



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERIA**

**ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.**

Evaluación mecánica de un prototipo de bovedilla elaborada con  
PET

Tesis que para obtener el Título de:

LICENCIADO EN INGENIERIA CIVIL.

Presenta:

ALUMNO: MARIA MONSERRAT ORTEGA ORTIZ

Bajo la dirección de:

Dr. EBER PÉREZ ISIDRO

## Índice

Resumen 13

Planteamiento del problema 15

1.- Introducción. 15

2.- Antecedentes. 18

2.1 Polímeros y bovedilla como elementos en la construcción civil. 19

2.1.1 Aportaciones de los polímeros en la construcción 19

2.1.2 Mezclas con polímeros 24

2.1.3 Otras aportaciones 25

2.1.4 La tecnología de la vigueta y bovedilla 26

2.2 Problemática 28

2.2.1 Preguntas de investigación 30

2.3 Justificación 31

2.4 Hipótesis 33

2.4.1 Hipótesis verdadera 33

2.4.2 Hipótesis nula 34

2.5 Objetivo general 34

2.5.1 Objetivos específicos 35

2.5.2 Metas	35
2.6 Alcances y limitaciones	36
2.7 Recursos necesarios y disponibles	37
2.8 Descripción del elemento de estudio	37
3. Marco teórico	40
3.1 Introducción	40
3.2 Termoplásticos	41
3.2.1 Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos	42
Bases teóricas	43
3.2.2 Tereftalato de polietileno (PET)	43
3.2.2.1 Cristalización molecular.	44
3.2.2.2 Propiedades generales del PET.	44
3.2.3 Degradación de PET por temperatura	46
3.2.4 Densidad del PET.	47
3.3 De acuerdo con la norma NMX-C-406-ONNCCE-2014.	48
3.4 Modulo de elasticidad	49
3.5 Flexión en elementos rectos	52
3.6 Tensión aplicada a recipientes de PET.	54

3.7 Colado de polímeros	55
4. Metodología	55
4.1 Recolección de materiales	55
4.2 Lavado y retiro de etiquetas de las botellas PET	56
4.3 Secado del PET	57
4.5 Determinación de la temperatura de fusión y preparación de los moldes	58
4.6 Elaboración de probetas.	63
4.7 Determinación del esfuerzo de tensión del polímero	67
4.8 Determinación del esfuerzo de compresión del polímero	68
4.9 Determinación del módulo elástico	69
4.10 Modelación de la bovedilla y determinación de deformaciones por medio de un software con dimensiones establecidas.	70
4.11 Método SIMP para optimización de topología	72
4.12 Función objetivo: maximizar rigidez.	76
4.13 Análisis de sensibilidad.	78
5. Resultados	80
5.1 Punto de fundición de materiales.	81
5.2 Peso específico del PET	82

5.3 Pigmentación	83
5.4 Resistencia a la compresión.	84
5.5 Resistencia a la tracción	85
5.6 Modulo Esfuerzo – Deformación	88
6. Discusión	89
6.1 Pigmentación.	89
6.2 Resistencia y Modulo de elasticidad	89
7. Conclusión	90
8.- Recomendaciones	92
8.1 Pruebas mecánicas	92
8.2 Pruebas por temperatura.	93
8.3 Rugosidad.	93
Referencias	94

## **Glosario de términos**

**Prototipo:** Sirve como representación tangible de un concepto de diseño, para dar vida a las ideas.

**Polímero:** son macromoléculas constituida por cadenas de unidades más simples, llamadas monómeros.

**Reciclaje:** Proceso de reincorporación de materiales usados a la cadena productiva.

**Resistencia de materiales:** Estudio de como diversos materiales responden a diferentes fuerzas y cargas

**Fundición:** Proceso industrial en donde se derrite el material.

**Losa:** Son elementos estructurales horizontales cuyas dimensiones en planta son relativamente grandes.

**Nervaduras:** Elemento estructural que ayuda a aumentar la capacidad de carga y reducir el peso total de la estructura.

**f<sub>c</sub>:** Resistencia característica a la compresión del concreto, expresada en kilogramo por centímetro cuadrado ( $kg/cm^2$ ), que debe alcanzarse a los 28 días.

**NMX:** Norma Mexicana, establecida por la secretaria de Economía a través del ONNCCE, donde se regula especificaciones y métodos de prueba de materiales de construcción.

**ONNCCE:** (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación): Organismo mexicano que emite normas y certificaciones en el sector construcción

**PET:** Polietileno tereftalato, es un tipo de plástico utilizado en la industria.

**Vigueta y bovedilla:** Sistema constructivo prefabricado para elaboración de losas.

## **Relaciones de Figuras, Tablas, Graficas y Ecuaciones**

### **Índice de figuras**

Figura 1. Geo- malla mono- orientada, elaborada con polímeros para estabilizar suelos (Soto, 2009) 19

Figura 2. Unión de tubo PEAD por temperatura con electrofusión, (TIGRE S.A., 2016) 23

Figura 3. Instalación de tubería de PVC para drenaje (AAPVC, 2002) 23

Figura 4. Ladrillo con porciones de material de plástico reciclado (Rosana, 2008) 24

Figura 5. Mampostería del sistema BRICKARP. 25

Figura 6. Perspectiva de losa reticular (Minor, 2014) 27

Figura 7. Perspectiva de un sistema de vigueta y bovedilla (Novas, 2010) 37

Figura 8. Sección transversal de bovedilla de poliestireno expandido (EPS) (PROY – NMX – C – 463- ONNCCE, 2009) 38

Figura 9 Dimensiones de la bovedilla antes del diseño 40

Figura 10. Esquema de la estructura de un termoplástico (Biron, 2018) 41

Figura 11. Efecto de la temperatura en la estructura y en el comportamiento de los materiales termoplásticos. (Días F, 2012) 42

Figura 12. Grafica representativa de la variación del peso en porcentaje (weight) y la temperatura aplicada a diferentes velocidades de 5, 10, 20°C cada minuto, y la proporción de PET VIRGEN (50%), Y PET reciclado (50%). (Arrazola, 2014) 47

Figura 13. Diagrama de esfuerzo deformación de materiales elásticos. (Blanco, 2015). 50

Figura 14. Curvas típicas de esfuerzo deformación y comportamiento de la probeta durante un ensayo de tracción. (Cornement, 2006) 51

Figura 15. Elemento recto, antes y después de ser deformado por un momento flexionante. (Hibbeler, 2011) 52

Figura 16. Aplicación de momento flexionante sobre la sección transversal de un elemento y su variación de esfuerzos. (Hibbeler, 2011) 53

Figura 17. Muestras representativas para pruebas a tracción extraídas de la botella de PET, están extraídas en diferentes direcciones respecto al eje principal de la botella (Horizontal, 45<sup>a</sup>, vertical) (Vázquez, 2018) 54

Figura 18. Relación carga (Newtons) deformación (mm) de probetas extraídas en diferentes direcciones de una botella PET. (Vázquez, 2018) 55

Figura 19. Recolección de botellas PET. 56

Figura 20. Botella con materia prima de PET reciclado sin contaminantes. 56

## Índice de tablas

Tabla 1. Composición de los RSU por tipo de residuo, 2012 (SEDESOL, 2013)	21
Tabla 2 Consumo aparente de plástico en México (Sánchez, V, 2014)	22
Tabla 3. Clasificación de plásticos por número de identificación	29
Tabla 4. Propiedades PET, (C, Ibeh, 2011)	45
Tabla 5. Propiedades del PET. (Hong, 2016)	46
Tabla 6. Probetas de tracción de PET reciclado	66
Tabla 7. Propiedades de las secciones de probetas de tracción.	67
Tabla 8. Resultados obtenidos después de la optimización	81
Tabla 9. Tabla de fundición de PET reciclado y Naylacero	81
Tabla 10. Determinación del peso específico de cada muestra y su promedio	83
Tabla 11. Resultados de pruebas a compresión de muestras de PET reciclado colado.	84
Tabla 12. Resumen de resultados de las pruebas de tracción de PET reciclado colado.	86
Tabla 13. Promedio de los puntos de diseño mas importantes de las gráficas esfuerzo deformación	88

Tabla 14. Modulo promedio de las gráficas esfuerzo deformación para los puntos de diseño 1 y 2 89

### **Índice de ecuaciones**

Ecuación 1. Comportamiento elástico	50
Ecuación 2. Esfuerzo máximo	53
Ecuación 3. Ecuación modulo elástico	69
Ecuación 4. Ley de potencia	74
Ecuación 5. Ecuación de rigidez global	75
Ecuación 6. Algoritmo de optimización, para maximizar el cumplimiento global	76
Ecuación 7. Restricción de masa objetivo	77
Ecuación 8. Equivalencia de vector de fuerza externa	77
Ecuación 9. Restricciones de diseño	77
Ecuación 10. Análisis de sensibilidad	78

## **Índice de graficas**

- Grafica 1. Modulo de elasticidad variable 75
- Grafica 2. Representación grafica de la relación esfuerzo tiempo de las muestras a compresión de PET reciclado colado 85
- Grafica 3. Grafica esfuerzo deformación de probeta T1 elaborada de PET reciclado colado, con puntos clave de diseño 86
- Grafica 4. Grafica esfuerzo deformación de la probeta T2 elaborada con PET reciclado colado, con puntos clave de diseño. 87
- Grafica 5. Grafica esfuerzo deformación de probeta T3 elaborada con PET reciclado colado, con puntos clave de diseño 87

## Resumen

Este estudio se realiza una evaluación mecánica para implementar un prototipo de bovedilla elaborada con PET reciclado evaluando la resistencia del prototipo, así como de los materiales. Se analizó por método de elemento finito en un modelo de bovedilla de PET, con la intención de verificar si es ligera y resistente en comparación con una bovedilla de cemento-arena cuando esta se implementa en un sistema de losas. El material estudiado fue el PET reciclado en un proceso denominado por “Fundición de PET y colado”. Los resultados de las pruebas mecánicas afirman que dicho material es más ligero y resistente a esfuerzos de compresión y tracción que un concreto ordinario, por lo tanto, es factible considerar el hacer una bovedilla con PET reciclado. Debemos tener en cuenta que la losa aligerada se realiza colocando en los intermedios de los nervios estructurales, bloques, ladrillos con la finalidad de disminuir el peso de la estructura.

### **Palabras clave.**

Polímeros, Reciclaje, Resistencia de Materiales, Fundición, Losa ligera.

## **Abstract.**

This study makes a feasibility analysis to implement a vault prototype made with recycled PET evaluating the resistance of the prototype as well as the materials. A PET vault model was analyzed by finite element method, with the intention of verifying if it is light and resistant compared to a cement-sand vault when it is implemented in a slab system. The material studied was recycled PET in a process called "PET Foundry and Casting". The results of the mechanical tests state that the material is lighter and resistant to compressive and tensile stresses than ordinary concrete; therefore, it is feasible to consider making a vault with recycled PET. We must take into account that the lightweight slab is made by placing blocks or bricks in the spaces between the structural ribs, with the aim of reducing the weight of the structure.

## **Keywords.**

Polymers, Recycling, Strength of Materials, Casting, Light slab.

## **Planteamiento del problema**

### **1.- Introducción.**

La bovedilla es un componente del sistema de losa para entresijos y azoteas que sustituye a los sistemas de losa tradicional (maciza, aligerada, etc.). Este sistema cuenta con las ventajas de ser más rápido, sencillo, ecológico y económico.

La bovedilla de concreto es ampliamente usada en la industria de la construcción en losas estructurales para entresijos y azoteas para viviendas en serie, residenciales, locales comerciales, hoteles, etc.

La losa de entresijo aligerada es uno de los sistemas que más se utilizan en la construcción. Puesto que se usan con la finalidad de conseguir estructuras más ligeras y económicas. Las losas son de distintos tipos: losas macizas son las que llevan de acero y concreto, y losas aligeradas que tienen el beneficio de reducir los efectos de las fuerzas originadas por la acción de los sismos, en tanto sean más aligerados estos techos, pueden reducir las dimensiones de las cimentaciones y de otros sistemas de la estructura portante de las edificaciones (SENCICO, 2014).

Este elemento estructural es la superficie principal para recibir todas aquellas cargas que actúen verticalmente en cada nivel sin deformarse, por lo tanto, se debe garantizar la seguridad de los usuarios y la estabilidad de la estructura. La clasificación de las losas es en base a distintas variables y criterios como: su composición, distribución de refuerzo, apoyos, como se realiza su construcción, longitud del claro, etc. Se entiende por claro corto menor a 6m de longitud y un claro largo mayor a 6m. Las losas de concreto armado (losa maciza), es un elemento

estructural de sección transversal rectangular llena, de poco espesor y abarcan una superficie considerable del piso, Las losas macizas se construyen en los siguientes espesores: 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 25, 26, 28 y 30 cm. Tienen la desventaja de ser pesadas y transmiten fácilmente las vibraciones, el ruido, el calor y su costo es un poco más alto a comparación de otras losas, su ventaja soporta mayor peso que cualquiera de las otras losas, gracias el despiece de acero.

Según su composición existe la losa nervada, también conocida como sistema de losa con casetón o losas aligeradas, que se conforman por vigas longitudinales y transversales a modo de “nervios”. Es bastante rígida y se enlazan a las bases de los pilares.

La losa nervada se construye para estructuras con cargas desequilibradas y dependiendo del tipo de estructura existen varios modelos.

Para edificios que tengan claros bastante amplios se pueden emplear la losa reticulada (dos direcciones) ya que consta de pequeñas vigas en ambos sentidos que cuando se cruzan forman una retícula y para aligerarla se usan casetones que son bloques de espuma de poliestireno. También está constituida por una capa de compresión superior que tiene como función absorber y distribuir los esfuerzos sobre la losa, esta capa se refuerza con malla electro soldada para que la capa no se agriete por los cambios de temperatura.

La losa aligerada es la que se realiza colocando en los intermedios de los nervios estructurales, bloques, ladrillos, casetones de madera o metálicas (cajones)

con el fin de disminuir el peso de la estructura, y el acero en barras concentrado en puntos llamados nervios. (Ruiz y Vega 2014)

Es muy útil la losa aligerada a base de vigueta y bovedilla (una dirección), en esta se colocan las vigas a una dirección y la espuma de poliestireno (bovedillas) estos se apoyan directamente en la base o el patín de las viguetas. Las viguetas son prefabricadas que pueden venir o no coladas completamente de igual manera cuentan con una capa de compresión de concreto reforzado con malla electro soldada para prevenir grietas por cambios de temperatura. Estas son mucho más económicas en comparación a otras y se pueden construir muy rápido.

Este sistema llega a México en 1995, a través del tiempo se implementaron otros materiales para las bovedillas como el poliestireno, cerámica o fibra de vidrio dando ventajas más notables como la ligereza, facilidad en el proceso de construcción, disminución de desperdicios, aisladores térmicos y acústicos. Este tipo de losas permiten tener mayores espesores sin aumentar el volumen de concreto.

El casetón o bovedilla puede ser de dimensiones variables cortados en planta de acuerdo a las necesidades del proyecto son utilizados como aligerante capaz de soportar el concreto cuando este es vaciado en la losa a la hora del colado sin sufrir deformaciones, fisuras o fracturas. (NMX. 2014). Con esto es posible abarcar claros más amplios.

Los Termoplásticos como el Tereftalato de Polietileno (PETE o PET) se caracterizan por tener una buena resistencia a los impactos, además de que su

procesabilidad es fácil, adaptándose a moldes complejos. (Kolapo, 2016). El presente estudio se enfoca en elaborar un modelo de bovedilla con dimensiones dadas, haciendo una combinación entre un termoplástico denominado PET y una bovedilla, a lo largo del texto se le denominara como Bovedilla de PET reciclado, ya que se da un enfoque sustentable de reutilización de materiales para el cuidado del medio ambiente.

