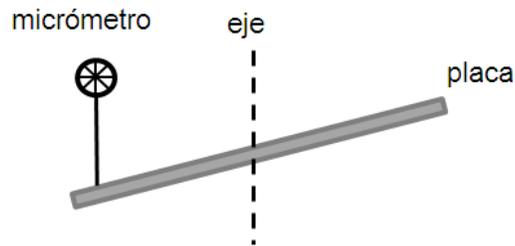
En algunos ensayos no se presentó el comportamiento deseado ya que no se consiguió tener una carga uniformemente repartida a causa de las limitantes presentes al momento de configurar el sistema. Como consecuencia de las dimensiones del marco metálico de la máquina Toledo la colocación de la placa metálica utilizada para distribuir uniformemente la carga se vio obstaculizada. La metodología que se empleó para colocar la placa metálica era deslizándola en el espacio existente entre el marco metálico y los envases lo que en algunas ocasiones tuvo como consecuencia una ligera inclinación en ciertas botellas. Además, esta inclinación causó una excentricidad en la carga por lo que ambos eventos provocaron que algunas botellas cargaran más que otras fallando éstas primero en ese plano de inclinación. Debido a esto se presentó una inclinación notable en la placa lo que no sería conveniente al momento de usar los envases en una aplicación real. Además, con esto se manifiesta la importancia que tiene la verticalidad de las botellas para exhibir un buen comportamiento.



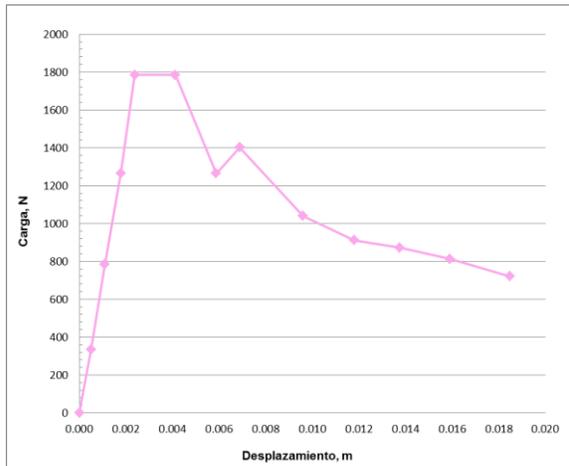
Figura 4.8 Falla provocada por la falta de verticalidad ocasionada en ciertos envases al momento de colocar la placa metálica

El valor de resistencia a la carga aplicada que tuvieron los conjuntos de envases que presentaron este tipo de fallas no se vio afectado pero la medición de las deformaciones sí, ya que no se presentó una deformación similar en cada una de las botellas. Se presentaron dos casos distintos según el plano de inclinación de la placa que se muestran a continuación:

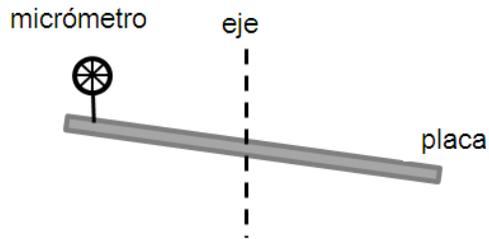
- a) En este caso se puede observar que el micrómetro toma las mediciones de los envases que llegaron primero a la falla los cuales presentan deformaciones excesivas, situación que no ocurre en todos los elementos del conjunto. Al inclinarse la placa la carga aplicada sobre ella deja de distribuirse uniformemente por el conjunto de envases lo que produce condiciones indeseables en el comportamiento. Las deformaciones existentes en los envases por este tipo de falla son de mayor magnitud que las presentes en aquellas muestras que se comportaron de la manera esperada. Además, las deformaciones permanentes también son de mayores.



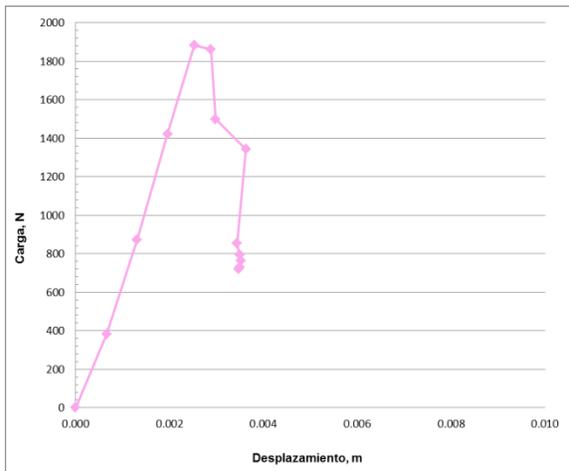
La placa se inclinó como muestra el diagrama afectando los resultados obtenidos por el micrómetro



- b) Cuando se tiene este tipo de inclinación en la placa el micrómetro marca una disminución de las deformaciones presentes pudiéndose interpretar como que el material no sólo no se está deformando, sino que está regresando a su estado inicial de esfuerzos aún con la aplicación de la carga, situación que no es real.



La placa se inclinó como muestra el diagrama afectando los resultados obtenidos por el micrómetro



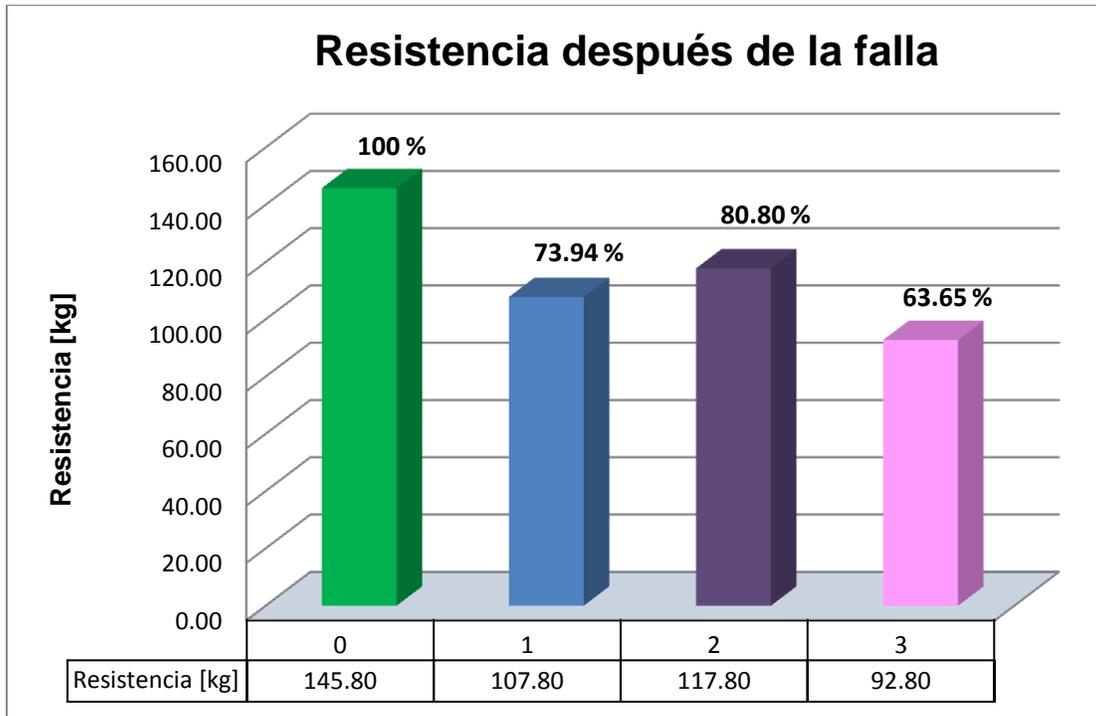
Resistencia después de la falla

A un grupo de envases ya ensayado se les realizó una primera, segunda y tercera prueba de compresión bajo carga estática con los mismos parámetros que la prueba inicial con la finalidad de estudiar la resistencia obtenida en el paquete después de su falla. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Prueba	k [N/m]	Carga [N]	Carga [kg]	Carga [N]	Carga [kg]	Carga [N]	Carga [kg]	Carga [N]	Carga [kg]
		Prueba	Prueba	Placa	Placa	Precarga	Precarga	TOTAL	TOTAL
0	115,029	1,313.20	134.00	96.04	9.80	19.60	2.00	1,428.84	145.80
1	101,076	931.00	95.00	96.04	9.80	29.40	3.00	1,056.44	107.80
2	37,115	1,029.00	105.00	96.04	9.80	29.40	3.00	1,154.44	117.80
3	35,383	784.00	80.00	96.04	9.80	29.40	3.00	909.44	92.80
PROMEDIO		1,014.30	103.50					1,137.29	116.05

Prueba antes de la falla

En la tabla se puede observar que la primera prueba (0) es la que tuvo un valor mayor de resistencia, ya que el material no se había llevado a su falla anteriormente. Después de haber fallado el material, la resistencia presenta un valor para la prueba 1 del 73.94%, para la prueba 2 del 80.80% y para la prueba 3 del 63.65% respecto al valor obtenido en la prueba 0. Esto muestra que el material tiene cierta recuperación.



Velocidad de deformación

Se realizaron varios ensayos para un mismo tipo de envase con una misma configuración y con velocidades diferentes de la máquina Toledo. Los resultados obtenidos muestran que la resistencia a la compresión del PET aumenta en la medida que es mayor la velocidad de deformación de la muestra.

Velocidad Toledo	Velocidad mm/seg	Carga Máxima [kg]
10	0.074	146.80
7	0.055	135.00
5	0.046	122.05
2	0.024	115.30

Tabla 4.x Nombre

También se compararon las deformaciones presentadas para cada velocidad. La velocidad en la que los envases presentaron una mayor deformación fue en la 7 (0.055 mm/seg). Seguida de ésta se encuentra la velocidad 10 (0.074 mm/seg). Los envases

presentaron la menor deformación en la velocidad media de la máquina, la velocidad 5 (0.046 mm/seg).