## **2.- Antecedentes.**

Es sabido que en nuestro país y en el mundo se tienen problemáticas de contaminación ambiental (en donde predomina el desecho de botellas plásticas en calles y avenidas principales de la ciudad, no solo este tipo de desechos se pueden encontrar), este es un problema global, cada vez que se hace un descubrimiento que genera confort para el hombre, todos tratan de beneficiarse con estas innovaciones sin ser conscientes de que esto pudiese generar daños a largo plazo para la sociedad o la naturaleza.

Por parte de la ingeniería civil y los constructores se han tenido avances en la utilización de plásticos, aunque es cierto que en la mayoría donde se implementan los materiales a base de polímeros, no se hace con un enfoque sustentable.

Se toma en cuenta que para dicho tipo de losas se toma en cuenta que sea más ligeras y al mismo tiempo que sean más económicas, se toma en cuenta que este sistema no requiere cimbra de contacto, puesto que al apoyar las bovedillas en las viguetas se cubre básicamente toda la superficie, eliminando la cimbra de contacto.

## 2.1 Polímeros y bovedilla como elementos en la construcción civil.

### 2.1.1 Aportaciones de los polímeros en la construcción

La ingeniería civil ha sabido utilizar la mayoría de plásticos, por ejemplo, el caso de los geo-sintéticos que se comenzaron a utilizar en el mundo a partir de los años 1960's, y hoy en día se siguen utilizando como refuerzo en terraplenes, estabilización de taludes, construcción de gaviones, cuencas. **Figura 1.** Los geo-sintéticos incluyen una variedad de materiales de polímeros sintéticos como el Polietileno Tereftalato (PET).

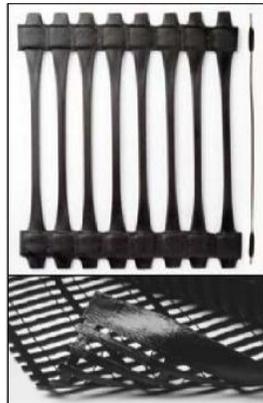


Figura 1. Geo- malla mono- orientada, elaborada con polímeros para estabilizar suelos (Soto, 2009)

Otro derivado de los plásticos que también se utiliza mucho en la ingeniería civil es el polietileno de alta densidad (PEAD). La historia del polietileno se remonta al año 1898 cuando Von Pechmann obtiene un polímero de estructura equivalente al polietileno llamada Polimetileno. Esta síntesis se produjo accidentalmente a partir de diazometano, obteniendo un polímero de bajo peso molecular.

En 1900, Bamberger y Tschirner analizaron un producto similar, encontrando que tenía la formula  $(CH_2)_n$ . El Polietileno de baja densidad fue obtenido

accidentalmente por los estudios de alta presión del etileno que Michaels realizó en Amsterdam.

En 1953, Ziegler y sus colaboradores en el Instituto Max Planck, basándose en los trabajos iniciados por el italiano Natta, estudiaron el proceso de polimerización a baja presión. La reacción con un complejo catalítico de alquil aluminio y tetracloruro de titanio daba lugar a la fabricación de un Polietileno de mayor densidad y temperatura de fusión, como consecuencia de su mayor regularidad. A este Polietileno se le denominó de alta densidad (PEAD o sus siglas en inglés HDPE), haciendo mención a sus propiedades, o de baja presión, debido a su método de obtención. (Calderón, J.).

El impacto de los polímeros representa un porcentaje significativo para el uso que le da la sociedad, no solo en la industria civil, por lo tanto, los residuos generados son bastantes como se muestra en la **Tabla 1**, aproximadamente el 11% de los residuos sólidos urbanos (RSU) son plásticos, (SEDESOL,2013).

Tabla 1. Composición de los RSU por tipo de residuo, 2012 (SEDESOL, 2013)

COMPOSICION DE LOS RSU POR TIPO DE RESIDUO, 2012 (miles de toneladas)		
Tipo de residuo	Generación	Porcentaje
Residuos de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	22 070.27	52.4
Papel, cartón, productos de papel	5822.82	13.8
Otro tipo de residuo (residuos finos, pañal desechable, etc.)	5098.7	12.1
Plásticos	4 584.99	10.9
vidrios	2 475.66	5.9
aluminio	728.38	1.7
Textiles	602.06	1.4
Metales ferrosos	456.36	1.1
Otros metales no ferrosos (incluye cobre, plomo, estaño y níquel).	263.51	0.6
Total	42102.75	100
Fuente: Dirección general de equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano - Marginadas. SEDESOL, México. 2013.		

Y en la **Tabla 2** podemos identificar el consumo de los diferentes tipos de plásticos en México para los años anteriores, (Sánchez, v, 2014).

Tabla 2 Consumo aparente de plástico en México (Sánchez, V, 2014)

Plástico	Acrónimo	Consumo aparente (Ton/año) (2011)	Consumo aparente (Ton/año) (2013)
Polipropileno	PP	1,102,000	1,270,000
Poliétileno de alta densidad	PEAD	836,000	805,000
Poliétileno de baja densidad	PEBD	545,000	548,000
Poliétileno lineal de baja densidad	PEBDL	455,000	-
Poliétileno tereftalato	PET	555,000	686,000
Policloruro de vinilo	PVC	442,200	474,000
Poliestireno	Ps	356,000	342,000
Copolímeros de estireno	Cop, PS	236,000	-
Polímero termofijo	Ts	118,000	-
Poliuretano reticulado	PUR	257,700	-
Poliámidá	PA	348,000	-
Total		5,300,000	4,125,000

Con el pasar de los años se han ido desarrollando nuevas tecnologías para mejorar las propiedades mecánicas de los polímeros, por ejemplo, el polietileno, en especial la Resistencia a la tracción. Es así que inicialmente por el año 1950 se obtiene el primer tipo de polietileno PE 32/40, que se utilizaba principalmente para transporte de aguas servidas y riego a baja presión. Posteriormente se desarrolló el PE 53/63 el cual ya se podía utilizar para transporte de agua potable a presión. En los últimos años ya se han desarrollado los polietilenos PE 80 y PE100, que son utilizados para sistemas de transporte de agua a presión e incluso transporte de gas por su altísima confiabilidad. Ésta mejora en las propiedades del Polietileno permite

obtener un tubo de menor espesor que resista mayor presión. Así, el PE100 es el último polietileno disponible en el mercado con la más alta resistencia. En la **Figura 2** se ilustra un tubo de PEAD utilizado en la construcción



Figura 2. Unión de tubo PEAD por temperatura con electrofusión, (TIGRE S.A., 2016)

El policloruro de vinilo (PVC) ha sido utilizado por más de medio siglo, y es el plástico más estudiado y testado mundialmente, participa de manera gravitante en la calidad, seguridad y rentabilidad de una construcción, garantizando una larga vida útil. Más del 50% de la producción anual del PVC se emplea en este sector, algunas de las aplicaciones más comunes son en las cañerías de drenaje y la implementación como tubos de transporte de agua potable. **Figura 3.** (AAPVC, 2002).



Figura 3. Instalación de tubería de PVC para drenaje (AAPVC, 2002)

Ya se citaron algunos materiales a base de polímeros que se han utilizado en la construcción, estos implementados desde el siglo pasado, pero es en el siglo XXI es donde se empieza a analizar y proponer soluciones a la problemática del exceso de basura plástica.

### **2.1.2 Mezclas con polímeros**

Ahora, hablando de construcciones sostenibles podemos citar a CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica), en la república de Argentina que desarrollo una tecnología de reciclaje de plásticos, elaborando ladrillos, bloques y placas, todos estos de características livianas por tener bajo peso específico de la materia prima, proveen una excelente aislación térmica, además de que su resistencia mecánica es suficiente para ser utilizados como cerramientos de viviendas con estructura independiente antisísmica. **Figura 4.** Los residuos plásticos son seleccionados, triturados con un molino especial, y así son incorporados a mezclas cementicias, sin necesidad de un lavado previo (salvo en el caso que se utilicen residuos muy contaminados tomados de la basura, sin un acopio separado) (Rosana, 2008).

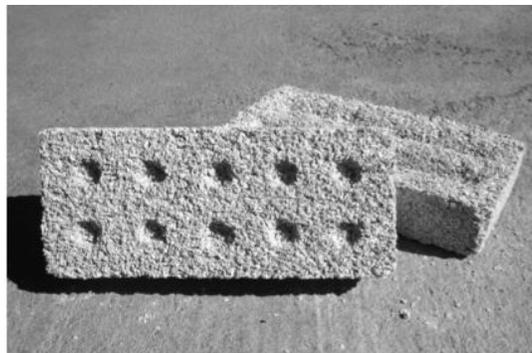


Figura 4. Ladrillo con porciones de material de plástico reciclado (Rosana, 2008)

### 2.1.3 Otras aportaciones

Una investigación importante que destaca el uso del plástico en las construcciones civiles es la citada con el título “Usos y aplicaciones del plástico PEAD reciclado en la fabricación de elementos estructurales para construcción de vivienda en Colombia”, precisamente como lo dice su título, tuvo como objeto estudiar y analizar la factibilidad del uso de plástico reciclado PEAD como materia prima en la fabricación de elementos estructurales para la construcción de viviendas en Colombia, en los estudios realizados en el 2006 se muestran resultados los cuales analizan la resistencia última de los elementos sujetos a pruebas mecánicas como es la compresión. Un caso muy importante que toma esta investigación es la elaboración de elementos estructurales de plástico reciclado de polietileno de alta densidad (prPEAD) para el sistema Brickarp® para la construcción de viviendas. Se describe el proceso general que es el lavado del material prPEAD, molienda del prPEAD, extrusión, llenado de moldes, enfriamiento de elementos, desmoldado y corte de elementos de prPEAD, al final se pueden elaborar mamposterías con bloques elaborados con estos procesos. **Figura 5.**



Figura 5. Mampostería del sistema BRICKARP.

#### **2.1.4 La tecnología de la vigueta y bovedilla**

Dentro de los avances tecnológicos que se han tenido en los elementos constructivos de las edificaciones, nos encontramos el caso más notable al abordar la problemática de alcanzar a cubrir claros más grandes con suficiente resistencia por parte de vigas o losas. Estas últimas se definen como elementos horizontales planos de soporte, capaces de soportar a las cargas vivas y muertas de la construcción. Se emplean para entrepiso y cubierta. Estas pueden ser coladas en sitio o prefabricadas. Su posición dentro de la estructura puede ser totalmente horizontal o inclinada, según las características del proyecto.

El origen de las losas aligeradas se dio por el hecho de que anteriormente a su existencia se pretendía construir losas que por un lado fueran resistentes y por otro lado fueran ligeras, esto generaba una contradicción para las losas convencionales denominadas “losas macizas” de concreto armado las cuales exigían mayor cantidad de material si se quería aumentar la resistencia, la solución práctica a esto fue implementar materiales más ligeros combinados con nuevos sistemas de losas de igual o mayor resistencia, esta innovación se llama “losas aligeradas”. En la **Figura 6**. Se puede observar un ejemplo de losas aligeradas, las cuales utilizan casetones que forman retículas en la losa, y precisamente por este hecho es que se les llaman “Losas Reticulares”.

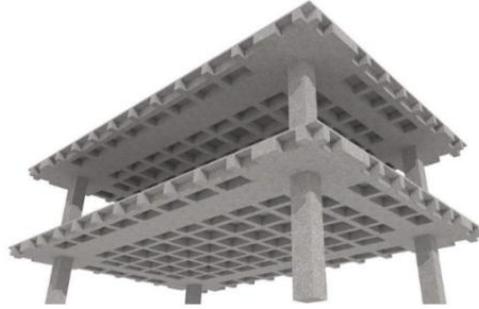


Figura 6. Perspectiva de losa reticular (Minor, 2014)

Un caso particular de este sistema de losas es el denominado sistema de vigueta prefabricada y bovedilla de cemento arena, este sistema llego a México en 1995, a través del tiempo se implementaron otros materiales para las bovedillas como es el poliestireno, cerámica o fibra de vidrio dando ventajas más notables como la ligereza, facilidad en el proceso de construcción, disminución de desperdicios, aisladores térmicos y acústicos.

En México se cuenta con dos normas que aplican para componente de losas de vigueta y bovedilla, estas son la “NMX-C-463-ONNCCE-2010 Industria de la Construcción – Bovedilla de poliestireno expandido para losas de entepiso y azoteas de concreto a base de viguetas prefabricadas – Especificaciones y métodos de ensayo”, y la “NMX-C-406-ONNCCE-2014 Componentes para sistemas de losas prefabricadas de concreto – especificaciones y métodos de ensayo”. En la presente investigación, no es posible tener normas especiales para elaboración de bovedillas con nuevos materiales, así que, para hacer el prototipo de la bovedilla, se tomará como referencia estas normas, pretendiendo alcanzar los requisitos de resistencia citados en las presentes, ya que se genera una limitación proporcional a esta

investigación al no existir normas que apliquen a este prototipo de manera más directa dentro de la construcción civil.

## **2.2 Problemática**

Tanto en México, como en el mundo moderno existe una problemática importante por la contaminación de la naturaleza, por el excesivo desecho de residuos sólidos a la naturaleza con la que convive el hombre como es el agua, aire y suelo, esto se ocasiona por los excesivos volúmenes de residuos que se generan diariamente por industrias, comercios, oficinas, escuelas, viviendas y en general todos los residuos que recibe escaso o nulo tratamiento adecuado. En el mundo podemos encontrar dos tipos de plásticos, los artificiales o sintéticos y los naturales, los primeros se elaboran a partir de compuestos derivados del petróleo, el gas natural o el carbón, la mayoría de los plásticos pertenecen a este grupo, los naturales se obtienen directamente de materias primas vegetales o animales. El plástico sintético por sus características químicas no representa un peligro para el ambiente, pero de manera indirecta si afectan a la naturaleza, ya que es el entorno el que no puede degradarlos de manera rápida, y surge el problema de verlo como un residuo inservible que nos está saturando, ya que se genera demasiado por las industrias, se utiliza poco tiempo por los humanos y se degrada en un periodo muy prolongado. 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 facilidad en el tiempo. La eliminación del plástico es, por lo tanto, un problema ambiental de dimensiones considerables.

Un método práctico para solucionar este problema es el reciclaje, que se utiliza, por ejemplo, con las botellas de bebidas gaseosas fabricadas con Tereftalato de polietileno (PET), lo que representa un proceso bastante sencillo (Cristán, Ize, Gavilán, 2003). Podemos reciclar materiales plásticos por grupos, ya que los plásticos sintéticos tienen diferentes propiedades químicas. Para poder utilizar un material plástico en este estudio, lo debemos de homogenizar, por eso es necesario la selección de plásticos según la **Tabla 3**, la mayoría de los plásticos contienen un número de identificación, este se encuentra gravado en el plástico por un pequeño número envuelto en un triángulo con flechas.

Tabla 3. Clasificación de plásticos por número de identificación

Nombre	Abreviatura	No. De identificación	Formula química
Tereftalato de Polietileno	PET o PETE	1	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>
Polietileno de alta densidad	PEAD o HDPE	2	CH <sub>2</sub>
Policloruro de vinilo o vinilo	PVC o V	3	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl
Polietileno de baja densidad	PEBD o LDPE	4	CH <sub>2</sub>
Polipropileno	PP	5	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Poliestireno	PS	6	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>

Por otro lado, en cuanto a ingeniería civil, nos enfrentamos a la problemática de ofrecer cada vez más innovaciones a la ingeniería de losas. El problema está en pie, ya que siempre se pretende buscar que las losas sean más resistentes y a la

vez más ligeras, es así como surge la necesidad de plantear nuevas ideas en cuanto a materiales y procesos constructivos.

Uno de los objetivos básicos del diseño sísmico es evitar daños en las estructuras ante temblores moderados, restringiendo los desplazamientos laterales en una edificación. La forma más usual de controlar dicho movimiento es limitando la deriva a cierto valor. Para lograr esto, se deben dimensionar los elementos estructurales de tal forma que sean capaces de soportar los desplazamientos de la estructura. (Arcila J, 2014).

Ya conocemos la problemática principal de las losas, ahora, al hablar de las losas convencionales de vigueta y bovedilla surgen dos problemáticas, la primera es que si las bovedillas utilizadas en una losa son de cemento – arena, la carga muerta de la losa aumenta casi  $110 \text{ kg/m}^2$  (para el caso general de las bovedillas de  $75 \times 15 \times 25 \text{ cm}$ ), (este valor depende de las dimensiones de la bovedilla), lo cual es desfavorable si se pretende aligerar la losa, por otra lado si se construye una losa utilizando bovedilla de poliestireno, la carga muerta disminuye en gran cantidad, pero la problemática aquí es que este tipo de material es más susceptible a romperse, y por otro lado no beneficia al medio ambiente, ya que se promueve el uso de este polímero que es de difícil degradación y difícil de reciclar.

### **2.2.1 Preguntas de investigación**

Se conoce que, en la actualidad, se han tenido mejoras en la elaboración de losas de entresijos y azoteas de edificaciones, un tipo convencional es la

construcción de losas de vigueta de concreto reforzado, y bovedillas de cemento arena o bovedillas de poliestireno, surgen las preguntas de:

¿Es posible crear una bovedilla con material a base de plástico reciclado (PET) que contribuya a la disminución de carga muerta en comparación con una bovedilla convencional dentro de una losa aligerada, y por otro lado ayude a consumir el plástico contaminante generado en los residuos sólidos municipales?

¿Es posible reducir espesores para optimizar la sección y cumpla con la resistencia mínima solicitada por el reglamento utilizando PET?

### **2.3 Justificación**

La presente investigación intenta crear un elemento constructivo que ayude de manera indirecta a disminuir el exceso de residuos plásticos y que también aporte mejoras ingenieriles en la construcción. Es indispensable que la ingeniería civil enfrentemos la problemática de ofrecer innovaciones a la ingeniería de losas, buscando que las losas sean más resistentes y a la vez más ligeras por ello surge la necesidad de plantear nuevas ideas referente a materiales y procesos constructivos. La ingeniería civil debe afrontar estos temas, ya que es responsabilidad de esta rama llevar a la sociedad a un mundo más sostenible, así mejorando la calidad de vida de la sociedad, de esta manera se verán beneficiados en cuestiones al diseño de losas ligeras en sus hogares. La contaminación es ya un hecho, pero las soluciones como las que presenta este trabajo aún esperan ser descubiertas e implementadas, esta es la razón de ser de la investigación hacia un prototipo innovador.

Así como cualquier investigación que apoya al desarrollo tecnológico, para este trabajo es necesario apoyar a la ingeniería sustentable, todos aquellos que se plantean realizar edificaciones hoy en día, tienen que llevar la idea de mejorar el bienestar social, económico y ambiental porque es la sociedad misma quien demanda así sea, basándose en la utilización de los recursos que pueda beneficiarse, buscando la optimización de sistemas de energía, transporte, la gestión de desechos y la remediación ambiental de cualquier recurso con el cual poder obtener un beneficio concreto.

Al desarrollar este prototipo de bovedilla con materiales a base de plástico reciclado (PET), se pretende obtener de resultado un elemento que a diferencia de las bovedillas convencionales de cemento arena, esta sea más ligera por el hecho de ocupar un material con un peso específico más bajo, y en comparación con las bovedillas de poliestireno, esta sea más resistente en cuanto a la parte mecánica y con un enfoque ambiental a la vez , no dejando de lado las especificaciones de resistencia adecuadas según las normas mexicanas de construcción.

Los termoplásticos como el Tereftalato de polietileno (PETE o PET) se caracterizan por tener una buena resistencia a los impactos, además de que su procesabilidad es fácil, adaptándose a moldes complejos (Kolapo, 2016). El PET se procesa generalmente por extrusión en estado fundido seguido por alguna forma de proceso de estiramiento (por ejemplo, moldeo por inyección soplado y estiramiento de película o lámina, estiramiento de fibras). Las dimensiones de la bovedilla que se plantean para un primer análisis por lo general no son adecuadas

y es necesario iniciar un proceso de ensayo y error con secciones hasta encontrar las que permitan cumplir con los requisitos de la normativa vigente.

Para lo anterior se obtienen secciones pensando sólo en la seguridad estructural, y poco en la economía, obteniéndose diseños que no son óptimos. Los programas de estructuras actuales, siendo de por sí bastante potentes, no tienen aún incorporadas rutinas para hallar la solución más óptima a un diseño, a pesar de existir técnicas para esto, sin embargo, es posible analizar cada pieza con diferentes softwares especializados.

## **2.4 Hipótesis**

Diseñar un prototipo de bovedilla a base de plástico reciclado PET que sea capaz de cumplir con los requisitos mínimos de servicio y resistencia a través de la optimización topológica mediante el método de elementos finitos para cumplir la relación de resistencia y peso con las mismas dimensiones de una bovedilla convencional, que puedan ser un producto de alta resistencia y que soporte variaciones de temperatura, al mismo tiempo que pueda aligerar las cargas de la losa, por ende el PET es una opción factible debido a que es un elemento práctico por ser reciclado pertenece a un mercado mucho más amigable con el entorno ecológico.

### **2.4.1 Hipótesis verdadera**

El desarrollo de un modelo de bovedilla elaborada con material a base de plástico reciclado (PET) por medio de un proceso de fundición, logra cumplir con los requerimientos mínimos de resistencia, siendo competitiva con la bovedilla

convencional de cemento arena o poliestireno, y al hacer una comparación, esta lograra tener una relación más elevada entre la resistencia del elemento y su peso propio aun con las mismas dimensiones.

#### **2.4.2 Hipótesis nula**

El desarrollo de un modelo de bovedilla elaborada con material a base de plástico reciclado (PET) por medio de un proceso de fundición, no logra cumplir con los requerimientos mínimos de resistencia, no siendo competitiva con la bovedilla convencional de cemento arena o poliestireno, y al hacer una comparación, esta no lograra tener una relación más elevada entre la resistencia del elemento y su peso propio aun teniendo las mismas dimensiones.

#### **2.5 Objetivo general**

El estudio se enfoca en simular un modelo de bovedilla con dimensiones y resistencias de manera que cumpla con la normativa vigente optimizando la cantidad de material necesaria para la elaboración de un modelo de bovedilla digital, haciendo una combinación entre un termoplástico denominado PET, que ayude a reducir cargas muertas en una losa de vigueta y bovedilla otorgando resistencia suficiente a las cargas solicitadas, ya que se da un enfoque sustentable de reutilización de materiales para el cuidado del medio ambiente. Como medio de análisis en ese trabajo utilizaremos el programa SolidWorks el cual emplea la optimización topológica la cual nos permite optimizar las dimensiones de nuestras piezas de forma automática mediante el método de elementos finitos.

### **2.5.1 Objetivos específicos**

Realizar un modelo de bovedilla para optimizar la sección utilizando como material el PET analizando las propiedades mecánicas del comportamiento del material y analizando si es posible reducir espesor, siendo así de menor masa y que cumpla con las condiciones de servicio y resistencia.

Descubrir si es posible crear una bovedilla a base de plástico reciclado que contribuya a la disminución de carga muerta en comparación con una bovedilla convencional dentro de una losa aligerada y al mismo tiempo consumir el plástico contaminante generado de residuos sólidos municipales.

Con base a dicha investigación determinaremos algunas propiedades como por ejemplo los puntos de fusión del material, su esfuerzo de compresión, su esfuerzo de tensión, el módulo de elasticidad así mismo las deformaciones y los esfuerzos que puede llegar a sufrir el material basados en el cálculo que se realizara mediante software, con la finalidad de saber si es factible o no dicho estudio

### **2.5.2 Metas**

a). Disminuir en el análisis de cargas de una losa, el valor de carga muerta que se genera en un sistema de “viguetas de concreto armado y bovedilla de cemento-arena”.

b). Lograr que este modelo de prototipo sea considerado competitivo entre las bovedillas por ser resistente y ligero.

## **2.6 Alcances y limitaciones**

El alcance de esta investigación contara con un diseño teórico de la bovedilla contando con las dimensiones y a través de estas obtener la resistencia necesaria de los materiales, especificando un análisis de esfuerzos sobre la bovedilla. Se obtendrá una tabla de comparativas, donde se identifique las mejoras que aporta este elemento a la ingeniería, así mismo quedaran resaltadas las principales diferencias.

Gracias a los ensayos realizados con los materiales, podremos obtener datos acerca de la Resistencia que ofrecen estos, estos datos son de gran importancia ya que pueden ayudar a próximas investigaciones donde se pretenda diseñar una bovedilla de diferentes dimensiones o algunos otros elementos enfocados a la ingeniería civil o industrial.

Los límites que se genera con esta investigación es que no se podrán realizar estudios del comportamiento mecánico cuando la bovedilla se expone al calor, esto es por no poseer instrumentos adecuados para experimentación. Por otro lado, si se obtendrán un registro de temperaturas a la que fue procesada la bovedilla.

Se analizará el costo de producción de una bovedilla de plástico reciclado y se comparará el precio de venta con bovedillas convencionales en Pachuca de Soto Hidalgo, limitándose a ser solo un estudio de mercado y sin implementación práctica real.

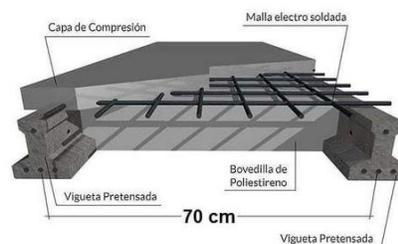
## 2.7 Recursos necesarios y disponibles

Es necesario obtener materia prima para realizar los experimentos, así que es necesario la recolección de plástico Tereftalato de polietileno (PET), ya sea desde centros de recolección o plantas de reciclaje. El enfoque que hace esta investigación permite la facilidad de la obtención de este recurso, ya que se trata en la vida cotidiana como un residuo (basura) de poco valor o nulo.

Se necesitará, además, un molde para la elaboración del prototipo, este molde será de madera o acero, ya que son resistentes a impactos y permiten alcanzar temperaturas considerablemente altas ante la presencia de líquidos, además es fácil elaborar los moldes con estos tipos de materiales.

## 2.8 Descripción del elemento de estudio

La bovedilla es un componente de un sistema de losa para los pisos y azoteas de una edificación. La utilidad de este elemento es que vuelve el proceso de elaboración más rápido, haciendo un sistema sencillo, económico, y algunas veces ecológico. La bovedilla se vuelve un elemento de relleno y de cimbra para el colado de concreto, este se coloca entre las viguetas, generando una especie de vigas T cuando el concreto alcanza su máxima resistencia. **Figura 7.**



*Figura 7. Perspectiva de un sistema de viga y bovedilla (Novas, 2010)*

Estas pueden ser de cemento arena, poliestireno, cerámica o Fibra de Vidrio. Lo más usual es de cemento arena, aunque el uso del poliestireno se va incrementando día a día porque tiene una serie de ventajas que pueden ser:

- A) Ligereza para el transporte (a largas distancias el costo del transporte es bajo)
- B) Facilidad para el izado en la obra y su colocación.
- C) Disminución del desperdicio al no tener roturas por no ser duro.
- D) Aislante térmico y acústico.

El prototipo que se diseñara tiene como propósito cambiar el material utilizado en bovedillas convencionales, de cemento arena o poliestireno a plástico reciclado (PET). Las características de forma del prototipo serán las comunes de una bovedilla convencional de cemento arena o poliestireno de 75x25x15cm. La sección de una bovedilla de poliestireno expandido (EPS) se distingue con lo mostrado en la **Figura 8**. Sin embargo, el prototipo a realizar, además del material, también diferencia por que contendrá 4 huecos de 12.4 cm x 12.4 cm en la sección de la bovedilla, esto con la intención de aligerar el elemento.

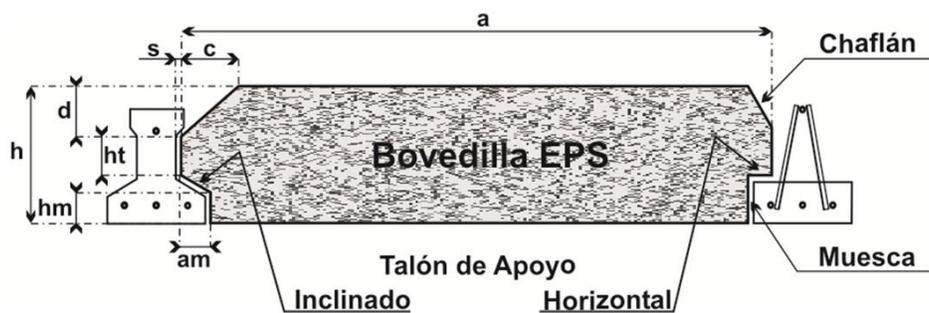


Figura 8. Sección transversal de bovedilla de poliestireno expandido (EPS) (PROY – NMX – C – 463- ONNCCE, 2009)

Donde:

a es el ancho de la bovedilla.

c es el ancho del chaflán.

s es la separación entre vigueta y bovedilla.

d es la altura del chaflán.

h es la altura total.

ht es la altura del talón de apoyo.

hm es la altura de la muesca.

am es el ancho de la muesca.

Como se pretende hacer una bovedilla con medidas estándar, primero se analizará la resistencia que se tiene con la bovedilla de las dimensiones de la **Figura 9**. Posteriormente, el diseño se proporcionará un espesor mínimo requerido para la elaboración de la bovedilla.

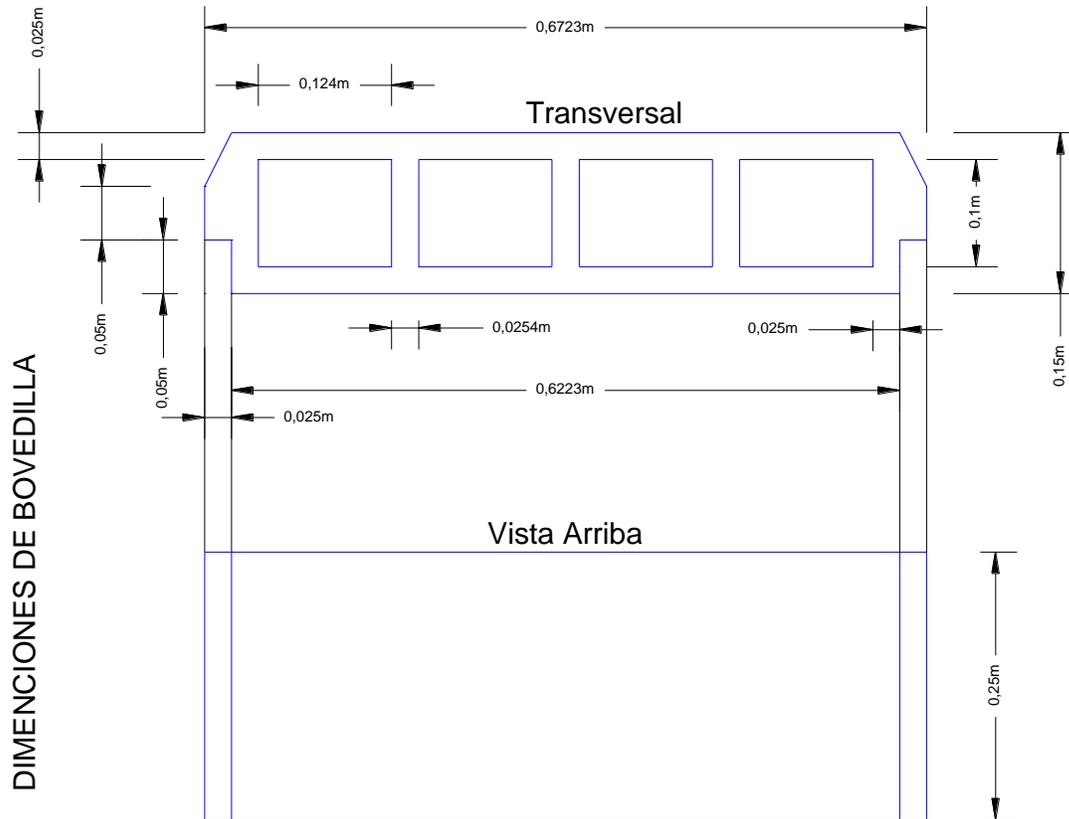


Figura 9 Dimensiones de la bovedilla antes del diseño

### 3. Marco teórico

#### 3.1 Introducción

En este capítulo nos damos a la tarea de conocer los conceptos que son necesarios para la correcta ejecución de la investigación. Dado ya el objetivo de nuestra investigación, sabemos que influyen tres factores importantes en el prototipo a realizar, y en estos son el material, el dimensionamiento y la resistencia. De igual manera es necesario conocer las pruebas más importantes que se realizan al material PET, por lo que en este capítulo donde los describimos.