VELOCIDAD TOLEDO	VELOCIDAD	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	mm/seg		mm	%
10	0.074	365.00	6.77	1.8534%
7	0.055	365.00	9.82	2.6904%
5	0.046	365.00	4.36	1.1945%
2	0.024	365.00	4.59	1.2575%

Para confirmar los resultados obtenidos se realizaron pruebas a otros dos tipos de envases con la velocidad 9, la cual no se había probado anteriormente. Los resultados obtenidos muestran lo siguiente:

a) Envase de agua mineral 2 L tipo 2

VELOCIDAD TOLEDO	VELOCIDAD	CARGA MÁXIMA	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	mm/seg			[kg]	mm
10	0.074	139.80	345.00	5.10	1.4783%
9	0.069	94.50	345.00	6.87	1.9913%

b) Envase de agua mineral 1.75 L

VELOCIDAD TOLEDO	VELOCIDAD	CARGA MÁXIMA	ALTURA INICIAL	DEFORMACIÓN EXISTENTE EN LA CARGA MÁXIMA	
	mm/seg			[kg]	mm
10	0.074	190.13	310.00	2.63	0.8484%
9	0.069	176.30	310.00	3.61	1.1645%

Los resultados concuerdan con los anteriormente mostrados. La carga máxima aumenta al aumentar la velocidad de deformación. En cuanto a la deformación presente en cada envase, ésta es mayor para la velocidad 9 (0.069 mm/seg) en ambos casos.

Influencia de la temperatura

El PET es un termoplástico por lo que la temperatura es un factor importante en su comportamiento. Los termoplásticos presentan cambios en su estado físico derivados de la acción tanto de cargas como de la temperatura.

Se ha observado que los polímeros (por ejemplo el PET), los vidrios y otros materiales inorgánicos amorfos presentan un fenómeno conocido como temperatura de transición vítrea, Tg. La Tg es la temperatura a la que se da una pseudotransición termodinámica en

ciertos materiales. Esto quiere decir que, termodinámicamente hablando, no es propiamente una transición. Se entiende que es un punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido del material. La T_g no es una temperatura a la cual específicamente ocurre el cambio de estado y para fines prácticos, no es tan importante el valor exacto de T_g , pues es comprensible que alrededor de esta temperatura, el polímero adquiere cierta plasticidad.

Al superar la temperatura de transición vítrea, el material pasa a un estado termoelástico, parecido al del caucho. Esto se debe a que las fuerzas intermoleculares se vuelven tan pequeñas que las macromoléculas pueden deslizarse unas sobre otras cuando actúa una fuerza exterior. Por encima de la T_g los enlaces secundarios de las moléculas son mucho más débiles que el movimiento térmico de las mismas, por ello el polímero se torna gomoso y adquiere cierta elasticidad y capacidad de deformación plástica sin fractura. La resistencia cae considerablemente, mientras que la deformación aumenta bruscamente. Si sigue aumentando la temperatura, las fuerzas intermoleculares llegan a desaparecer. El plástico pasa de manera continua desde el estado termoelástico al estado fundido. Esta transición se caracteriza por el intervalo de temperaturas de fusión (T_F).

Cuando el material se encuentra por debajo de su temperatura de transición vítrea se vuelve rígido y quebradizo igual que el vidrio. Aumenta su densidad, dureza y rigidez, además su porcentaje de deformación disminuye radicalmente.

La temperatura de transición vítrea que presenta el PET es de 70°C .

A comparación de otros materiales, como el vidrio, el PET tiene una temperatura de transición vítrea demasiado baja, razón por la cual los envases hechos con este plástico no son retornables. Para que un envase sea retornable tiene que pasar por un proceso de esterilización que se realiza a temperaturas más altas de las que el PET puede resistir.

Las temperaturas a las que trabaja el PET normalmente (temperatura ambiente) están por debajo de la T_g , aun así se decidió estudiar el efecto de los cambios de temperatura sobre los envases de PET cuando están siendo sometidos a cargas externas. Se tomaron mediciones a lo largo de un día para conocer el comportamiento en un día común en el Valle de México para una botella de envase de refresco de 2.5 litros bajo una carga de 20 kilogramos. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

HORA	TEMPERATURA	LECTURA DEL MICRÓMETRO	Δ DEFORMACIÓN
[hr:min:seg]	[$^\circ\text{C}$]	[mm]	[mm]
06:45:00 a.m.	18.7	15.395	0.000
09:38:00 a.m.	22.1	15.449	0.054
12:08:00 p.m.	23.1	15.543	0.094
14:17:00 p.m.	23.0	15.548	0.005
16:42:00 p.m.	23.9	15.640	0.092
19:45:00 p.m.	23.5	15.622	-0.018
20:25:00 p.m.	21.7	15.582	-0.040

Como se puede observar en la tabla la deformación presentó fluctuaciones a lo largo del día debido a los cambios de temperatura. La menor deformación se obtuvo con la menor

temperatura que se midió, lo mismo sucede para la mayor deformación. La temperatura de la última medición es de 21.7°C y presenta una lectura del micrómetro de 15.582²³, deformación mayor que la presente para 22.1°C. Esto podría interpretarse como una falta de relación lineal entre temperatura y deformación pero en realidad muestra que el envase, al disminuir la temperatura, se está recuperando ya que la deformación existente antes de bajar la temperatura hasta 21.7°C era mucho mayor que la presente antes de llegar a 22.1°C. Después del pico de temperatura máxima en el día (23.9°C) se puede observar claramente como el envase comienza a adquirir mayor resistencia ante la carga aplicada.

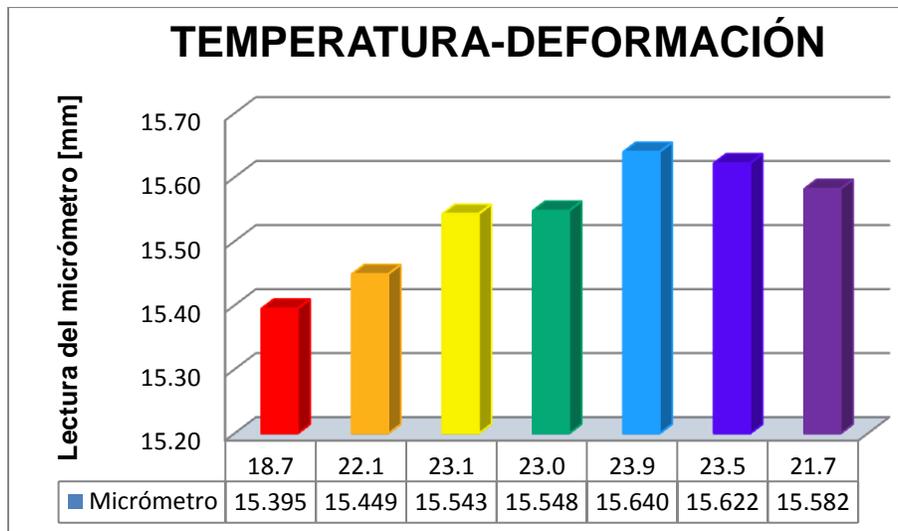


FIGURA 4.8 Efectos de las fluctuaciones de temperatura en la deformación a lo largo de un día

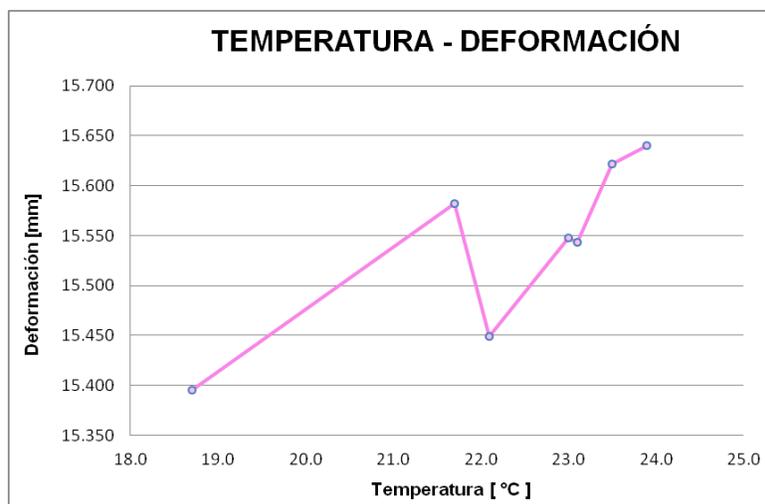


FIGURA 4.9 Gráfica temperatura-deformación de un envase de PET

²³ Por la configuración que tiene el sistema, en la cual el micrómetro se coloca por encima del envase y éste al deformarse disminuye su dimensión en el eje vertical, las lecturas del micrómetro muestran una deformación mayor a un mayor valor de lectura.

4.4 Efectos de carga sostenida en el tiempo (Creep)

El fenómeno conocido como Creep o deformación por fluencia lenta se refiere al incremento en la deformación que presenta un material viscoelástico a través del tiempo cuando está sometido a una carga constante.

En muchas aplicaciones dentro de la ingeniería civil, los componentes a utilizar en las obras se ven precisados a soportar cargas constantes durante lapsos prolongados de tiempo, como es el caso de los envases para el mejoramiento de los suelos. Bajo dichas circunstancias el material puede continuar deformándose hasta que su utilidad se ve seriamente perjudicada. "Tales tipos de deformaciones dependientes del tiempo pueden ser casi imperceptibles, pero crecen durante toda la vida útil de la pieza y llevan a la rotura, aún sin que la carga haya aumentado."²⁴ Por esta razón es importante conocer el comportamiento que presenta el PET ante un esfuerzo sostenido.



FIGURA 4.10 Prueba Creep

Para estudiar los efectos ante un esfuerzo sostenido en el PET se seleccionó el tipo de envase a probar, que en este caso fue el de refresco de 2.5 litros. Con los ensayos de compresión estática hechos anteriormente se obtuvo que la carga máxima resistida por esta botella es de 24 kilogramos. Aplicando un factor de reducción de 0.833, se obtuvo una carga de 20 kilogramos, que es la carga de diseño para este ensaye.

El envase seleccionado fue colocado en un marco de carga como lo muestra la figura 4.10. Mediante pesas se cargó el sistema con los 20 kilogramos necesarios, midiéndose las deformaciones presentes en el envase con un micrómetro colocado en la parte posterior del marco.

²⁴ <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Creep.pdf>

4.4.1 Presentación de resultados

Los resultados de la prueba de creep se presentan en la Figura 4.11. En esta figura se puede observar la evolución de las deformaciones presentes en el envase a lo largo de un período de 32 días.

4.4.2 Análisis de resultados

En la Figura 4.11 puede observarse que al inicio de la prueba se produjeron deformaciones instantáneas del orden de 1.58%, las cuales son de carácter elástico debido a que en este periodo las deformaciones existentes son menores a la deformación de fluencia. Posteriormente, conforme transcurre el tiempo, las deformaciones disminuyen estabilizándose en un rango de valores de ± 0.2 milímetros. Dicha estabilización concurre a partir del día 23 de la prueba.