### 3.2 Termoplásticos

Estos materiales se caracterizan por tener una buena resistencia a los impactos, además de que su procesabilidad es fácil, adaptándose a moldes complejos. (Kolapo, 2016). El esquema estructural molecular de un termoplástico es muy simple, y se puede representar en la **Figura 10**. (Biron, 2018).

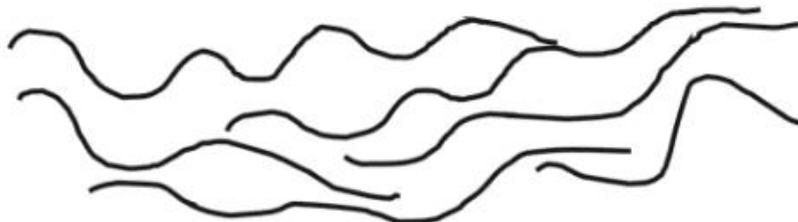


Figura 10. Esquema de la estructura de un termoplástico (Biron, 2018)

Gracias a la transferencia de calor, estos materiales pueden ser derretidos o fundidos, moldeados, y al enfriarse se solidifican, este proceso se puede hacer muchas veces sin dañar la estructura química del material, permitiendo así que el material se recicle muchas veces. Si estos materiales tienen un proceso adecuado de transformación, pueden ser capaces de no liberar gases ni vapor de agua. (Biron, 2018)

Por definición los termoplásticos son aquellos que a través de temperaturas y presiones adecuadas logran ser fundidos. Estos materiales por lo general son ocupados para envases. Dentro de los termoplásticos, se encuentran los siguientes:

polietileno tereftalato (PET), Polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD), policloruro de vinilo (PVC), Polipropileno (PP) y poliestireno (PS). (Toledo, 2013).

### 3.2.1 Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos

La aplicación de calor a los termoplásticos genera cambios en las propiedades físicas y de resistencia del material, esto se vuelve interesante porque de esta manera podemos controlar aspectos ingenieriles a la hora de diseñar elementos. Pero también al aplicar cambios de temperatura a un termoplástico, podemos encontrar con puntos específicos de temperatura en donde existen cambios más grandes respecto a los estados de dicho material. Estos puntos específicos que refieren a temperaturas son la temperatura de fusión ( $T_m$ ) y la temperatura de transición del vidrio ( $T_g$ ). Por arriba de la temperatura de fusión, el material se vuelve líquido. Por debajo de la temperatura de transición del vidrio el material se vuelve Vítreo. Y entre esas dos temperaturas críticas, el material puede ser solido amorfo o solido cristalino como se muestra en la **Figura 11**. (Días, F,2012)

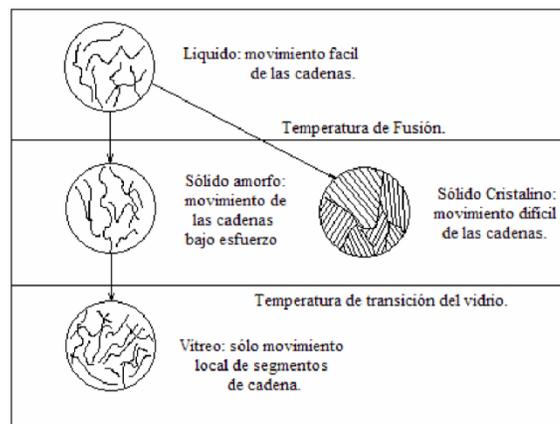


Figura 11. Efecto de la temperatura en la estructura y en el comportamiento de los materiales termoplásticos. (Días F, 2012)

Un estado amorfo se caracteriza por que sus macromoléculas al ser agrupadas de forma de líneas o ramificada no existe un principio ordenador de la disposición de sus cadenas, por lo tanto, estas cadenas son irregulares. Por debajo de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), el polímero amorfo tiende a ser duro y frágil. (Benavente, 2001)

El PET por su parte se considera como un termoplástico cristalino que al enfriarse sus cadenas tienden a enlazarse muy ordenadamente. La cristalización en si se lleva a cabo durante el procesamiento de los polímeros, resultado de los cambios de temperatura. A través de un enfriamiento lento, se puede tener una cristalización que ayude a incrementar la densidad del material, resistencia al ataque químico y las propiedades mecánicas.

### **Bases teóricas**

#### **3.2.2 Tereftalato de polietileno (PET)**

El PET pertenece al grupo de los poliésteres y es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo. Este fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, ellos lo patentaron como polímero, y es de gran utilidad en la actualidad.

Sus características elementales son: propiedades mecánicas como dureza y rigidez, aislante de gases y corrosión, resistencia química a disolventes y aceites sin sufrir daño, resistencia al desgaste, a los impactos y a la rotura, liviano.

Sus elementales ventajas son: resistente, moldeable, reciclable, esterilizable y liviano. Sus desventajas: se asocia a problemas médicos, altamente

contaminante, pierde propiedades a altas temperaturas, se debe ser secado para obtener los beneficios.

Dicho material puede reutilizarse, siendo bueno para el cuidado del medio ambiente, este polímero se elabora mediante un proceso de polimerización de ácido tereftalato y mono etilenglicol. Pudiéndose fabricar en diversos procesos.

### **3.2.2.1 Cristalización molecular.**

En el año 1972 Van Antwerpen y Van Krevelen obtuvieron que a una temperatura de 180°C, se tenía un valor de velocidad máxima de cristalización del PET. (Ortiz. 2002).

“Las fibras son polímeros con alta resistencia tensil ( $> 35000 \text{ N/cm}^2$ ), alto módulo ( $> 35000 \text{ N/cm}^2$ ), y sufren muy poca deformación ( $<10\text{--}50\%$ ). En estos materiales el eje de las cadenas de los polímeros tiende a alinearse a lo largo de la dirección de la fibra, por lo que sus propiedades mecánicas son mejores en esa dirección que en la perpendicular. Son altamente cristalinos y presentan fuerzas intermoleculares elevadas. Ejemplos comunes son el nylon, el PET, el PP y la celulosa.” Las regiones cristalinas otorgan rigidez y resistencia, mientras que las amorfas dan flexibilidad y tenacidad a los polímeros (Coreño. 2010).

### **3.2.2.2 Propiedades generales del PET.**

Se han determinado datos en los cuales se indica que la temperatura de fusión de equilibrio del PET es de 280°C. Se puede considerar que un PET es amorfo cuando tiene una densidad  $P_a = 1.33 - 1.34 \text{ g/cm}^3$ , y que es un PET cristalino cuando la densidad es de  $P_c = 1.45 - 1.51 \text{ g/cm}^3$ . (Ávila, 2001). A

continuación, se muestra la **Tabla 4** con valores de temperaturas críticas en el procesamiento del PET.

Tabla 4. Propiedades PET, (C, Ibeh, 2011)

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.37 - 1.46
Fuerza de tensión (psi)	7000 - 15200 (55/75 - 105 Mpa)
Módulo de tracción (Mpa)	2800 - 3100
Absorción de humedad (%/24h)	0.3 - 0.8
T <sub>m</sub> (°c)	250 - 271
T <sub>g</sub> (°c)	69

En la elaboración de elementos de polímeros es necesario hacer una aproximación bajo cálculos teóricos antes de la experimentación, así determinaremos una resistencia teórica que esperemos sea próxima en las pruebas finales que tendrán estos elementos. A continuación, se presenta la **Tabla 5** de valores registrados bajo las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) que nos ayudaran a compararlos con los valores obtenidos en nuestra metodología. De los datos presentados, debemos enfocarnos más a dos términos, que son el módulo de elasticidad, la compresión y la tensión del material.

Tabla 5. Propiedades del PET. (Hong, 2016)

Propiedades mecánicas a 23°C	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	D-792	53479	1.39
Resistencia a la tracción (Fluencia/rotura)	kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	900/--
Resistencia a la compresión (1 y2% Def.)	kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	260/480
Resistencia a la flexión	kg/cm <sup>3</sup>	D-790	53452	1450
Resistencia al choque sin estalla	kg.cm/cm <sup>2</sup>	D-256	53453	>50
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	15
Módulo de elasticidad (tracción)	kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53457	37000
Dureza	Shore D	D-2240	53505	85-87
Coefficiente de roce estático s/acero		D-1894		--
Coefficiente de roce dinámico s/acero		D-1894		0.2
Resistencia al desgaste por roce				Muy buena

### 3.2.3 Degradación de PET por temperatura

En la vida activa del PET, este se encontrará sujeto a factores que intervienen en la degradación continua, como es el oxígeno, la luz, el estrés mecánico, el agua, la temperatura o combinaciones de estos, que a largo plazo modificaran las propiedades de estabilización y mecanismos. Sin embargo, para el caso del presente estudio, nos interesa resaltar la degradación por temperatura, ya que este factor será inducido de forma directa para el elemento estudiado. Como lo muestra la **Figura 12** la degradación del PET puede ser acelerada temperaturas mayores

que la temperatura de fusión ( $T_m$ ), y esta temperatura está definida entre valores de 370°C y 520°C con pérdidas de masa de aproximadamente 84 %. (Arrazola, 2014).

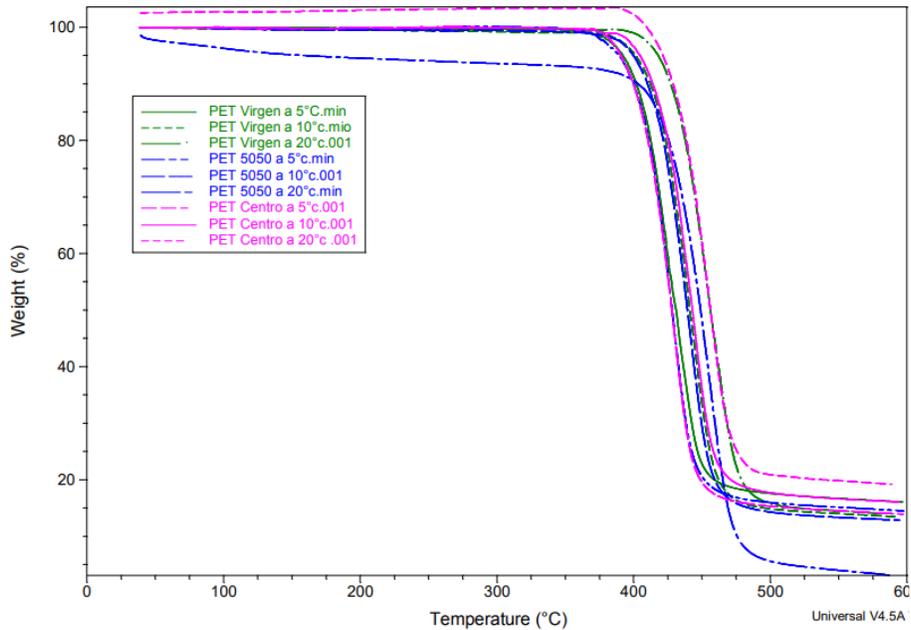


Figura 12. Grafica representativa de la variación del peso en porcentaje (weight) y la temperatura aplicada a diferentes velocidades de 5, 10, 20°C cada minuto, y la proporción de PET VIRGEN (50%), Y PET reciclado (50%). (Arrazola, 2014)

### 3.2.4 Densidad del PET.

El Tereftalato de polietileno (PET), es el resultado de la polimerización de 1 mol de Tereftalato dimetilico con 2.2 moles de etilenglicol. El grado de cristalización y la dirección de todos los cristalitos rigen las propiedades físicas de la resina. La densidad del PET amorfo es de  $1.33 \text{ g/cm}^3$  en tanto que la densidad de un cristal de PET es de  $1.45 \text{ g/cm}^3$ . A temperatura de 70°C el material se puede estirar hasta 4 veces su dimensión original, siendo este su estado virgen. Si se calienta

nuevamente a más de 100°C se vuelve cristalina solo en un 20% y se vuelve isotrópica a la tensión.

El PET comercial posee una naturaleza químicamente inerte ideal para embalaje de comestibles y medicamentos. La temperatura de fusión es de 255°C. Generalmente los aditivos que contiene son: Retardadores de llama, tal es el caso de los fosfatos antienviejimiento, colorantes, agentes de soplado, agentes de cadenas cruzadas y protectores UV. La absorción de luz ultravioleta produce radicales libres que reaccionan con el oxígeno y por ello se produce el fenómeno llamado foto-degradación. (Rodríguez. 2016).

### **3.3 De acuerdo con la norma NMX-C-406-ONNCCE-2014.**

Este se define como un elemento aligerante de relleno colado dispuesto en las secciones de la losa. Un diseño correcto de bovedillas debe considerar ser resistente a acciones temporales que se presentan durante la elaboración y colado de la losa, así este elemento se considerara seguro para las personas que realizan estos trabajos, por otro lado también debe de ser capaz de soportar el concreto cuando este es vaciado en los elementos portantes y aligerantes de la losa a la hora del colado, sin sufrir deformaciones, fisuras o fracturas que afecten la seguridad de la estructura, definimos en este apartado a las vigueta como el elemento portante y a la bovedilla como el elemento aligerante.

Con relación a las pruebas que debe resistir una bovedilla convencional de cemento-arena encontramos los siguiente: Saturar por inmersión el elemento de cemento-arena por 24 horas, posterior a esto colocarse por medio de las cejas de

la bovedilla en elementos portantes o sobre tablones, y aplicarle una carga de 100 kilogramos en el centro de la bovedilla delimitando este centro en un cuadrado de 100 cm<sup>2</sup> durante 24 horas, después de esto se revisa la bovedilla verificando que no presente daños.

Es necesario que las bovedillas que son susceptibles al ataque del fuego sean protegidas por materiales incombustibles, aislantes o retardantes de fuego, ya sea directamente o mediante un plafón incombustible como recubrimiento de yeso o mortero.