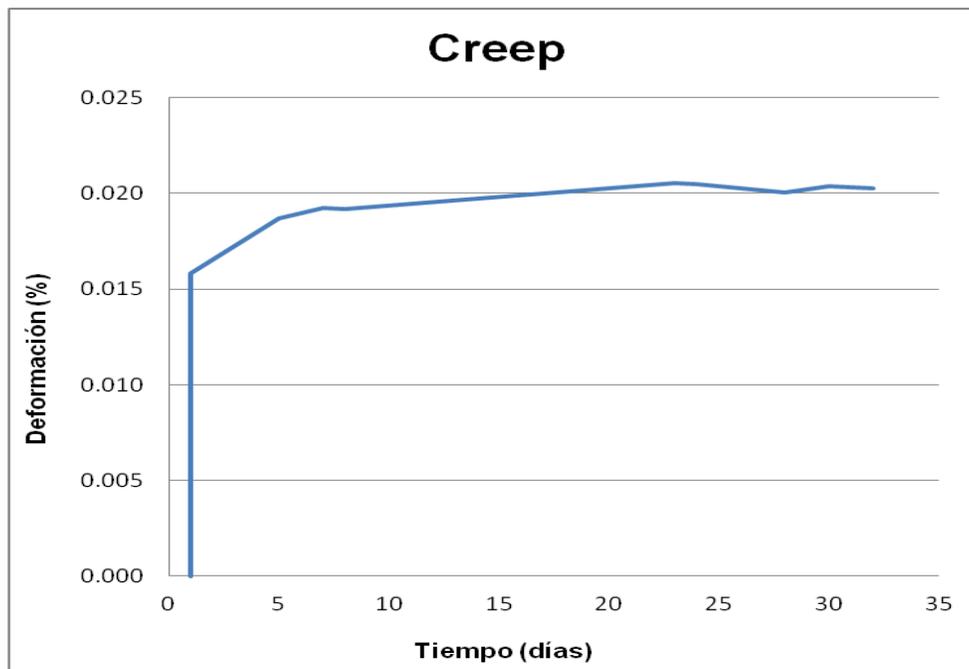


Figura 4.11 Evolución de las deformaciones en el tiempo

Aunque la prueba realizada muestra que el material tiende a estabilizarse después de un período corto, es necesario realizar este ensaye para un lapso mayor ya que con el transcurrir del tiempo puede presentarse otro tipo de comportamiento.

4.5 Tendencia del comportamiento del PET

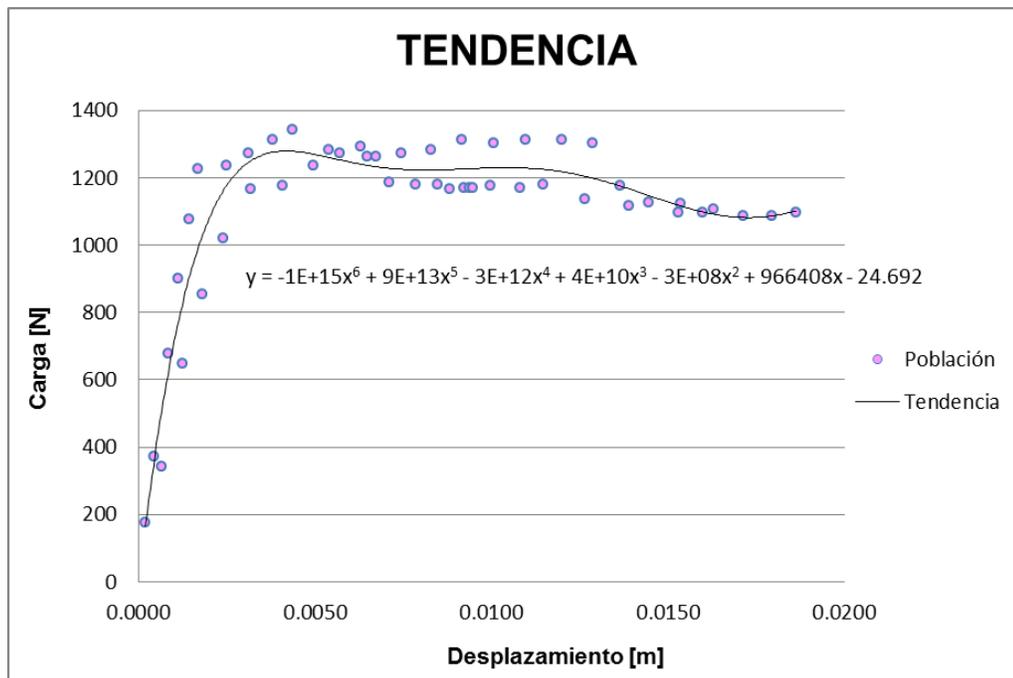
A continuación se muestran las gráficas de tendencia para cada tipo de configuración ensayada.



Configuración 1

Como se mencionó anteriormente, el envase para agua mineral de 1.75 litros presentó en todos los ensayos una deformación excesiva en algunas de las botellas que conformaron el paquete. En consecuencia, las gráficas obtenidas de dichos ensayos no son consistentes unas con otras, por lo que no se pudo obtener una tendencia para ese tipo de envase.

a) Refresco de 2.5 litros

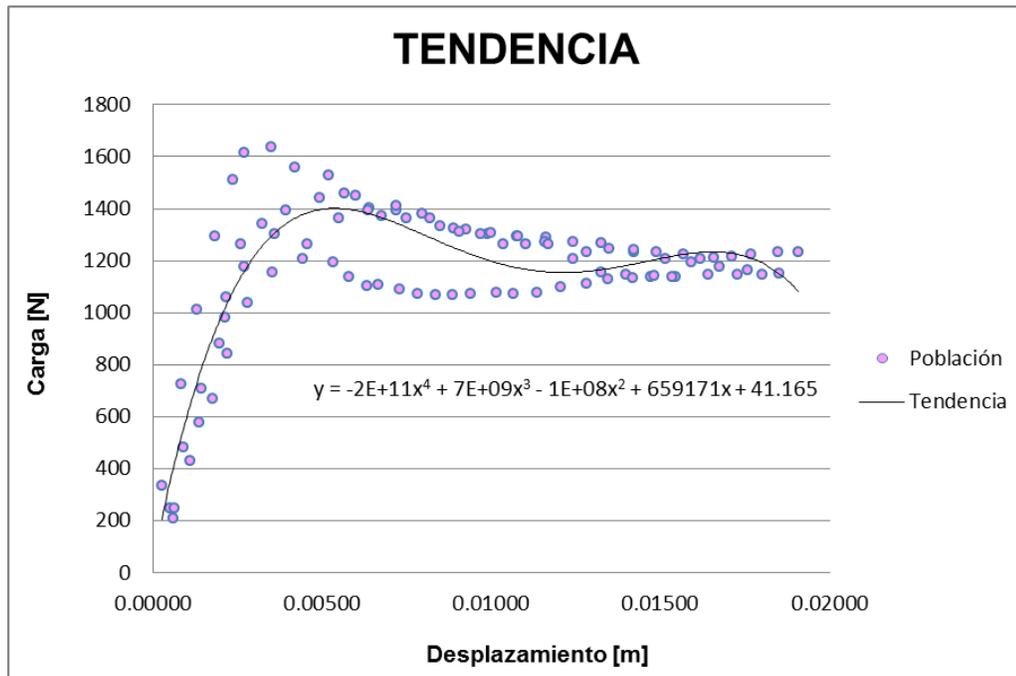


Ecuación de tendencia

C = carga [N]

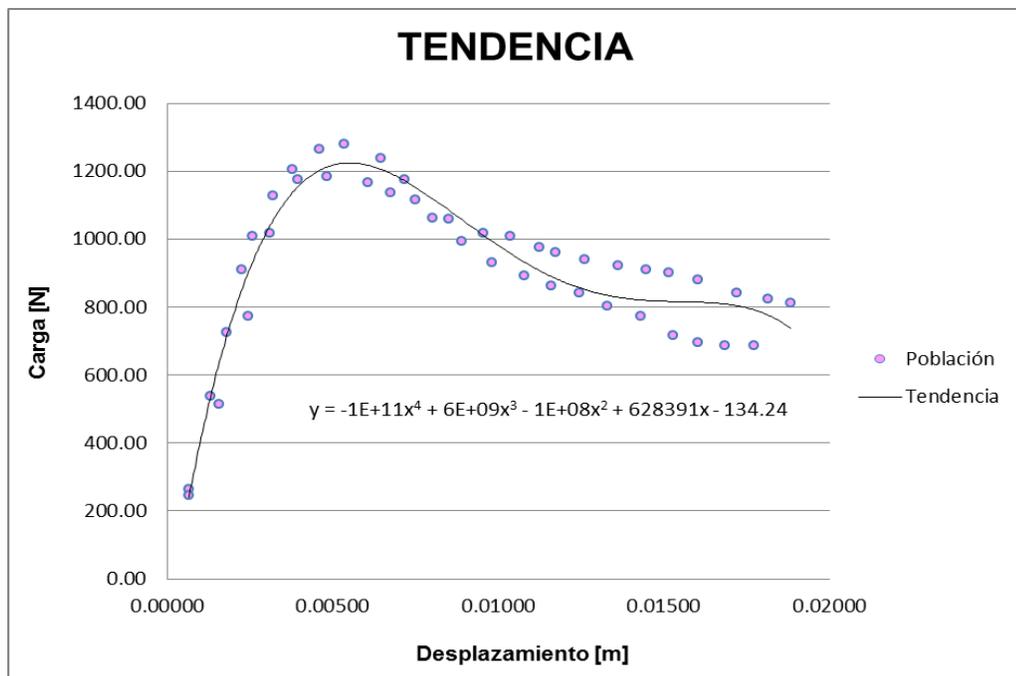
δ = deformación [m]

b) Agua mineral de 2 litros (tipo 1) (Peñañiel)



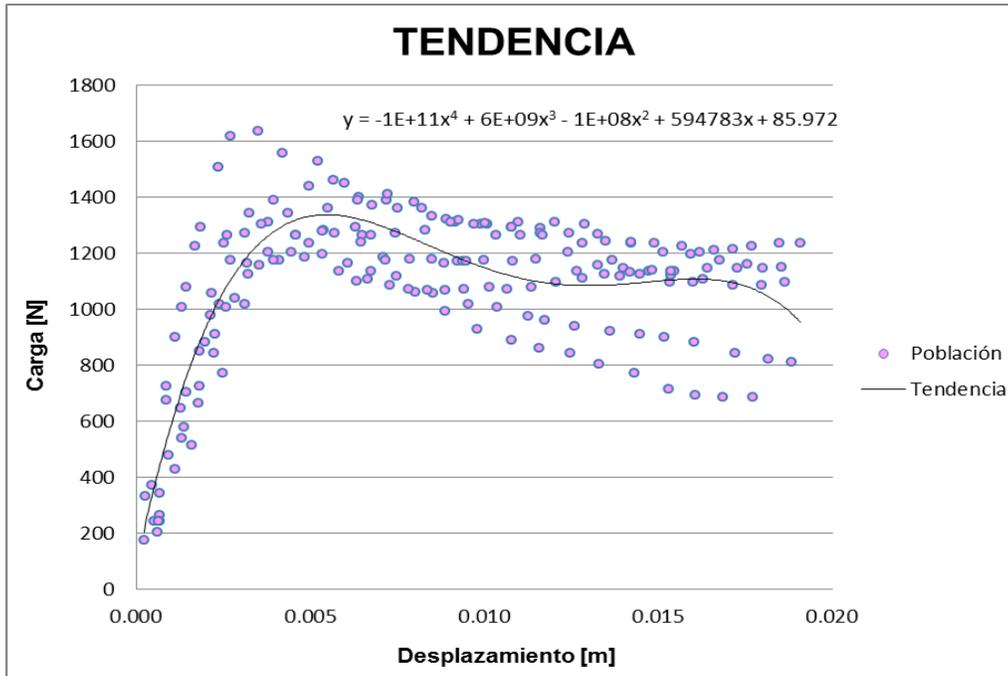
Ecuación de tendencia

c) Agua mineral de 2 litros (tipo 2)

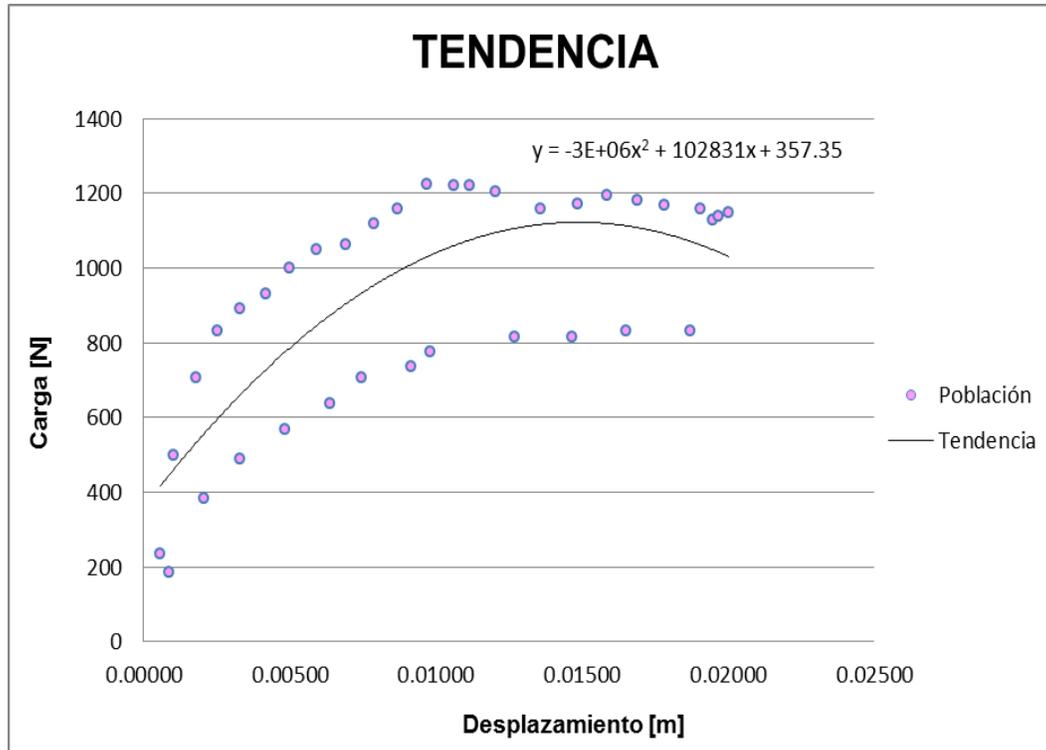


Ecuación de tendencia

d) Tendencia que presentan los 3 tipos de envase juntos

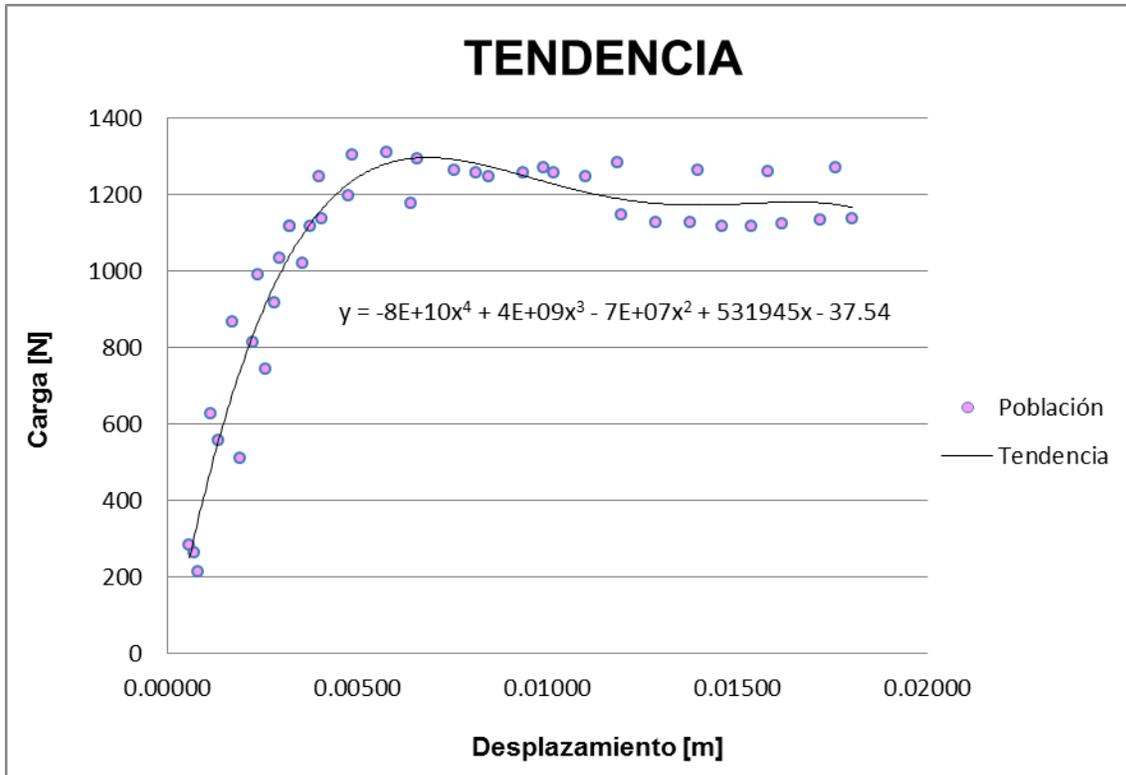


Ecuación de tendencia



Ecuación de tendencia

D. Configuración



Ecuación de tendencia

4.5.1 Aplicación del modelo

Dentro de las distintas aplicaciones en las que los envases se pueden utilizar dentro del campo de la ingeniería civil, específicamente en el mejoramiento de suelos de baja capacidad de carga, se seleccionó el caso práctico de la utilización de los envases para mejorar un suelo utilizado para desplantar una casa habitación. Se debe realizar un estudio más específico sobre el procedimiento constructivo, la maquinaria y mano de obra necesarias, entre otras para que este proyecto sea factible, por ahora es un ejemplo de una estructura con las características necesarias para demostrar la resistencia de los envases. Una de las ventajas que presenta la construcción de una casa con este tipo de mejoramiento de suelo es en la parte económica.

El caso práctico sólo pretende ser un ejemplo de una edificación que presenta las características necesarias para ser soportada por las botellas. Quedan fuera del alcance

el diseño de la cimentación, de los elementos estructurales (se tomó un plano con los elementos ya calculados) y el comportamiento sísmico.

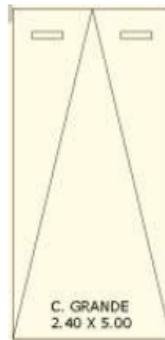
ARQUITECTURA

El predio es de forma rectangular de 7 x 15 metros, lo que se significa un área de 105 m². La estructura será una casa habitación con un área de 66.22 m² construidos.

Según las Normas Técnicas Complementarias para el proyecto arquitectónico, la vivienda contará con un cajón de estacionamiento. Las medidas del cajón serán de 5.00 x 2.40 m.

USO	RANGO O DESTINO	No. MÍNIMO DE CAJONES DE ESTACIONAMIENTO
HABITACIONAL		
UNIFAMILIAR	Hasta 120 m ²	1 por vivienda
	Más de 120 m ² hasta 250 m ²	2 por vivienda
	Más de 250 m ²	3 por vivienda

Tabla 1.1 de las NTC para el proyecto arquitectónico



Dimensiones del cajón de estacionamiento

La casa constará de una planta con dos recámaras, un baño completo, sala comedor, una cocina, un patio de servicio y jardín. Las dimensiones que tendrá cada local se muestran a continuación:

LOCAL	ÁREA ÚTIL	LADO MÍNIMO	ALTURA
	m ²	m	m
Recámara principal	12.89	3.3	2.3
Recámara adicional	12.74	2.4	2.3
Sala-comedor	22.84	3.3	2.3
Cocina	7.10	2.5	2.3
Baño	3.30	1.4	2.3
Cuarto de Lavado	3.56	1.4	2.3

TIPO DE EDIFICACIÓN	LOCAL	Área mínima (En m ² o indicador mínimo)	Lado mínimo (En metros)	Altura mínima (En metros)	Obs.
HABITACIONAL					
VIVIENDA UNIFAMILIAR VIVIENDA PLURIFAMILIAR	Recámara principal	7.00	2.40	2.30	
	Recámaras adicionales, alcoba, cuarto de servicio y otros espacios habitables	6.00	2.20	2.30	
	Sala o estancia	7.30	2.60	2.30	
	Comedor	6.30	2.40	2.30	
	Sala-comedor	13.00	2.60	2.30	
	Cocina	3.00	1.50	2.30	
	Cocineta integrada a estancia o a comedor	-	2.00	2.30	(a)
	Cuarto de lavado	1.68	1.40	2.10	
	Baños y sanitarios	-	-	2.10	(b)
	Estancia o espacio único habitable	25.00	2.60	2.30	

Tabla 2.1 de las NTC para el proyecto arquitectónico

Las NTC dicen que “el área de las ventanas para iluminación no será inferior al 17.5% del área del local en todas las edificaciones a excepción de los locales complementarios donde este porcentaje no será inferior al 15%. El porcentaje mínimo de ventilación será del 5% del área del local y el patio de iluminación y ventilación deberá tener una proporción mínima de 1/3 con relación a la altura de los paramentos del patio”. La edificación cumple con lo establecido anteriormente.