### **3.4 Modulo de elasticidad**

“Todo cuerpo sólido se deforma bajo la acción de fuerzas aplicadas, y al cesar estas, el cuerpo tiende a recuperar su forma primitiva. Esta tendencia que, en mayor o menor grado, tienen todos los sólidos se denomina elasticidad.” (Blanco, 2015)

Entonces al aplicarle una fuerza  $P$  a un cuerpo este tendrá deformaciones  $\delta$ , ahora si la misma fuerza se aplica de forma gradual hasta cierto valor, se puede obtener una gráfica denominada Carga-Deformación ( $P$ -  $\delta$ ). De igual manera si se descarga esa fuerza de forma gradual, y se dibuja la misma grafica de Esfuerzo-Deformación, se puede observar que para valores máximos de  $P$  menores a cierto límite  $P_e$ , denominado limite elástico, la línea de dicha grafica se comporta de manera igualitaria y equivalente respecto a sus valores, a la delimitación de la gráfica con estos valores se le conoce como región elástica. Si se da el caso de que la carga  $P$  excediera el límite elástico, la rama de descarga se separa de la carga,

y se producen deformaciones, aquí se dice que el comportamiento por lo tanto ya no es perfectamente elástico. Existe otro valor límite denominado Límite de proporcionalidad ( $P_p$ ), este valor es menor que  $P_e$ , aquí las cargas que son menores a este valor límite serán proporcionales con las deformaciones. **Figura 13.**

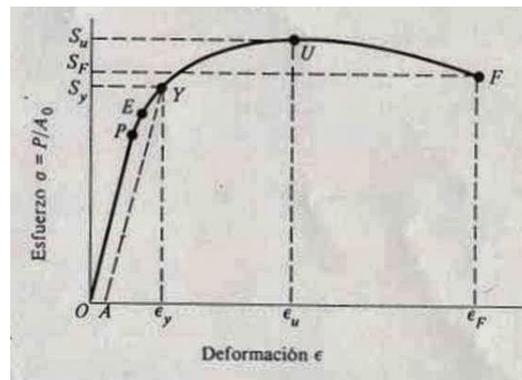


Figura 13. Diagrama de esfuerzo deformación de materiales elásticos. (Blanco, 2015).

En el 1678, Robert Hooke definió el comportamiento elástico con la ecuación siguiente:

$$P = K\delta$$

Ecuación 1. Comportamiento elástico

$K$ , se define como la constante de proporcionalidad entre la fuerza aplicada  $P$  y el desplazamiento  $\delta$ , este valor depende directamente de las propiedades mecánicas del material del objeto en estudio. (Blanco, 2015). Se pueden encontrar

otros valores importantes en este tipo de gráficas, por ejemplo, es común que se quiera saber con qué carga el material deja de ser elástico, este punto en la gráfica se denomina límite de fluencia. La forma más usual de determinar estos valores es haciendo probetas y ensayándolas a la ruptura. **Figura 14.**

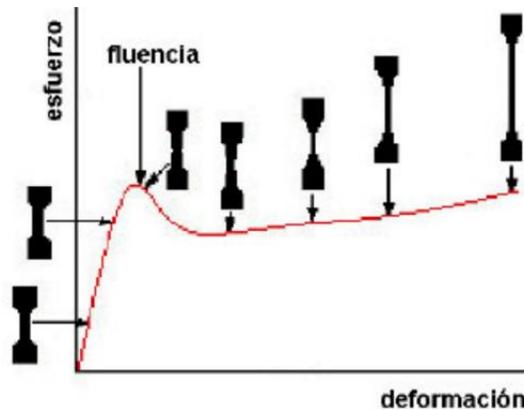


Figura 14. Curvas típicas de esfuerzo deformación y comportamiento de la probeta durante un ensayo de tracción. (Cornement, 2006)

La alteración de la forma o dimensiones de un cuerpo como resultado de las tensiones aplicadas se le denomina deformación. Los esfuerzos de tracción causan en la pieza una elongación perpendicular a su propia dirección, mientras que los de compresión dan lugar a una contracción. González. M; (2017).

### 3.5 Flexión en elementos rectos

Consideremos un elemento recto como el mostrado en la **Figura 15**. Aplicar un momento flexionante sobre este elemento, se tiende a distorsionar las líneas que forman cuadrículas en el elemento, observemos, que las líneas longitudinales se curvan, mientras que las líneas transversales verticales permanecen rectas, aunque experimentan una rotación. (Hibbeler, 2011).

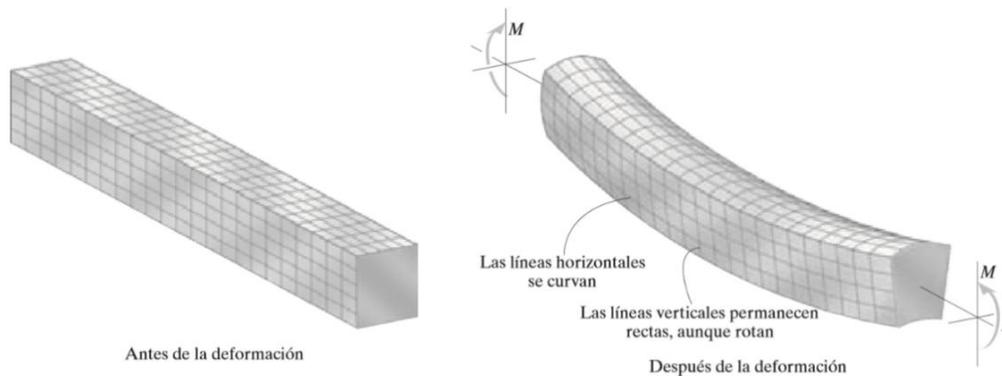


Figura 15. Elemento recto, antes y después de ser deformado por un momento flexionante. (Hibbeler, 2011)

El momento flexionante hace que el material de la porción inferior de la barra se estire y que el material en la parte superior se comprima. En consecuencia, entre estas dos regiones debe haber una superficie, llamada superficie neutra, en la que las fibras longitudinales del material no sufrirán ningún cambio de longitud, este eje neutro se encuentra en el eje X mostrado en la **Figura 16**.

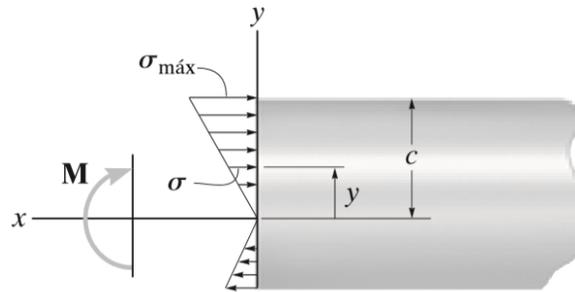


Figura 16. Aplicación de momento flexionante sobre la sección transversal de un elemento y su variación de esfuerzos. (Hibbeler, 2011)

La variación del valor de esfuerzo depende de la sección transversal del elemento y de la distancia desde el eje neutro a los extremos de dicha sección. Para obtener el esfuerzo máximo que ocurre en este elemento nos apoyamos de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I}$$

Ecuación 2. Esfuerzo máximo

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$  = el esfuerzo normal máximo en el elemento, que se produce en el punto sobre el área de la sección transversal que está más alejado del eje neutro;

M= el momento interno resultante, determinado a partir del método de las secciones y de las ecuaciones de equilibrio; se calcula respecto al eje neutro de la sección transversal;

c = la distancia perpendicular desde el eje neutro hasta el punto más alejado del eje neutro. Aquí es donde actúa  $\sigma_{m\acute{a}x}$ ;

$I$  = el momento de inercia del área de la sección transversal respecto al eje neutro.

### 3.6 Tensión aplicada a recipientes de PET.

El PET extraído directamente de las botellas comerciales y probados a esfuerzos de tracción, presentan diferentes resistencias dependiendo la dirección del corte que se haga en dichas botellas, estos cortes pueden ser paralelos, diagonales y perpendiculares en relación con el eje principal de este objeto. **Figura 17.**

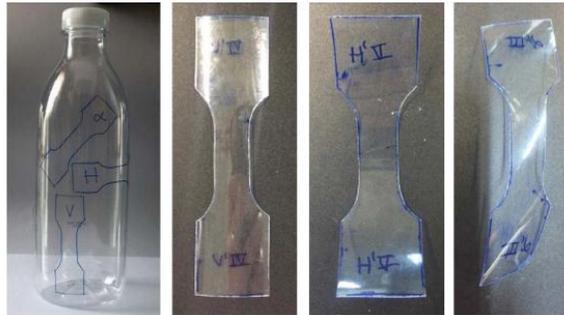


Figura 17. Muestras representativas para pruebas a tracción extraídas de la botella de PET, están extraídas en diferentes direcciones respecto al eje principal de la botella (Horizontal, 45°, vertical) (Vázquez, 2018)

Cuando se someten estas probetas a tracción (N) se determina la **Figura 18**, así se pueden definir la cantidad de (mm) que el pistón de pruebas se desplazó al tensionar a las probetas ocasionando una deformación a cierta carga.

De las tiras verticales ensayadas a tracción, se determinó que el límite elástico se presenta a un  $F_y = 75$  MPa, y su tensión ultima se presenta con  $F_u = 128$  MPa. De igual manera se tiene por lo tanto un Módulo de Young (E) entre 2300 MPa y 2800 MPa. (Vázquez. 2018).

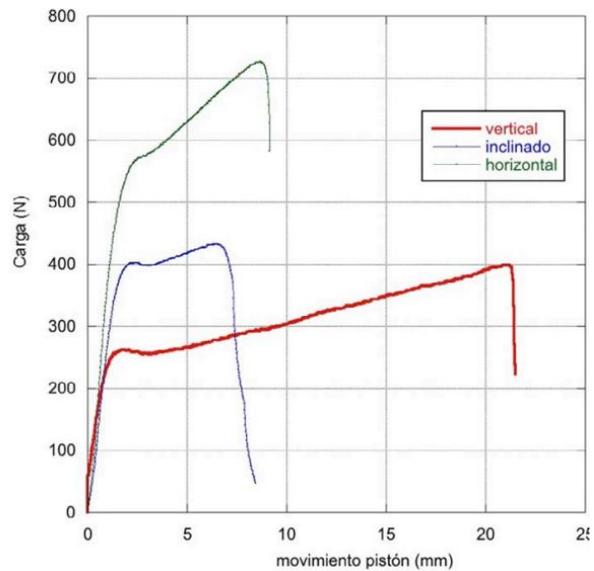


Figura 18. Relación carga (Newtons) deformación (mm) de probetas extraídas en diferentes direcciones de una botella PET. (Vázquez, 2018)

### 3.7 Colado de polímeros

“La colada consiste en el vertido del material plástico en estado líquido dentro de un molde, donde fragua y se solidifica.” (Garavito, 2007).

## 4. Metodología

### 4.1 Recolección de materiales

Como el enfoque del estudio consideraba el uso de materiales reciclados, se hizo una recolección en basureros y centros de reciclaje de polímeros, para este caso se recolectaron envases de bebidas gaseosas, bebidas energéticas, bebidas saborizantes y de agua potable. **Figura 19.** Los envases recolectados fueron de diferentes colores, además de que no se hizo distinción de marcas industriales de bebidas. Se utilizaron botellas que no presentaran defectos como quemaduras.



Figura 19. Recolección de botellas PET.

#### **4.2 Lavado y retiro de etiquetas de las botellas PET.**

Para realizar este proceso se ocupó agua no contaminada y sin detergentes a una temperatura ambiente de 23°C. Los envases se sumergieron en agua y al estar a la mitad de su volumen llenos, estos se agitaron en 5 ciclos de manera manual, el agua que ocupaba cada botella no se volvió a ocupar. Correspondiente a las etiquetas que algunas botellas presentaban, estas fueron desprendidas, así también se retiraron de forma completa a las tapas y arillos correspondientes, esto con la intención de no mezclar diferentes tipos de plásticos, y solo rescatar el PET.

#### **Figura 20.**



Figura 20. Botella con materia prima de PET reciclado sin contaminantes.

### 4.3 Secado del PET

Fue necesario que antes de fundir el material polímero, este se triturara, ya que entre más pequeños sean los componentes, es mejor el manejo de ellos, al igual que ocupan menor espacio en los recipientes que lo contienen. La trituradora que se encargó de esta acción es un Molino para Plástico RECITAB 20 hp con trituración tipo tijera **Figura 21**, la cual genero láminas de PET de un tamaño inferior a 1". **Figura 22**.



Figura 21. Molino para plástico RECITAB 20hp, para trituración del PET



Figura 22. PET triturado

#### **4.5 Determinación de la temperatura de fusión y preparación de los moldes**

Fue necesario conocer la temperatura real a la que el material triturado (PET) se funde, y de esta manera se seleccionaron recipientes que tuvieran una temperatura de fusión más alta, además que también fue indispensable para seleccionar el rango de temperaturas que el horno debería de tener a la hora de la fundición.

Para este proceso se necesitó llenar 2 mm de un tubo capilar con residuos de PET triturado, cuidando que estuviese contaminado con algún otro material.

#### **Figura 23.**



Figura 23. Tubo capilar con muestra de material PET reciclado

Posterior a este paso, se procedió a colocar el tubo capilar dentro de un determinador de punto de fusión MEL-TEMP® Thermo Modelo: 1101D,

acompañado de un termómetro digital FLUKE 51 II. El MEL-TEMP opero a la mitad de su potencia. **Figura 24.**



Figura 24. Determinación punto de fusión del PET

Se puede apreciar que el material se ve de color blanco a una temperatura ambiente. **Figura 25.** A una temperatura de 280°C el material empezó a cambiar de color, tomando un tono oscuro, pero se consideró que el material tenía un punto de fusión de 324° porque a esta temperatura cambio totalmente su estado físico de solido a líquido.



Figura 25. En el centro de la imagen de color blanco se ve una muestra de PET reciclado de tubo capilar, antes de la fundición en un MEL-TEMP® Thermo Modelo: 1101D

Entonces para la selección de los materiales pertenecientes a los recipientes se seleccionó una charola reciclada de “Atún” como recipiente que ayudaría a fundir dentro del horno. Ya que presenta dimensiones menores que el horno de fundición, y además el material que lo constituye es de aluminio teniendo una temperatura de fusión arriba de los 600°, este recipiente se lavó y se secó perfectamente, además de que etiquetas y residuos fueron retirados en su totalidad, además que se seleccionaron charolas que no tuvieran pigmentación en su superficie.

Como lo indican los modelos de las probetas sujetas a compresión y tracción de polímeros en las normas ASTM D695 y ASTM D638 respectivamente, se seleccionó un tubo de acero cromado para el molde de probetas a compresión, el tubo presento un diámetro interior de 1”, lo cual fue perfecto para servir como molde, dicho tubo presenta una altura superior a 2 veces el diámetro, por lo que ya colocado y enfriado el material fue necesario córtalo para obtener las dimensiones adecuadas, no fue necesario fuerza mecánica para despendar el material colado, ya que al enfriarse el polímero, se contrae de manera diferencial y se desprende naturalmente del molde. **Figura 26**



Figura 26. Molde acero galvanizado con diámetro interior de 1”, utilizado para colar PET reciclado

El molde para cortar el cilindro fue de mismo material y dimensiones que el molde de colada, sin embargo, la altura de este cilindro fue de 2 veces el diámetro para obtener las dimensiones que indica la norma ASTM D695, siendo así, el cilindro de PET con dimensiones superiores, se cortó con una segueta de manera manual al ras del tubo de acero, teniendo mucho cuidado con no ocasionar imperfecciones y bordes en la superficie del cilindro. **Figura 27.** Para lograr mayor facilidad, se cortó este tubo de manera longitudinal en toda su dimensión, con una anchura de 2 mm, y se le colocó una abrazadera para conseguir ajustar el cilindro y que no se moviera.



Figura 27. Molde de sujeción con abrazadera, para recortar imperfecciones de cilindros de PET reciclado

Fue necesario crear un molde para la elaboración de las probetas sujetas a tracción, **Figura 28**, por lo que se seleccionó un material que pudiera ser apto para dicho proceso. Se realizaron experimentos con el material Naylacero, como primer paso de determino su temperatura de fusión de la misma manera que como se determinó la temperatura de fusión del PET, pero en este caso con residuos de Naylacero. **Figura 29.** Se encontró que dicha temperatura era de 290°C, lo cual es menor que el PET, sin embargo, fue factible utilizarla, ya que, al momento del colado, se genera un choque térmico de materiales, entre el PET una temperatura

de 325°C y el Naylacero a una temperatura ambiente de 23°C, sin embargo, fue necesario dejar enfriar en cada producción de probeta a el molde para que este no presentara aumento de temperatura en la siguiente elaboración.



*Figura 28. Molde Naylacero para colar probetas de tracción de PET reciclado*



Figura 29. En el centro de la imagen, lo de color blanco se ve una muestra de Naylacero en tubo capilar, antes de la fundición en un MEL-TEMP® Thermo Modelo: 1101D

#### 4.6 Elaboración de probetas.

Fue necesario fundir el PET virgen, PET reciclado transparente, y de esta forma comparar la pigmentación con el material reciclado propuesto para bovedillas donde se considera PET reciclado de diferentes colores (**Figura 30**). En la **Figura 31** se muestra PET virgen y PET reciclado transparente.



Figura 30. PET virgen en forma granular y PET reciclado transparente en forma de laminillas antes de su fundición



Figura 31. En la ilustración izquierda se muestra PET virgen fundido totalmente transparente y PET reciclado transparente fundido que ahora presenta pigmentos de color café. En la ilustración derecha se aprecia el color que adquiere el PET reciclado fundido con diferentes pigmentos.

Dentro del proceso para la elaboración de las probetas, primeramente, se programó el horno de fundición a una temperatura de 350°C, esta temperatura ayudaría a que el material no presentara mucha viscosidad a la hora del colado, además de ayudar agilizar la fundición. El horno utilizado es Barnstead International® modelo: F47915, con temperaturas de 1225 °C. **Figura 32.**



Figura 32. Horno Barnstead para fundición de PET reciclado

Posteriormente se llenaron los recipientes con material PET triturado, y se pusieron en el horno durante 5 min, posteriormente fue necesario volver a agregar material, ya que es necesario completar la cantidad de volumen que necesita la probeta dentro del molde, se repitió este proceso una vez más, y en total se llenó el recipiente 3 veces, el material estuvo en el horno durante 15 min. **Figura 33.**



Figura 33. A la izquierda se muestra el recipiente con PET reciclado, a la derecha se muestra el recipiente y el PET reciclado dentro del horno

Culminado ya el tiempo en el horno y ya en estado líquido, el material se coló en los moldes correspondientes. **Figura 34.** El proceso se repitió 5 veces para las probetas de compresión y tracción respectivamente. Cada colado se dejó enfriar durante 15 min, posteriormente las probetas se desprendieron de los moldes, y se enfriaron naturalmente en un ambiente de 23 °C.



Figura 34. PET colado en un molde para probetas de tracción

Fue necesario que las probetas se quedaran lo más apegadas a las dimensiones de las normas correspondientes, y que las superficies lisas quedaran

libres de bordes que causaran discontinuidad en la probeta. En la **Figura 35** y en la **Figura 36**, se muestran algunas de las muestras ocupadas en los ensayos.



Figura 35. Probeta cilíndrica de PET reciclado



Figura 36. Probetas de tracción de PET reciclado

Las propiedades de las probetas a compresión se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Probetas de tracción de PET reciclado

Probeta	Ancho 1 (mm)	Ancho 2 (mm)	Ancho 3 (mm)	Ancho prom. (mm)	Espesor 1 (mm)	Espesor 2 (mm)	Espesor 3 (mm)	Espesor Prom. (mm)	Área(mm <sup>2</sup> )
T1	12.01	12.23	12.01	12.08	5.46	5.49	5.07	5.34	<u>64.53</u>
T2	12.21	12.15	12.23	12.20	5.60	5.30	5.05	5.32	<u>64.85</u>
T3	12.46	12.26	12.18	12.30	4.87	5.06	4.92	4.95	<u>60.89</u>

Las propiedades de las secciones de prueba de las probetas a tensión se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Propiedades de las secciones de probetas de tracción.

Muestra	Altura. (mm)	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Diámetro 3 (mm)	Diámetro promedio (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (KG)
M1	50.8	25.4	25.4	25.4	25.40	506.71	2.5741E-05	0.033
M2	50.55	25.1	25.25	25.15	25.17	497.44	2.5146E-05	0.033
M3	51	25.65	25.6	25.6	25.62	515.39	2.6285E-05	0.033
M4	52.3	25.75	25.9	26	25.88	526.18	2.7519E-05	0.033
M5	51.35	25.9	25.89	26	25.93	528.08	2.7117E-05	0.033

#### 4.7 Determinación del esfuerzo de tensión del polímero

Se consideraron varios aspectos que describe la norma ASTM-D638-Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, sin embargo, cabe resaltar que esta norma se enfoca más a pruebas con muestras elaboradas por extrucción y no por colado.

Para realizar esta prueba tracción fue necesario utilizar una maquina INSTRON 4465, con una celda de carga de 5 KN, a una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min. La temperatura de pruebas fue de 23 °C. Fue necesario tratar las probetas con sumo cuidado a la hora de colocarlas sobre las prensas de la máquina, ya que las muestras se presentaban muy frágiles a la flexión. **Figura 37**.



*Figura 37. Colocación de probeta de PET reciclado colado, en una máquina de pruebas a tracción INSTRON 4465*

Se sujetaron las muestras en las prensas y se consideró el área necesaria de agarre, pero dejando libre el área ubicada en la sección más delgada (sección de prueba) de la probeta y posteriormente inicio la prueba a tracción hasta llevarla a la fractura final. **Figura 38.**



Figura 38. Fractura de probeta de PET reciclado sujeto a tracción

#### **4.8 Determinación del esfuerzo de compresión del polímero**

Primeramente se intento hacer las pruebas en una maquina INSTRON 4465, con una celda de carga de 5 KN, considerando una velocidad de desplazamiento de 1.3 mm/min. Sin embargo, no se logró alcanzar la fractura, lo que indicaba que

la probeta necesitaba una maquina con más capacidad de carga. Entonces se consideró una máquina de compresión CONTROLS PILOT ®, con extensión.

**Figura 39.** Las pruebas de compresión se realizaron 7 días después de la elaboración de las probetas con diferentes velocidades de carga como se mostrará más adelante.



4.9 Figura 39. Cilindro de PET reciclado colado sujeto a compresión en una máquina de ensayos CONTROLS PILOT® con extensión

### Determinación del módulo elástico

Dentro de los resultados obtenidos en las pruebas de tracción, se pudo encontrar un promedio de valores para el Módulo Elástico, considerando la siguiente ecuación.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} ;$$

Ecuación 3. Ecuación modulo elástico

Donde:

E= Modulo de elasticidad.

$\sigma$ = Esfuerzo de Tracción antes de la Fluencia.

$\epsilon$ = Deformación unitaria antes de la Fluencia.

Sin embargo, la relación entre “ $\sigma$ ” y “ $\epsilon$ ” no presento de manera lineal, por lo tanto, estos valores se consideraron en los puntos donde se registró la carga máxima que resistía el material

#### **4.10 Modelación de la bovedilla y determinación de deformaciones por medio de un software con dimensiones establecidas.**

La elaboración del modelo de la bovedilla se consideró utilizar el programa Midas FEA® de MIDAS Engineering Software. El modelo se realiza respetando las dimensiones mostradas en la **Figura 40**. Considerando lo descrito en la norma NMX-C-406-ONNCCE-2014, se aplicó una carga de 100kg en un área de  $100\text{cm}^2$  en el centro de la bovedilla. **Figura 41**. Y un módulo de esfuerzo deformación es de 577.58MPa para el material, es de  $8.68\text{ kg/cm}^2$ , con una deflexión en el centro de la bovedilla de 1mm. **Figura 42**.

El software permitió crear un elemento de bovedilla en 3D para posteriormente ser analizado por método de elemento finito. Fue necesario agregar el módulo de esfuerzo deformación del PET reciclado colado obtenido en procesos anteriores, además de esto fue necesario agregar la carga que describen las normas. Se agregaron restricciones en el eje Z (desplazamiento vertical de la sección) y el eje X (desplazamiento horizontal de la sección) en las cejas (muescas) de la bovedilla.

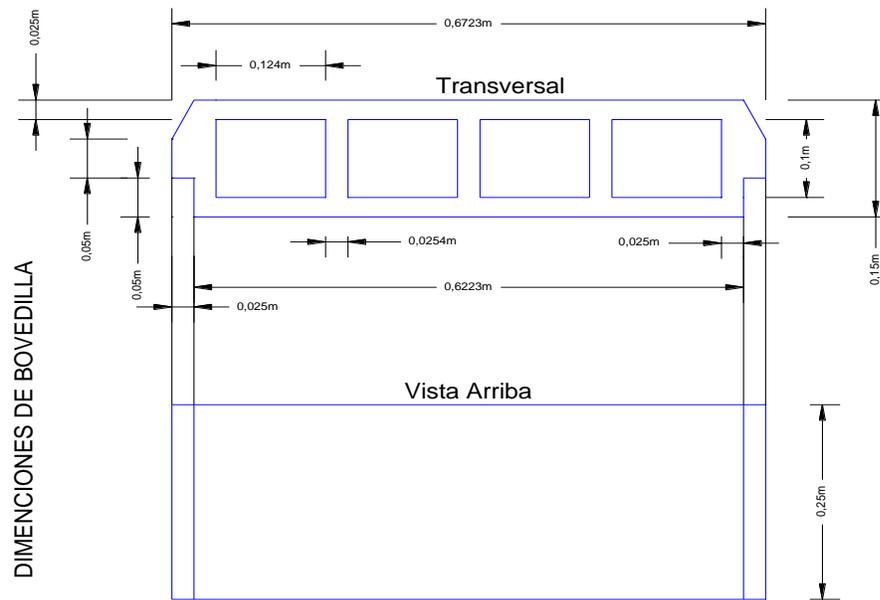


Figura 40. Dimensiones del modelo de la bovedilla

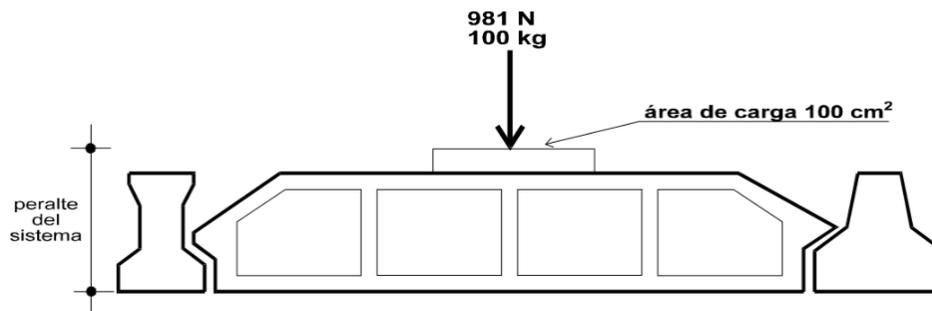


Figura 41. Representación de la carga de 100 kg sobre una bovedilla.  
(ONNCCE,2014).

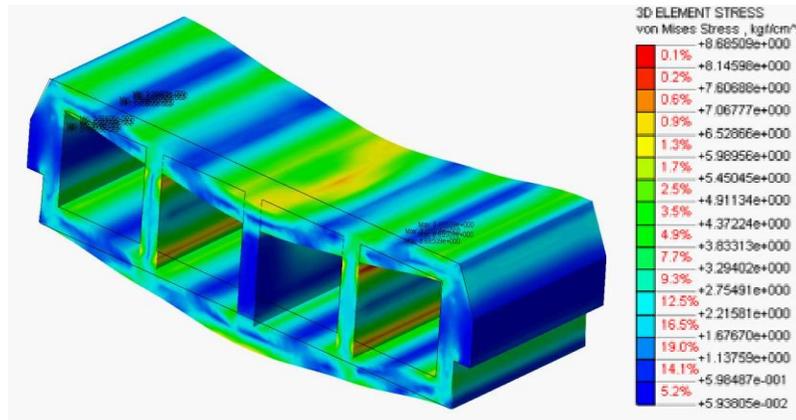


Figura 42. Análisis de esfuerzos dentro de la bovedilla donde el esfuerzo máximo se representa en color rojo y el esfuerzo más pequeño de color azul. Campos A. 2019

Este análisis de esfuerzos podrá verse en el apartado de los resultados, donde se explica la cantidad de iteraciones.

#### 4.11 Método SIMP para optimización de topología

Para realizar una optimización de topología lo más conveniente es realizar una optimización estructural. Para la fase inicial de diseño se utiliza la predicción de distribución óptima del material en un determinado espacio de diseño inicial de la estructura, para ello se toman en cuenta las especificaciones funcionales y cuáles son las restricciones de fabricación. Conociendo que el método matemático más popular para la optimización de topología es el método de material isotrópico sólido con penalización (SIMP). Bendsoe y Kikuchi (1988) y Rozvany y Zhou (1992) propusieron inicialmente dicho método. Este método predice una distribución óptima del material dentro de un espacio de diseño determinado, para casos de carga determinados, condiciones de contorno, restricciones de fabricación y requisitos de rendimiento.

Según Bendsoe (1989) “la optimización de la forma en su configuración más general debe consistir en una determinación para cada punto del espacio, independientemente de que haya material en ese punto o no”. El enfoque tradicional para la optimización de topología es la individualización de un dominio en una rejilla de elementos finitos denominados microestructuras solidas isotrópicas. Cada elemento se rellena con material para regiones que requieren material, o se vacía de material para regiones donde se puede eliminar material (lo cual representa vacíos). La distribución de densidad del material dentro de un dominio de diseño,  $\rho$ , es individual, y a cada elemento se le asigna un valor binario:

$\rho(e) = 1$ , donde se requiere material (negro)

$\rho(e) = 0$ , donde se elimina material (blanco)

Un ejemplo claro se muestra en la **Figura 43**, donde se muestra el diseño de un material optimizado de una viga cargada. Los elementos solidos con densidades  $\rho(e) = 1$  son de color negro, mientras que los elementos vacíos con  $\rho(e) = 0$  se eliminan.

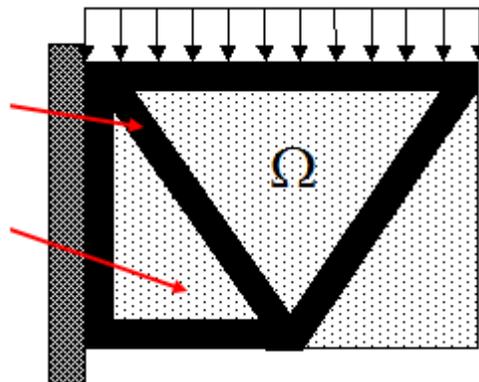


Figura 43. Viga en voladizo

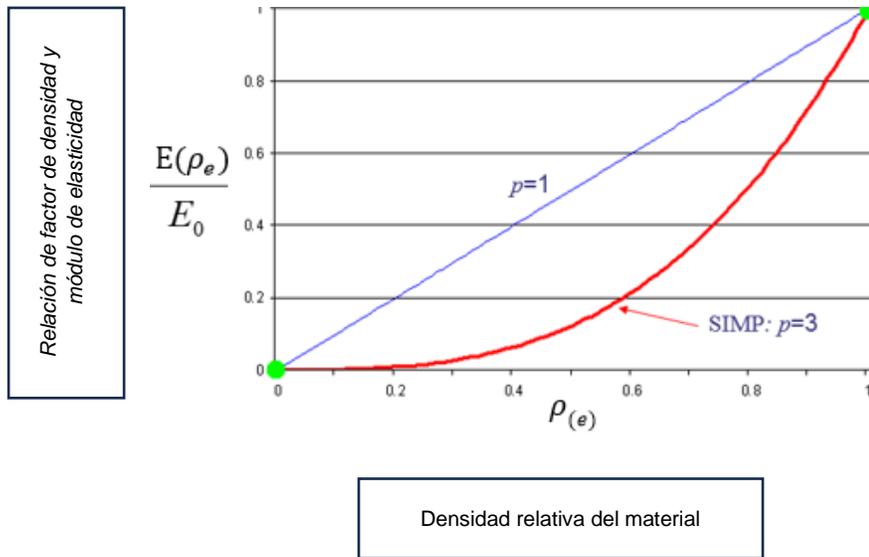
La introducción de una función de distribución de densidad relativa continua evita la naturaleza binaria de activación/desactivación del problema. Para cada elemento, la densidad relativa asignada puede variar entre un valor mínimo  $\rho_{\min.}$  y 1, que permite la asignación de densidades intermedias para elementos (caracterizados como elementos porosos):

$\rho_{\min.}$  es el valor de la densidad mínima permitida para los elementos vacíos que son mayores que cero. Este valor de densidad garantiza la estabilidad numérica del análisis de elementos finitos.