LOCAL		VENTANA			%
Tipo	Área interna	Ancho	Largo	Área	
Recámara	12.73	1.40	1.70	2.38	18.7%
Cocina	7.09	1.30	1.10	1.43	20.2%
Baño	3.40	1.00	0.60	0.60	17.6%
Sala-comedor	21.27	1.60	2.40	3.84	18.1%
Recámara	12.89	2.00	1.20	2.40	18.6%

Tabla 2. Porcentaje de ventanas por local

Las puertas de acceso, intercomunicación y salida deben tener una altura mínima de 2.10m y una anchura libre que cumpla con la medida de 0.60m por cada 100 personas o fracción pero sin reducir las dimensiones mínimas que se indican en la tabla 4.1

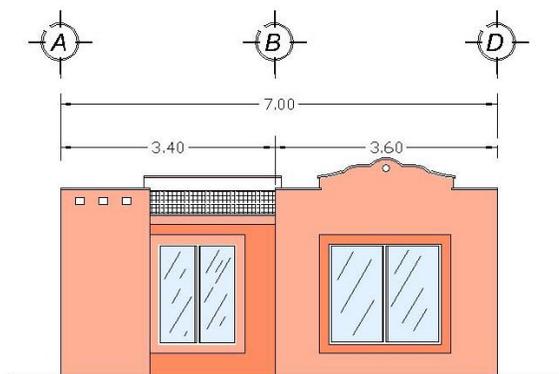
TIPO DE EDIFICACIÓN	TIPO DE PUERTA	ANCHO MÍNIMO (en metros)
HABITACIONAL		
Vivienda unifamiliar y plurifamiliar	Acceso principal	0.90
	Locales habitables	0.90
	Cocinas y baños	0.75

Tabla 4.1 de las NTC para el proyecto arquitectónico

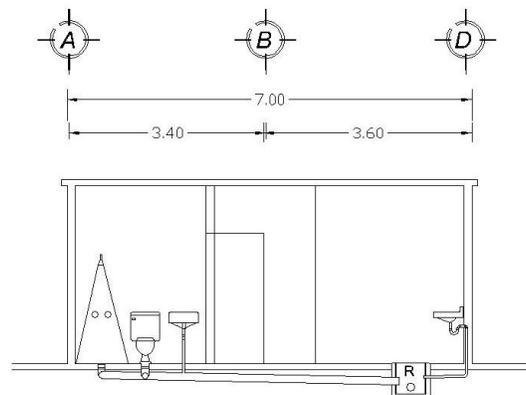
Las dimensiones de las puertas de casa habitación propuesta son las siguientes:

LOCAL	PUERTA	
Tipo	Ancho	Altura
Acceso principal	1.0	2.2
Recámaras	0.9	2.2
Cocina	1.0	2.2
Baño	0.8	2.2
Jardín	0.9	2.2

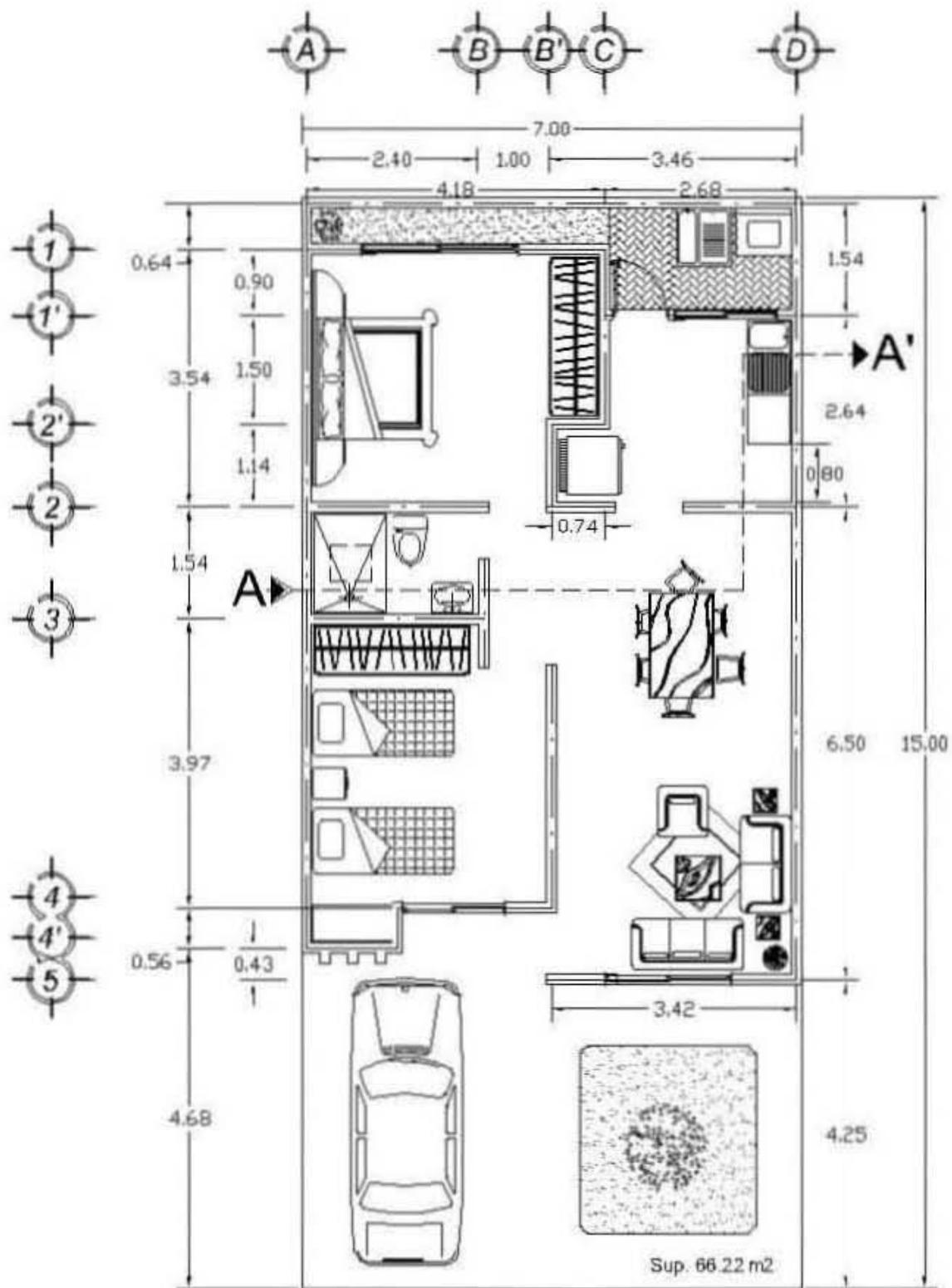
Tabla 3. Dimensiones de las puertas



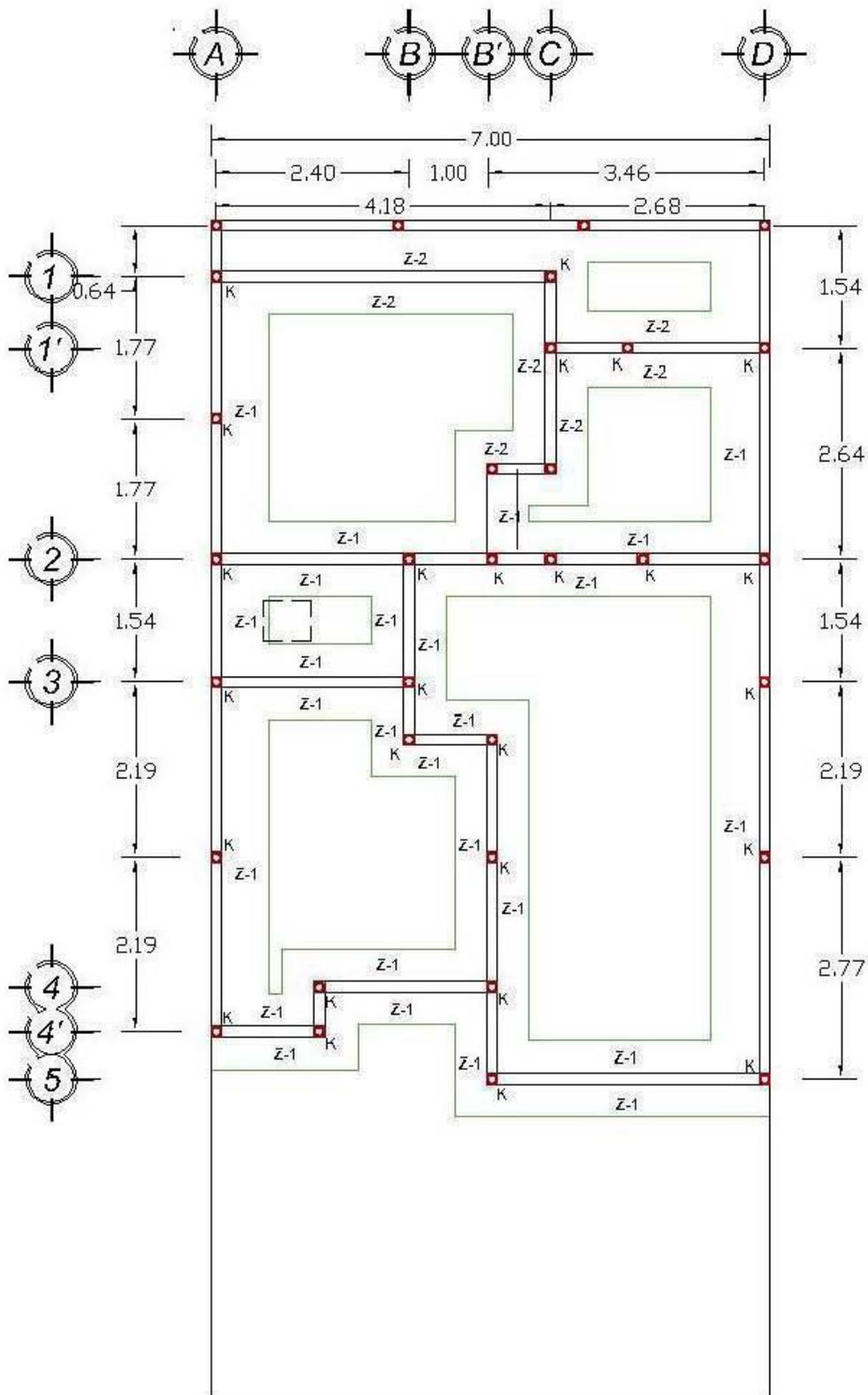
FACHADA PRINCIPAL



CORTE A-A'



PLANTA ARQUITECTONICA



PLANTA ESTRUCTURAL

ANÁLISIS DE CARGAS MUERTAS Y CARGAS VIVAS

Para empezar con el análisis de cargas vivas y muertas que pueden ser resistidas por los envases se realizó una tabla en donde se calculó la resistencia de cada tipo de envase por metro cuadrado. A la resistencia máxima obtenida se les aplica dos factores de reducción, el primero de 0.8 y el segundo de 0.85 para calcular la carga última de diseño.

ENVASE	VOLUMEN	ÁREA PLACA	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPERADA POR M ²	FR1	CARGA	FR2	CARGA
	L	m ²	Kg	Kg		Kg		Kg
Agua mineral	1.75	0.1219	190.13	1,559.72	0.80	1,247.78	0.85	1,325.76
Agua mineral tipo 1	2	0.1219	155.15	1,272.76	0.80	1,018.21	0.85	1,081.85
Refresco	2.5	0.1219	146.8	1,204.27	0.80	963.41	0.85	1,023.63
Agua mineral tipo 2	2	0.1219	139.8	1,146.84	0.80	917.47	0.85	974.82

El envase que más resiste es el de agua mineral de 1.75 litros, pero es el que presentó deformaciones excesivas en los envases no confinados, aún así los envases colocados en el centro de la configuración no mostraron deformaciones a gran escala por lo que deben realizarse estudios en los que todas las botellas del paquete presenten confinamiento, situación que se tendría en la aplicación real, ya que este envase presentó una resistencia mucho mayor que el resto. Debido a esto se decidió realizar análisis de cargas para este tipo de envase también.

Se realizó el cálculo para diferentes materiales para tener más de una opción en la construcción de la vivienda. El análisis de cargas muertas y vivas se muestra a continuación.

Opción No. 1

AZOTEA

LOSA CON PENDIENTE DEL 2%

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Enladrillado	0.020	1500	30.0
Mortero (Cal-arena)	0.010	1500	15.0
Losa de concreto armado	0.100	2200	220.0
Falso plafón			20.0
Instalaciones			15.0
Impermeabilizante	0.004	1250	5.0
C.M. adicional RCDF	por concreto		20.0
	por mortero		20.0
CARGA MUERTA TOTAL =			345.0
CARGA VIVA AZOTEA =			100

CARGA TOTAL POR AZOTEA =

445.0

Kg/m²

PLANTA

LOSA

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Firme de mortero de cemento	0.030	2200	66.00
Loseta vinílica			5.00
Losa de concreto armado	0.100	2200	220.00
C.M. adicional RCDF	por concreto		20.00
	por firme de concreto		20.00
	CARGA MUERTA TOTAL =		331.00
		CARGA VIVA =	170.00

CARGA TOTAL POR LOSA DE PLANTA =	501.0	Kg/m²
---	--------------	-------------------------

MURO

MURO HUECO CON RECUBRIMIENTO DE 2 CM

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Tabique hueco de cerámica e	0.120	900	108.0
Mortero (Cal-arena)	0.020	1500	30.0
CARGA MUERTA TOTAL =			138.0

Metros lineales de muro :	40	m
Altura:	2.3	m
Muro por altura:	92	m ²
Wtot =	12,551.65	kg
Área de la casa:	66.22	m ²

CARGA TOTAL POR MURO =	189.54	kg/m²
-------------------------------	---------------	-------------------------

CASTILLOS DE 0.14 X 0.14 m

Peso volumétrico del concreto reforzado	2400	kg/m ³
w =	47.04	kg/m
h =	2.3	m
W*h =	108.192	kg
Número de castillos =	32	
Wtot =	3,462.14	kg
Área de la casa =	66.22	m ²

CARGA TOTAL POR CASTILLOS = 52.28 kg/m²

TRABES DE 0.14 X 0.14 m

Peso volumétrico del concreto reforzado	2400	kg/m ³
w =	47.04	kg/m
Metros lineales de trabe	34.6	m
Wtot =	1,627.58	kg
Área de la casa =	66.22	m ²

CARGA TOTAL POR TRABES = 24.58 kg/m²

CARGA TOTAL DE LA ESTRUCTURA

Losa de azotea	445.0	kg/m ²
Losa de planta	501.0	kg/m ²
Muro	189.54	kg/m ²
Castillos 0.14x0.14 m	52.28	kg/m ²
Trabes 0.14x0.14 m	24.58	kg/m ²
CARGA TOTAL (C.M.+C.V.) =	1212.41	kg/m²

La casa construida con estos materiales es resistida por los envases de agua mineral de 1.75 litros utilizando ambos factores de reducción.

Opción No.2

En esta opción se utiliza como losa de azotea losacero. El análisis para muros, castillos y trabes es el mismo que en el caso anterior. La carga calculada para trabes y castillos será la misma para las demás opciones de diseño.

Se utilizó para el análisis una lámina de 2" de calibre 22 con un espesor de 10 centímetros. Las especificaciones para losacero dicen que el volumen teórica de concreto para una placa con estas características es de 0.077 m³ por m² de placa.

LOSACERO CON PENDIENTE DEL 2%

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Concreto	0.077	2200	169.4
Lámina y malla de refuerzo			17.3
Mortero (Cal-arena)	0.010	1500	15.0
Falso plafón			20.0
Instalaciones			15.0
Impermeabilizante	0.004	1250	5.0
C.M. adicional RCDF	por concreto		20.0
	por mortero		20.0
CARGA MUERTA TOTAL =			281.7
CARGA VIVA AZOTEA =			100

CARGA TOTAL POR AZOTEA =	381.7	Kg/m²
---------------------------------	--------------	-------------------------

PLANTA

LOSA

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Loseta de cerámica	0.015	1840	27.6
Pagazulejo	0.015	1500	22.5
Losa de concreto armado	0.100	2200	220.0
C.M. adicional RCDF	por concreto		20.0
CARGA MUERTA TOTAL =			290.1
CARGA VIVA =			170

CARGA TOTAL POR PISO =	460.1	Kg/m²
-------------------------------	--------------	-------------------------

CARGA TOTAL DE LA ESTRUCTURA

Losa de azotea	381.7	kg/m ²
Losa de planta	460.1	kg/m ²
Muro	189.54	kg/m ²
Castillos 0.14x0.14 m	52.28	kg/m ²
Trabes 0.14x0.14 m	24.58	kg/m ²
CARGA TOTAL (C.M.+C.V.) =	1108.21	kg/m²

Se ve una disminución en el peso total de la estructura de 104.20 kg/m², aun con esta reducción, los únicos envases capaces de soportar dicha vivienda siguen siendo los de agua mineral de 1.75 litros.

Opción No.3

Para esta opción se utilizó el mismo diseño de planta que para la opción anterior (No. 2), pero se cambió el diseño de losacero por uno de losa aligerada con casetones de poliestireno (EPS). El cálculo de la losa se muestra a continuación:

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Losa de concreto armado	0.15	2200	330.0
Casetón de EPS	0.15	10	1.5

El diseño que se hizo consta de casetones de 0.32 x 0.32 metros con un espesor de 0.15 metros con una separación de 10.50 centímetros.

Total casetones	432	
Separación	10.5	cm
Área de losa	72.34	m ²
Área de concreto	33.46	m ²
Área de casetones	38.88	m ²

Área de casetones por m² de losa= 0.4625 m²

Área de concreto por m² de losa = 0.5375 m²

LOSA CON CASETONES DE EPS		
Wconcreto =	152.6375	Kg/m ²
Wcasetón =	0.8062	Kg/m ²
CARGA TOTAL =	153.44	Kg/m²

Utilizando este dato se calcula el peso total por azotea.

AZOTEA

LOSA ALIGERADA CON PENDIENTE DEL 2%

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Mortero (Cal-arena)	0.010	1500	15.0
Losa aligerada con casetones	0.150		153.44
Falso plafón			20.0
Instalaciones			15.0
Impermeabilizante	0.004	1250	5.0
C.M. adicional RCDF	por concreto		20.0
	por mortero		20.0
CARGA MUERTA TOTAL =			248.4
CARGA VIVA AZOTEA =			100

CARGA TOTAL POR AZOTEA =	348.4	Kg/m²
---------------------------------	--------------	-------------------------

CARGA TOTAL DE LA ESTRUCTURA

Losa de azotea	348.4	kg/m ²
Losa de planta	460.1	kg/m ²
Muro	189.54	kg/m ²
Castillos 0.14x0.14 m	52.28	kg/m ²
Trabes 0.14x0.14 m	24.58	kg/m ²
CARGA TOTAL (C.M.+C.V.) =	1074.95	kg/m²

La casa construida con estos materiales es resistida por los envases de agua mineral de 1.75 litros utilizando ambos factores de reducción y por los envases de agua mineral tipo 1 utilizando el factor de 0.85.

Opción No.4

Esta opción utiliza la misma losa de planta que la opción anterior (no. 2), mismas trabes y columnas. Se utilizaron como material para los muros y losa de azotea multypaneles. Los multypaneles son paneles prefabricados compuestos por una cara exterior de lámina de acero galvanizado y una cara interior de papel con diversos acabados, unidas por un núcleo de poliuretano, formando un elemento tipo sándwich. El diseño de junta que posee este tipo de paneles es machihembrada.