Dado que la densidad relativa del material puede variar continuamente, el módulo de elasticidad del material en cada elemento también puede variar continuamente. Para cada elemento  $e$ , la relación entre el factor de densidad relativa del material  $\rho_e$  y el módulo de elasticidad del modelo de material isotrópico asignado  $E_0$  se calcula mediante la ley de potencia:

$$E_{(\rho e)} = \rho_e^p E_0$$

Ecuación 4. Ley de potencia



Grafica 1. Modulo de elasticidad variable

El factor de penalidad  $p$  disminuye la contribución de elementos con densidades intermedias (elementos grises) a la rigidez total. El factor de penalidad dirige la solución de optimización a elementos que son de color negro sólido ( $\rho_e = 1$ ) o blanco vacío ( $\rho_e = \rho_{\min.}$ ). Los experimentos numéricos indican que un valor de factor de penalidad de  $p = 3$  es adecuado.

Una reducción del módulo elástico del material de un elemento conduce a una reducción de la rigidez del elemento. Según el método SIMP, la rigidez global se modula de acuerdo con:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{\min} + (1 - \rho_{\min}) \rho_e^p] K_e$$

Ecuación 5. Ecuación de rigidez global

Donde  $K_e$  es la matriz de rigidez del elemento,  $\rho_{\min.}$  es la densidad relativa mínima,  $\rho_e$  es la densidad relativa del elemento,  $p$  es el factor de penalidad y  $N$  es el número de elementos en el dominio de diseño.

Por ejemplo, para un elemento con una densidad relativa asignada  $\rho_e = 0,5$ , factor de penalidad = 3 y  $\rho_{\min.} = 0,001$ , la matriz de rigidez global se escala mediante un factor de  $(0,001 + (1 - 0,001) * 0,5^3) = 0,12587$ .

#### **4.12 Función objetivo: maximizar rigidez.**

Su principal objetivo de optimización es maximizar la rigidez general de una estructura, o minimizar su cumplimiento en una cantidad determinada de eliminación de masa.

El cumplimiento es una medida de la flexibilidad o suavidad general de una estructura, siendo el recíproco de la rigidez. El cumplimiento global es igual a la suma del elemento elástico o las energías de deformación. Minimizar el cumplimiento global,  $C$  es equivalente a maximizar la rigidez global. El algoritmo de optimización, mediante un proceso iterativo, trata de resolver las densidades de los elementos (que son las variables de diseño de optimización) que minimizan el cumplimiento global de la estructura.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

Ecuación 6. Algoritmo de optimización, para maximizar el cumplimiento global

$[u_e]$  es el vector de desplazamiento nodal del elemento e,  $[K_e]$  es la rigidez del elemento e, y el vector  $\{\rho\}$  contiene las densidades relativas de los elementos  $\rho_e$ .

Durante cada iteración de optimización, se deben cumplir la restricción de masa objetivo, el equilibrio de fuerza-rigidez global y las restricciones funcionales requeridas:

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{target}$$

Ecuación 7. Restricción de masa objetivo

$V_e$  es el volumen del elemento y  $M_{target}$  es la masa objetivo de la optimización.

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\}$$

Ecuación 8. Equivalencia de vector de fuerza externa

$[K\{\rho\}]$  es la matriz de rigidez global modulada por el vector de densidades relativas,  $\{u\}$  es el vector de desplazamiento, y  $\{f\}$  es el vector de fuerza externa.

La siguiente formula contiene restricciones de respuesta de diseño, como limites en tensiones, desplazamientos, frecuencias propias, etc.

$$\theta(\{\rho\}, \{u\})_1 \leq \theta_1^*, \theta(\{\rho\}, \{u\})_2 \leq \theta_2^*, \dots$$

Ecuación 9. Restricciones de diseño

#### 4.13 Análisis de sensibilidad.

Durante cada iteración, el algoritmo de optimización realiza un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto que la variación de las densidades del material tiene sobre la función objetivo para maximizar la rigidez

Matemáticamente, el análisis de sensibilidad se expresa como la derivada de la función objetivo con respecto a las densidades del material.

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1}[u_e]^T[K_e][u_e]$$

Ecuación 10. Análisis de sensibilidad

Durante un análisis de sensibilidad, los elementos ponderados con factores de baja densidad de material terminan perdiendo su importancia estructural y se eliminan durante iteraciones posteriores.

Si calcula la sensibilidad de cada elemento de forma independiente y no tiene en cuenta la conectividad entre los elementos, puede provocar la discontinuidad del material y que los volúmenes se desconecten de la geometría principal. Esto se conoce como efecto de tablero de ajedrez. Para reducir el efecto de tablero de ajedrez, un esquema de filtrado aplica un radio de influencia de elemento y sitúa la media de las sensibilidades de cada elemento dentro de su región de influencia.

Las iteraciones de optimización continúan hasta que las variaciones de la función objetivo convergen y las iteraciones alcanzan sus criterios de convergencia.

Para poder realizar dicho estudio y comprender la metodología empleada por el software se encontró con el método SIMP para predecir una distribución óptima del material dentro de un espacio de diseño determinado, para los casos de cargas determinadas, sus condiciones de contorno, restricciones de fabricación y requisitos de rendimiento.

Para iniciar dicho procedimiento se toma en cuenta los parámetros que se encontraron sobre el promedio de los puntos de diseño más importantes de las gráficas de esfuerzo deformación, en donde el punto de diseño se obtuvo la siguiente carga de  $24.478 \text{ kg/cm}^2$  con una deformación máxima de  $0.005\text{m}$ .

El proceso de la optimización tiene tres componentes esenciales:

Objetivo: en nuestro caso se busca obtener un elemento que cumpla con la tensión de diseño para utilizar la menor cantidad de masa posible, produciendo el producto más ligero o menos caro, para poder reducir el costo o el peso esto lo convertimos en un objeto de optimización.

Restricciones: Si se tiene una carga de  $100\text{kg}$  en el centro de la bovedilla delimitando este centro en un cuadrado de  $100 \text{ cm}^2$ , la tensión en el elemento se es menor que  $25 \text{ kg/cm}^2$  garantizando así un diseño dentro de los parámetros requeridos.

Variables: Para las variables de diseño se utilizaron las cotas establecidas en el modelo, dichas variables pueden ser continuas, esto solo significa que se puede tener valores entre un mínimo y un máximo especificados.

## 5. Resultados

El diseño optimizado debería minimizar el objetivo cambiando las variables mientras se mantienen las respuestas críticas dentro de las restricciones definidas.

Para este caso se proporcionan los valores máximos y mínimos de sus variables de diseño de cotas y, se selecciona una optimización “estándar” o de “alta calidad”. El método estándar funciona suponiendo que la curva de respuesta objetiva entre los valores límite sea lineal y calcula solo la respuesta a dichos valores. Por otro lado, la optimización de alta calidad tiene en cuenta la posibilidad de una respuesta de segundo orden entre los límites y evalúa un valor medio, así como los extremos

Para nuestro estudio se utilizó la herramienta de optimización de alta calidad, así obtener resultados de mayor precisión y dependiendo de los parámetros establecidos y las variables de diseño el software nos da un número de escenarios posibles los cuales analizan y determinan cual es el más óptimo al acercarse más a nuestras necesidades. Para nuestro caso se obtuvieron 64 escenarios posibles de los cuales destacaron los de menor masa, obteniendo como escenario óptimo el número 9, donde la tensión obtenida es de  $24.588 \text{ kg/cm}^2$  con una deflexión máxima de 0.967 mm, donde la tensión es la más cercana a la tensión ideal de diseño.

Tabla 8. Resultados obtenidos después de la optimización

Estudio de diseño										
Escenarios/Iteraciones:	64									
Restricción de parámetros u objetivo	Formato	Unidad	Valor inicial	Valor óptimo	Escenario 1	Escenario 9	Escenario 17	Escenario 25	Escenario 42	Escenario 58
lateral		m	0.025	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.025	0.025
Espesor inferior		m	0.025	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
Espesor superior		m	0.025	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
espesor izq		m	0.0254	0.0254	0.0127	0.0254	0.0127	0.0254	0.0254	0.0254
espesor centro		m	0.0254	0.0127	0.0127	0.0127	0.0254	0.0254	0.0127	0.0254
espesor derecho		m	0.0254	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0127	0.0254	0.0254
Tensión	< 25 kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	7.0306	24.588	29.053	24.588	26.94	23.168	20.129	20.29
Masa	Minimizar	kg	16.86072	12.45872	12.45872	12.45872	12.45872	12.45872	12.45872	12.45872

### 5.1 Punto de fundición de materiales.

El PET reciclado se considera en este estudio como el material utilizado para la propuesta de implementación en bovedillas. El valor obtenido difiere en gran medida, siendo este superior a otros valores citados en la literatura de esta investigación. El Naylacero utilizado como material del molde de probetas a tracción presenta 290 °C en su temperatura de fundición. **Tabla 9.**

Tabla 9. Tabla de fundición de PET reciclado y Naylacero

	Punto de Fundición (°C)
<b>PET reciclado</b>	<b>325</b>
<b>Naylacero.</b>	<b>290</b>

## 5.2 Peso específico del PET

Gracias a las dimensiones de las probetas de compresión fue posible calcular el volumen de cada una de ellas, y gracias a una báscula WMF Profile Select® fue posible calcular el peso de cada una de ellas. **Figura 44.** Siendo así se procedió a dividir el peso en kg entre el volumen en  $m^3$  para cada una de las muestras y se obtuvo la Tabla 10 y un promedio de  $1253.19 \text{ kg}/m^3$ .



Figura 44. Determinación del peso de las probetas de compresión en una báscula WMF profile select®

Tabla 10. Determinación del peso específico de cada muestra y su promedio

Muestra	Volumen (m3)	Peso (KG)	Peso especifico (KG/M3)	
M1	05	2.5741E-	0.033	1282.01
M2	05	2.5146E-	0.033	1312.35
M3	05	2.6285E-	0.033	1255.47
M4	05	2.7519E-	0.033	1199.17
M5	05	2.7117E-	0.033	1216.96
				<b><u>1253.19</u></b>

### 5.3 Pigmentación

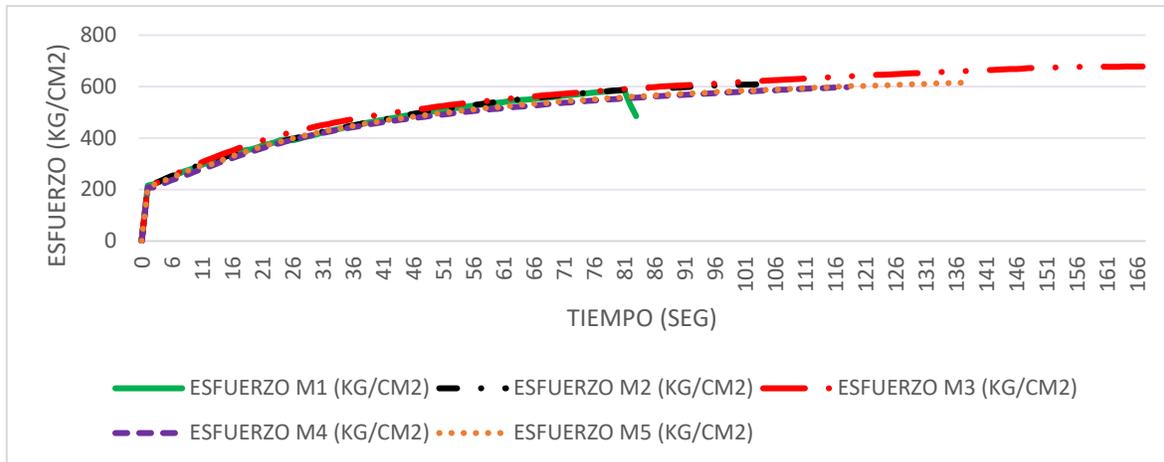
El resultado de la pigmentación no fue medido con algún aspecto científico, sin embargo, es indispensable hacer notar que el material PET fundido de diferentes colores adquiere una vista desagradable a la vista en comparación con el PET virgen o PET reciclado. Sin embargo, el PET reciclado transparente también muestra una vista desagradable al fundirse, ya que estos materiales ya han sido manufacturados y utilizados antes, lo que deja notar que después de haberse procesado una vez el material virgen es casi imposible tratar de conseguir una pigmentación transparente en su totalidad para la vista en reciclajes posteriores.

#### 5.4 Resistencia a la compresión.

El promedio de la resistencia a la compresión de PET reciclado colado fue de  $618.63 \text{ kg/cm}^2$ . Los resultados de cada prueba se describen en la **Tabla 11**, y la representación gráfica de Esfuerzo  $\text{kg/cm}^2$  – Tiempo (seg), se muestra en la **Grafica 2**, y se observa que el material muestra con esfuerzo lineal hasta los  $200 \text{ kg/cm}^2$ .

Tabla 11. Resultados de pruebas a compresión de muestras de PET reciclado colado.

Muestra	R. Compresión (KG/CM2)	Vel. (kg/cm2/s)
M1	586.49	2.5
M2	610.17	2.5
M3	680.22	1.25
M4	599.21	1
M5	617.08	1
	<b><u>618.634</u></b>	



Gráfica 2. Representación gráfica de la relación esfuerzo tiempo de las muestras a compresión de PET reciclado colado

### 5.5 Resistencia a la tracción

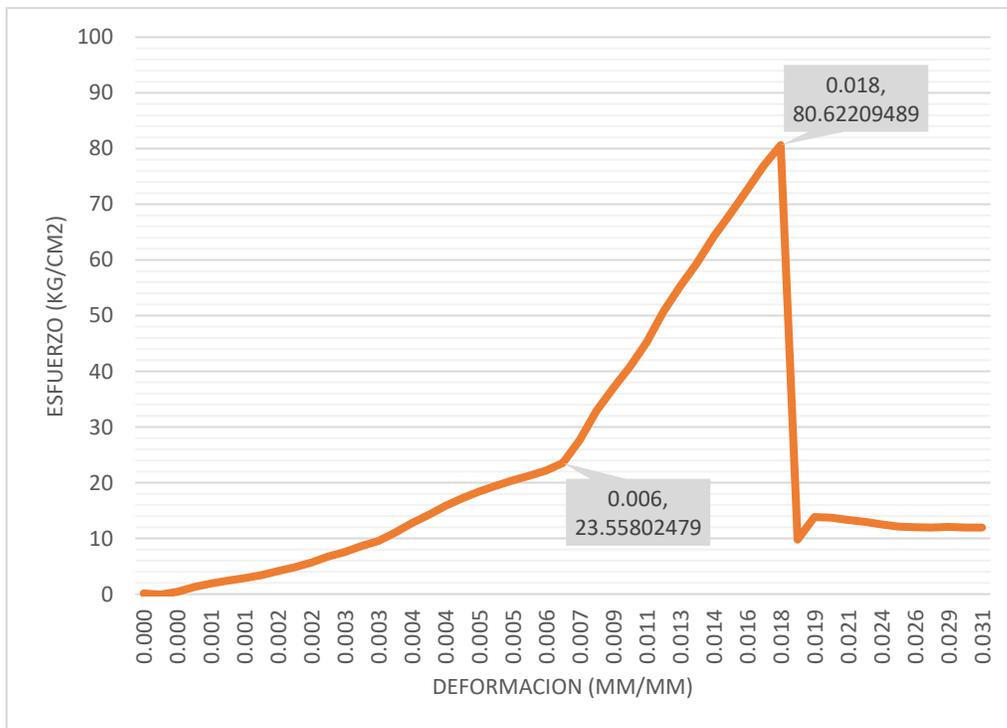
Se obtuvieron los resultados de 3 muestras de PET reciclado colado para probetas de tracción, el promedio de estas resistencias es de 9.598 MPa ( $98.87 \text{ kg/cm}^2$ )

En la **Gráfica 3**, **Gráfica 4**, **Gráfica 5** se pudo observar que el material no se comporta de manera elástica, sin embargo, se consideraron puntos clave de diseño que pueden servir para estudios posteriores, estos puntos se diferencian entre las gráficas por cambiar repentinamente la relación Esfuerzo – Deformación.