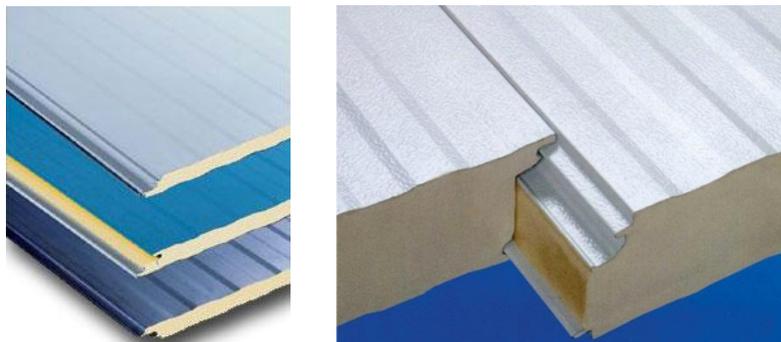


Figura 4.12. Distintos acabados del multypanel y detalle de junta machihembrada

Tabla de Peso Propio de los Paneles				
Econotecho Kg/M ²			Economuro Kg/M ²	
Espesor	Cal.26	Cal.28	Espesor	Cal.26
1"	6.82	5.50	1 1/2"	6.68
1 1/2"	7.37	6.05	2"	7.38
2"	7.91	6.60	2 1/2"	7.92
<p style="text-align: center;">JUNTA TIPICA ECONOMURO</p>			3"	8.16
			4"	9.55
			5"	10.69
			6"	11.83

MURO

MURO HECHO CON LÁMINA MULTIPANEL ECONOMURO

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Economuro calibre 26	1 1/2 "		6.68
CARGA MUERTA TOTAL =			6.68

Metros lineales de muro :	40	ml
Altura:	2.3	m
Muro por altura:	92	m ²
Wtot =	614.56	kg
Área de la casa:	66.22	m ²

CARGA TOTAL POR MURO =	9.28	kg/m²
-------------------------------	-------------	-------------------------

AZOTEA

MULTYPANEL

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Econotecho calibre 26	1 1/2 "		7.37
Mortero (Cal-arena)	0.010	1500	15.0
Falso plafón			20.0
Instalaciones			15.0
Impermeabilizante	0.004	1250	5.0
C.M. adicional RCDF	por mortero		20.0
CARGA MUERTA TOTAL =			82.4
CARGA VIVA AZOTEA =			100

CARGA TOTAL POR AZOTEA =	182.4	Kg/m²
---------------------------------	--------------	-------------------------

CARGA TOTAL DE LA ESTRUCTURA

Losa de azotea	182.4	kg/m ²
Losa de planta	460.1	kg/m ²
Muro	9.27	kg/m ²
Castillos 0.14x0.14 m	52.28	kg/m ²
Trabes 0.14x0.14 m	24.58	kg/m ²
CARGA TOTAL (C.M.+C.V.) =	728.60	kg/m²

Esta opción puede ser utilizada para los cuatro tipos de envases estudiados utilizando ambos factores de reducción. Se podría utilizar hasta un factor de reducción de 0.65 con el cual el envase de menor resistencia presentaría un valor de 745.45 kg/m².

Se puede observar que la carga disminuye de manera notable. En la actualidad este tipo de materiales sumamente ligeros y con capacidad de carga es cada día más común.

Opción No.5

Otro material ligero utilizado actualmente es el panel W. El panel W es un panel formado por una estructura tridimensional de alambre de acero pulido o galvanizado de alta resistencia con límite de fluencia fy de 5000 kg/cm² y un núcleo de barras poligonales de poliuretano o poliestireno, recubriéndose la estructura con concreto. Los paneles utilizados para losas tienen además dos nervaduras para alojar en ellas las varillas de refuerzo necesarias. Los paneles W que se utilizan para muros estructurales y losas de azotea tienen un espesor de 2", 3" y 4 ½".

Para esta opción se utilizan paneles W para muro de carga y losa de azotea. Los demás elemento de cálculo son iguales a los de la opción No.4 (losa de planta, castillos y traveses).



Figura 4.13. Panel W y construcción de una vivienda utilizándolo

Se va a utilizar el panel con espesor de 2" para muro y de 3" para losa. Las características del muro se muestran a continuación:

PANEL	CARACTERÍSTICAS DEL PANEL -Alambres diagonales de armadura @10.2 cm -Medidas estándar 1.22 x 2.44 m				CARACTERÍSTICAS MURO TERMINADO				
	ESPESOR ESTRUCTURA (cm)	ESPESOR NÚCLEO (cm)	RETÍCULA (cm)	PESO (kg/m ²)	ESPESOR (cm)	PESO (kg/m ²)	VOLUMEN RECUBRIMIENTO POR CARA (m ³ /m ²)	AISLAMIENTO TÉRMICO	
								VALOR R INTERNACIONAL (m ² ·K/W)	VALOR R INGLÉS (ft ² ·h ² ·F/BTU)
Muro 2" #5x5	5.1	3.92	5.1 x 5.1	2.6	8.1	90	0.0208	1.00	5.70
					9.1	111	0.0258	1.02	5.81
Muro 2" #5x10	5.1	3.92	5.1 x 10.2	2.2	8.1	90	0.0208	1.00	5.70
					9.1	111	0.0258	1.02	5.81

Las especificaciones del panel W para muro dicen lo siguiente: "Panel W muro son paneles diseñados para construir muros de carga. Resisten empujes de vientos moderados (#5x5) o leves (#5x10) y cortantes de sismo intensos (#5x5) o moderados (#5x10)." Debido a lo anterior se eligió el muro de 2" #5x5 para la casa habitación propuesta.

Se muestra a continuación las características para el panel W losa:

PANEL	CARACTERÍSTICAS DEL PANEL							CARACTERÍSTICAS DE LOSA TERMINADA					
	ESPESOR ESTRUCTURA (cm)	ESPESOR NÚCLEO (cm)	RETÍCULA (cm)	ANCHO TOTAL (m)	ANCHO ÚTIL por traslape (m)	LARGO (m)	PESO (kg/m ²)	ESPESOR (cm)	PESO (kg/m ²)	VOLUMEN RECUBRIMIENTO		AISLAMIENTO TÉRMICO	
										SUPERIOR (m ³ /m ²)	INFERIOR (m ³ /m ²)	VALOR R INTERNACIONAL (m ² ·°K/W)	VALOR R INGLÉS (R ² ·h·°F/BTU)
Losa 3"	7.6	5.55	5.1 x 5.1	1.22	1.02	2.44	5.3	13.1	173	0.0551	0.0206	1.13	6.44

AZOTEA

PANEL W

Material	Espesor	Peso volumétrico	Peso
	m	Kg/m ³	Kg/m ²
Panel W	3"		173.00
Instalaciones			12.0
Impermeabilizante	0.004	1250	5.0
CARGA MUERTA TOTAL =			190.0
CARGA VIVA AZOTEA =			100

CARGA TOTAL POR AZOTEA =	290.0	Kg/m²
---------------------------------	--------------	-------------------------

CARGA TOTAL DE LA ESTRUCTURA

Panel W losa	290.0	kg/m ²
Losa de planta	460.1	kg/m ²
Panel W muro	90.00	kg/m ²
Castillos 0.14x0.14 m	52.28	kg/m ²
Trabes 0.14x0.14 m	24.58	kg/m ²
CARGA TOTAL (C.M.+C.V.) =	916.96	kg/m²

Al igual que la opción anterior, esta combinación de materiales es resistida por los cuatro envases seleccionados en la investigación.

Deformación Teórica

Utilizando las ecuaciones obtenidas en la tendencia de comportamiento para los envases se calculó la deformación teórica que presentaría bajo la carga establecida por cada opción de materiales para la casa habitación del caso práctico. Para el envase de agua mineral de 1.75 litros no se calculó la deformación teórica debido a que no se cuenta con una ecuación de tendencia. Los resultados se muestran a continuación:

MATERIALES	ENVASES QUE RESISTEN	DEFORMACIÓN TEÓRICA
		[mm]
Opción 1	Agua mineral 1.75 L	
Opción 2	Agua mineral 1.75 L	
Opción 3	Agua mineral 1.75 L	
	Agua mineral tipo 1	2.97
Opción 4	Agua mineral 1.75 L	
	Agua mineral 2 L tipo 1	1.61
	Agua mineral 2 L tipo 2	2.37
	Refresco 2.5 L	1.50
Opción 5	Agua mineral 1.75 L	
	Agua mineral 2 L tipo 1	2.26
	Agua mineral 2 L tipo 2	3.60
	Refresco 2.5 L	3.12

 No se tiene ecuación de tendencia

COLOCACIÓN DE LOS ENVASES EN EL SUBSUELO

Con este trabajo de investigación se demostró que la capacidad de carga que poseen los envases de PET los hace una opción para ser utilizados en distintas áreas de la ingeniería civil. Al utilizarlos en el mejoramiento de suelos, el confinamiento que los envases necesitan debe ser estudiado y diseñado para cumplir con los requerimientos de una cimentación común.

Como se había mencionado anteriormente, queda fuera del alcance de este trabajo el diseño de la cimentación y por lo tanto de la colocación de los envases en el subsuelo, pero a manera de ejemplo se muestra la siguiente fotografía ya que se podría proponer una configuración similar.



Figura 4.14. Confinamiento posible

Sería necesario calcular a que distancia colocar las separaciones de madera, además de proponer otros materiales para este fin como podrían ser cimbras de desecho u otro material considerado desperdicio.

5 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

5.1 Conclusiones

Este trabajo de investigación tuvo como finalidad conocer el comportamiento estático de los envases de PET mediante pruebas de laboratorio. Los estudios realizados permitieron clasificar diversos envases según su resistencia, deformación, peso y accesibilidad. La clasificación muestra que los envases para bebidas carbonatadas y agua mineral poseen una mayor resistencia que aquellos utilizados para el envasado de agua.

También se estudió el comportamiento de los envases rellenos de residuos inorgánicos, tendencia que se ha presentado en diversos países en los últimos años. Se demostró que los envases incrementan su resistencia de manera importante (hasta 140%), aunque su peso aumenta de manera drástica (hasta 570%). En aplicaciones donde el peso de la estructura no sea una limitante, la utilización de envases rellenos puede resultar interesante ya que, además de tener una mayor resistencia, se asigna un sitio de disposición final a una mayor cantidad de residuos sin afectar el ambiente.

El estudio permitió determinar que la velocidad de desplazamiento es un factor que influye en la relación carga-desplazamiento del material. El confinamiento y la simetría que se le brinde al conjunto de envases también mostraron ser de suma importancia para tener un comportamiento deseable al igual que la verticalidad de cada botella. Se demostró que la densidad es importante en el valor de resistencia máxima de cada botella. Se observó que para botellas del mismo tipo, aquellas que poseían un mayor gramaje (y por lo tanto una mayor densidad) presentaron una mayor resistencia.

Otro factor que mostró tener influencia en el comportamiento de los envases es la temperatura aunque la deformación máxima que se tuvo por este concepto apenas alcanzó un valor de 0.25 milímetros, por lo que se podría desprestigiar en el Valle de México. Sería interesante estudiar el comportamiento en lugares con cambios de temperatura más intensos.

Hace falta estudiar con más detenimiento la fluencia lenta o creep del material bajo condiciones estáticas. Con el ensaye realizado se manifestó después de un tiempo un periodo en el que la deformación se mantuvo dentro de un rango de ± 0.2 milímetros.

Las botellas tienen que estar en buenas condiciones, sin ninguna fisura ya que la mayor parte de la resistencia es proporcionada por el aire confinado en su interior. Por la misma razón es necesario que la tapa de la botella esté también en buenas condiciones ya que las botellas deben de estar perfectamente cerradas. Se debe tener mucho cuidado al manipularlas para no maltratarlas y provocarles grietas porque dejarían de servir para este fin.

Las botellas mostraron tener un buen comportamiento en grupo, siempre y cuando la carga sea uniformemente repartida y se cuide mantener la verticalidad de los envases. Con la finalidad de ampliar el conocimiento del comportamiento de los envases en conjunto se podrían realizar ensayes con distintas configuraciones a las propuestas en esta investigación y de distintos tipos de botellas formando un mismo conjunto. También podrían estudiarse conjuntos formados por más elementos.

5.2 Comentarios

El PET se ha convertido en una de las grandes problemáticas de residuos en el mundo. Representa uno de los plásticos con los más altos niveles de consumo en el país. Su principal aplicación es en la producción de envases para bebidas. En el 2010 México se convirtió en el mayor consumidor de agua embotellada a nivel mundial y en el segundo en bebidas carbonatadas. Ante esta situación es imperante buscar soluciones en materia de reciclaje y reutilización de los residuos sólidos urbanos.

La investigación realizada pretende ser una opción viable en el reúso de los envases de PET en la ingeniería civil, reemplazando las materias primas utilizadas en la construcción por otras más abundantes y que no tienen un destino final adecuado.

Las propiedades físicas del PET permiten utilizarlo como alternativa para la solución de diferentes problemas presentes dentro del campo de la Ingeniería Civil. Los resultados obtenidos mostraron que es factible el empleo de envases de PET para el mejoramiento de los suelos como relleno ligero, pero también podrían utilizarse para otras aplicaciones como pueden ser mampostería, rellenos de gaviones, como reemplazo parcial o total de taludes y como material de respaldo en estructuras de retención entre otros.

Los modelos de comportamiento a compresión estática obtenidos en esta investigación son una aproximación al comportamiento real de los envases en conjunto, sin embargo estos modelos presentan ciertas limitantes al ser propuestos con base a pruebas de laboratorio con cierto rango de manipulación. Para superar dichas limitantes hace falta continuar con el estudio del polietileno tereftalato realizando más pruebas, ensayando una mayor población de envases y proponiendo otros métodos de ensaye entre otros. También resulta importante estudiar su comportamiento dinámico.

En la actualidad la tendencia que deben seguir las investigaciones es a buscar nuevos materiales para reemplazar las materias primas no renovables utilizadas en la ingeniería civil. El reúso de los materiales que se consideran desecho es interesante. Las ecuaciones de comportamiento propuestas en este trabajo son un marco de referencia para el desarrollo de futuros modelos.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EUROPEAN TYRE RECYCLING ASSOCIATION (ETRA). "Tyre Recycling after 2000: Status and Options". Paris, March, 2000.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). "Appropriate Use of Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry – An information Database", National Cooperative Highway Research Program, Project 4 – 21. Washington, D.C., 2001.
- REYES C., J.R. 2009. Estudio de factibilidad para la instalación de una planta recicladora de envases de PET. Tesis Ing. Industrial México, Instituto Politécnico Nacional.
- EPPS, J.A. "Use of recycled rubber tires in highways", NCHRP Synthesis of Highway Practice 198, Transportation Research Board. Washington, D.C., 1994.
- Código de cimentaciones de Costa Rica. Asociación Costarricense de Geotecnia. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Segunda edición. Cartago, Costa Rica, 2009.
- OSSA L., A. 2009. Comportamiento Mecánico del Poliestireno Expandido (EPS) bajo carga de compresión. Tesis Dr. Geotecnia México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- ROMO P., M. y MÉNDEZ C., B. Tubloplenas: una nueva opción de terraplenes sintéticos. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- RICO, DEL CASTILLO. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Volumen 1. Editorial Limusa, 2005. México, D.F.
- CAMBEFORT, H. Geotecnia del Ingeniero. Primera edición española, Editores Técnicos Asociados, Barcelona 1975.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias.
- TORRES, N. ROBIN, J.J., BOUTEVIN, B. Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection molding. European Polymer Journal, El Sevier. Volume 36, Issue 10, 2000.
- RODRÍGUEZ, E.R.; RONDÓN, H.A.; VÉLEZ, D.M. Y AGUIRRE, L.C. Influencia de la inclusión de desecho de PVC sobre el CBR de un material granular tipo subbase. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Volumen 5, No. 9 Jul-Dic. Medellín, 2006.
- El Medio Ambiente en México en resumen. Gobierno Federal, SEMARNAT 2009. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales.

- GUTIÉRREZ AVEDOY, V. (COORDINADOR). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de. Secretaria de Medio Ambiente e Instituto Nacional de Ecología. Primera edición, México 2006.
- Gaceta Ecológica INE - SEMARNAT México. Número 69, México 2003.
- SILICEO BERNARDI, L. Propuesta de empresa de reciclaje de plástico en el sector de envase y embalaje en Puebla. Tesis Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Universidad de las Américas Puebla. Cholula, Puebla, México 2004.
- GARCÍA OLIVARES, A.A. Recomendaciones táctico-operativas para implementar un programa de logística inversa. Estudio de caso en la industria del reciclaje de plásticos. Edición electrónica gratuita.
- CORTINA RAMÍREZ, J.M. Guía para el manejo de residuos sólidos generados en la industria de la construcción. Universidad de las Américas Puebla. Tesis Maestría en Gerencia de Proyectos de Construcción. Cholula, Puebla, México 2007.
- Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería. Volumen 17, No.1 Enero-Abril 2009. Editorial Signal Integrity Challenges. Universidad de Tarapacá, Arica, Chile.
- BAEZA PINAL, M.A. Diseño de un plano inclinado para el estudio de las interfaces geosintéticas”. Tesis Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de las Américas Puebla. Cholula, Puebla, México 2007.
- DR. ALVA HURTADO, J.E. Y MSc. ESCALAYA ADVÍNCULA, M. Muros y taludes reforzados con geosintéticos. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú.
- MIRAVETE, A. Los nuevos materiales en la construcción. Editorial Reverté, S.A., segunda edición, España, 2002
- MAXIL COYOPOTL, R. Y SALINAS HERNPANDEZ, M.A. Ventajas y desventajas del uso de polímeros en el asfalto. Tesis Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de las Américas Puebla. Cholula, Puebla, México 2006.
- ALESMAR, L.; RENDÓN, N. Y KODORY, M.E. Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) – cemento. Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, 2008. Rev. Fac. Ing. UCV v.23 n.1 Caracas mar. 2008

PÁGINAS DE CONSULTA

- Revista digital APP <http://www.agenciaapp.com/home/lea-lo-relevante-en>

- “Los Geosintéticos” Diario Río Negro Online, Argentina 2007.
<http://www1.rionegro.com.ar/diario/eh/2007/02/18/5412.php>
- “Geotextiles” Ing. Silvio Rojas. Universidad de los Andes, Departamento de Vías, 2009.
http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/silviorojas/Geotextiles/Geotextiles_1.pdf
- Empleo de Geosintéticos en la estabilidad de taludes. Revista Construir Online., 2004.
<http://www.revistaconstruir.com/obra-gris/geosinteticos/109-empleo-de-geosinteticos-en-la-estabilidad-de-taludes>
- Concreto Polimérico a partir de Botellas Descartables. Jorge Chávez, Roberto Laos, Carla Rospigliosi, Javier Nakamatsu, 2007. Ebook.
<http://ebookbrowse.com/concreto-polimerico-a-partir-de-botellas-descartables-doc-d56976009>
- Curso básico de pavimentos. “Visión general de los geosintéticos” Ing. Germán Vivar Romero. Instituto para el desarrollo de los pavimentos en el Perú, 2006.
http://www.idpp-peru.org/Vision_General_de_los_Geosinteticos.pdf
- <http://www.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mamb00&s=est&c=3670>
- http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_civil/plastico/default2.asp
- <http://www.ecoce.org.mx/Ecoce.Presentacion.Operacion/Pet/index.html>
- <http://www.petreciclados.com.ar/plasticos.php>
- http://www.ecolamancha.org/index.php?option=com_content&view=article&id=146:-el-reciclado-de-plasticos&catid=30:reciclado&Itemid=59
- <http://www.igsperu.org/articulos.htm>
- <http://www.slideshare.net/jhonatan207/geosinteticos-1>
- http://www.citop.es/PubPDF/Cimbra370_11.pdf
- <http://www.conocimientotextil.com/2011/06/geotextiles-la-alternativa-al-concreto.html>
- <http://www.scribd.com/doc/7293358/GENERALIDADESGVR>
- http://www.durman.com/downloads/BR_Geosinteticos.pdf
- http://www.arc.cat/ca/publicacions/pdf/agencia/xcr_281010/pon_a.pdf
- <http://www.weber.es/soluciones-ligeras-con-arlitareg-lecareg/como-realizar-mi-proyecto/soluciones-constructivas/aplicaciones-geotecnicas/terraplenes-en-zonas-de-baja-capacidad.html>

- <http://www.geofoam.org/>
- <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Creep.pdf>
- http://www.weber.es/fileadmin/user_upload/pdf_files/2009/Manual_Geotecnia.pdf