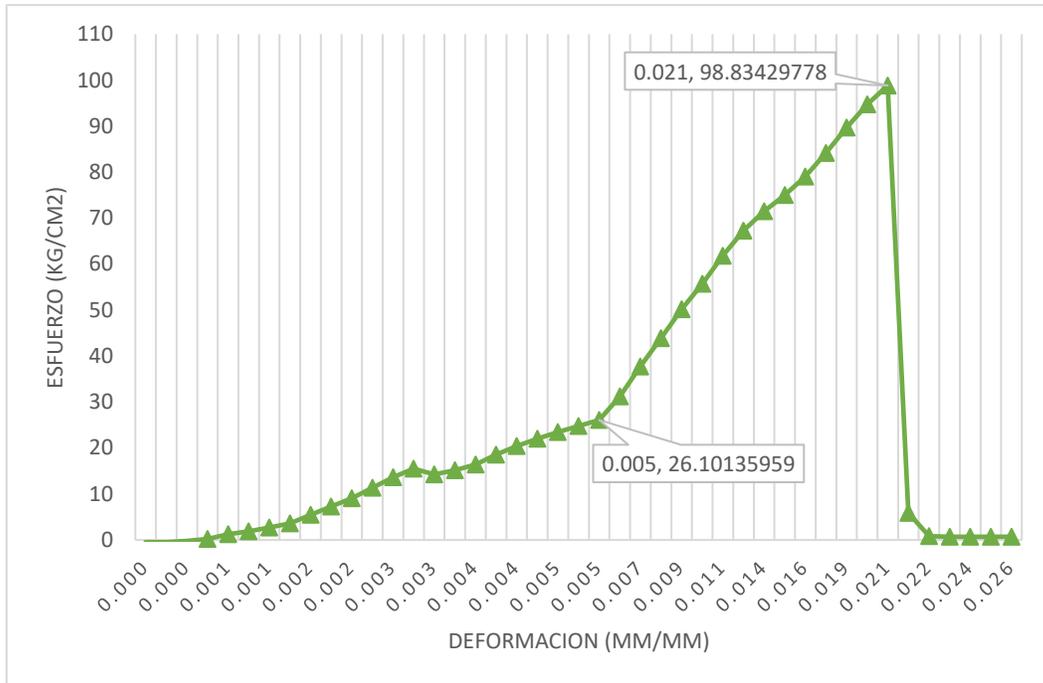
El “MODULO calc” se refiere a él modulo calculado donde la pendiente para cada grafica es mayor. En la **Tabla 12** se observa el promedio de los módulos obtenidos, así también como los esfuerzos máximos y deformaciones máximas para cada probeta.

Tabla 12. Resumen de resultados de las pruebas de tracción de PET reciclado colado.

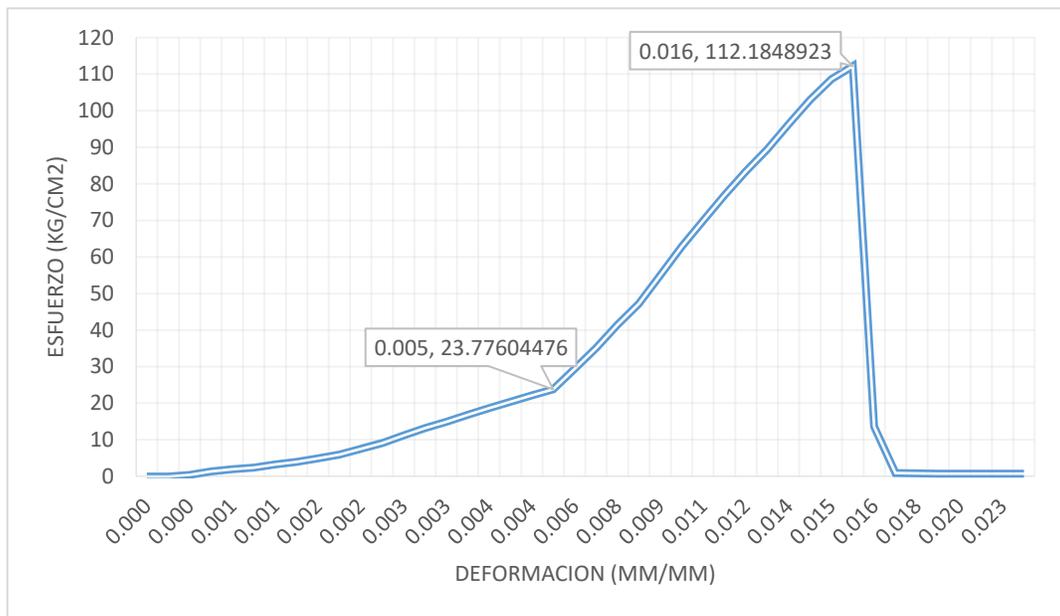
Probeta	Área (MM2)	Long. (MM)	Desp. Max (MM)	Carga Max. (KN)	Tensión Max (MPA)	Deformación Max. (MM/MM)	Modulo calc. (MPA)
T1	<u>64.53</u>	50.00	0.88	0.5103	7.911	0.0173	475.486014
T2	<u>64.85</u>	49.00	1.0564	0.6319	9.762	0.021128	563.7068527
T3	<u>60.89</u>	50.00	0.8	0.6773	11.12	0.0157	693.5554532
PROMEDIO					<u>9.598</u>		<u>577.583</u>



Gráfica 3. Gráfica esfuerzo deformación de probeta T1 elaborada de PET reciclado colado, con puntos clave de diseño



Grafica 5. Grafica esfuerzo deformación de la probeta T2 elaborada con PET reciclado colado, con puntos clave de diseño.



Grafica 4. Grafica esfuerzo deformación de probeta T3 elaborada con PET reciclado colado, con puntos clave de diseño

## 5.6 Modulo Esfuerzo – Deformación

El material no se comporta de manera elástica, sin embargo, para cuestiones de diseño es importante tomar en cuenta dos puntos en las gráficas. Estos dos valores se encuentran en las gráficas donde la curva cambia de forma rápida la relación Esfuerzo – Deformación. En la siguiente **Tabla 13** se muestran estos valores para los tres ensayos y el promedio de esos valores.

Tabla 13. Promedio de los puntos de diseño *más* importantes de las gráficas esfuerzo deformación

Muestra	Punto de diseño 1		Punto de diseño 2	
	$\Delta$	$\sigma$ (KG/CM <sup>2</sup> )	$\Delta$	$\sigma$ (KG/CM <sup>2</sup> )
T1	0.006	23.558	0.018	80.622
T2	0.005	26.101	0.021	98.834
T3	0.005	23.776	0.016	112.185
PROM.	<b>0.005</b>	<b>24.478</b>	<b>0.018</b>	<b>97.214</b>

Tomando en cuenta el promedio de las tres muestras es posible obtener dos módulos. **Tabla 14**. El primero considerando el punto de diseño 1 en el cual se sabe que a su respectiva deformación máxima de 0.0005 el material no fractura, y con el punto de diseño 2 una deformación de 0.018 se sabe que si se diseña con este valor entonces se llegara a la fractura del material.

Tabla 14. Modulo promedio de las gráficas esfuerzo deformación para los puntos de diseño 1 y 2

	<b>Deformación Max.</b>	<b>σ (KG/CM2)</b>	<b>Modulo (KG/CM2)</b>	<b>Modulo (MPa)</b>
<b>Punto de diseño 1 (Primer esfuerzo)</b>	0.005	24.478	4556.113	446.955
<b>Punto de diseño 2 (Fractura)</b>	0.018	97.214	5339.069	523.763

Sin embargo, el módulo considerado para la implementación en el modelo fue el promedio de los valores máximos de la pendiente Esfuerzo – Deformación de los resultados de cada prueba. Siendo este de 577.58 MPa.

## **6. Discusión**

### **6.1 Pigmentación.**

La pigmentación tan desagradable del PET reciclado para la vista es resultado de la manufacturación pasada del material, ya que este material presenta contaminación por el medio con el que interactúa al ser utilizado.

### **6.2 Resistencia y Modulo de elasticidad**

La resistencia a la compresión es muy buena, sin embargo, la resistencia a la tensión no es muy favorable, debido a que el proceso de elaboración del material fundido no es totalmente controlado con el proceso denominado como “Colado de polímeros”, aquí influye mucho la temperatura ambiente en donde se trabaja, y las propiedades térmicas del molde, ya que las propiedades mecánicas del PET reciclado influyen mucho en la velocidad a la que se enfría después del colado. A

diferencia, el proceso de extrucción es más óptimo para procesos industriales de objetos comunes.

Por otro lado, el mismo proceso de colado es responsable de que no se logre totalmente un material sin porosidad, también influye la temperatura y el tiempo que se deje fundiendo el material, ya que un tiempo prolongado genera burbujas que no permiten que el material fundido este totalmente liquido a la hora del colado. Con la metodología descrita en este trabajo se consiguió que no se formaran muchas burbujas en el material, aunque solo quedo controlado por el tiempo de fundición.

La resistencia a la tensión tan baja es resultado que en la sección de las probetas no se tenga un material totalmente continuo, ya que se descubrió que cuando se fracturaron las probetas están presentaban pequeñas discontinuidades por burbujas.

## **7. Conclusión**

Para este trabajo no solo se debe tener en cuenta las propiedades físicas y mecánicas del material, también se toma en cuenta los procesos de fabricación, su apariencia, costo y medio de transporte, así mismo se podrá dar el visto bueno para un óptimo diseño utilizando herramientas tecnológicas que nos ayuden al cálculo de los esfuerzos a determinar, buscando la factibilidad optima en la creación de los modelos propuestos mediante software de esta manera poder tomar una decisión de cuál es la mejor opción en los modelados. De tal forma que no omitamos los parámetros que nos rige nuestra norma.

Debido al resultado obtenido que propone el software, encontramos la sección de este un poco irregular, por lo cual no se considera que sea una opción ideal por cuestiones de producción, centro de gravedad y transporte. Como la figura no es simétrica los moldes pueden elevar el costo lo mismo puede suceder con el transporte puesto que para ello puede ocurrir una fractura en el material, provocando que el material no llegue en óptimas condiciones.

Se tiene en cuenta el punto de fusión del PET reciclado es de 325°C. Para un estado totalmente líquido y presenta una pigmentación no adecuada para objetos que requieran un buen aspecto visual, al menos que tengan un proceso de pigmentación especial. Por lo cual sería indispensable implementar el PET reciclado sin ningún tratamiento especial para pigmentar.

Conocemos que el peso específico del PET reciclado en un proceso por colada, y este es menor que el del concreto ligero. De la misma manera conocemos que la resistencia a la compresión es mayor a la del concreto ordinario

Con respecto al módulo de elasticidad no existe por el proceso de fundición y colada sin control de enfriamiento y modulo obtenido a tracción considera la relación más grande existente entre el esfuerzo deformación es muy bajo por el proceso de colada.

Para dar una evaluación a la resistencia se realiza mediante el proceso de fundición y colado de materiales, pero si es capaz de soportar las cargas axiales de tracción y compresión bastantes altas a las solicitadas por la bovedilla con dimensiones y cargas dadas, por lo tanto, podemos decir que se puede reducir el

espesor de la bovedilla esto nos conllevará a que su peso disminuya y por ende el peso de la losa también reducirá.

Analizando los resultados que propone el software, se encuentra que la sección es un tanto irregular, por ende, no se considera que sea opcional para cuestiones de producción, centro de gravedad y transporte. Por no ser una figura simétrica los moldes podrían elevar el costo al mismo tiempo que siendo elementos considerados una carga para una estructura lo ideal es que su peso se distribuya de una forma uniforme, en cuestiones al modo de transporte podría llegar a fracturarse provocando que el material no llegue en condiciones ideales.

## **8.- Recomendaciones.**

Hoy en día en la construcción se busca un ahorro energético, prevención del ruido y la protección del medio ambiente, buscando tener un bajo costo en dicha propuesta y estudiando las propiedades mecánicas del material PET, por ello si la importancia de estudiar las ventajas y desventajas que tendría la elaboración de la vigueta y bovedilla en dicho material.

### **8.1 Pruebas mecánicas**

A primera instancia se consideró que la bovedilla trabaja más a flexión, y de esto resulta que el principal enfoque de esta investigación fuera el descubrir esfuerzos de compresión y de tracción máximos, pero a pesar de esto, para tener un estudio más especializado se deben de considerar pruebas por esfuerzos cortantes en el material de estudio, además de la deformación el coeficiente de Poisson para el material.

## **8.2 Pruebas por temperatura.**

Para un cumplimiento adecuado de las normas NMX-C-406-ONNCCE-2014, se dice que la bovedilla que presente un material susceptible al calor, esta debe ser cubierta por otro material que no presente dicha susceptibilidad. Sin embargo, es recomendable hacer estudios de dilatación térmica del material, además también conocer la temperatura a la cual el material de la bovedilla pierde sus propiedades mecánicas más importantes. Otro factor que se debe considerar para estudios posteriores es el conocer si este material es auto extingible y conocer la temperatura a la cual este material produce flama.

## **8.3 Rugosidad.**

Es necesario hacer un estudio de rugosidad para conocer que materiales son perfectamente adheribles a la bovedilla de material PET reciclado, y de igual manera conocer que si es factible recubrir estos elementos con materiales de construcción, como es el Yeso o el Mortero.

## Referencias

Gilberto A. Perdomo M. (Abril 2002). Plásticos y medio ambiente. Obtenido de: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/abr/perdomo.pdf>

Gaggino, Rosana. (agosto, 2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos aptos para la autoconstrucción. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/pdf/258/25806306.pdf>

Silva, J. Losas prefabricadas. Obtenido de: [http://www.smie.org.mx/SMIE\\_Articulos/si/si\\_08/te\\_01/ar\\_11.pdf](http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/si/si_08/te_01/ar_11.pdf)

IMCYC. (Febrero 2016). Lozas prefabricadas de concreto. Obtenido de: <http://imcyc.com/revistacyt/pdf/febrero2016/problemas.pdf>

Cristán Frías, Arturo; Ize, Irina; Gavilán, Arturo. (Octubre-Diciembre, 2003). La situación de los envases de plástico en México. Obtenido de: <http://www.redalyc.org/pdf/539/53906905.pdf>

Sánchez, Iris. (dic. 2014). Uso del plástico reciclado en el hormigón. Una alternativa para reducir la huella ecológica. Obtenido de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-915X2014000300003&lang=es](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2014000300003&lang=es)

Soto, H. E. (2009). "La aplicación de geosintéticos a terraplenes". Grado De Tesis: Maestro En Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma De México. Posgrado De Ingeniería De La UNAM. Obtenido de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2974/sotoislas.pdf?sequence=1>

TIGRE S.A. (Febrero, 2016). Línea Polietileno Alta Densidad Para Conducción Agua Potable Y Riego. Obtenido de: <https://www.tigre.com.bo/themes/tigre2016/downloads/catalogos-tecnicos/bolivia/catalogo-pead.pdf>

Minor, O. (2014). Consideraciones sobre la metodología propuesta por las normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones para el distrito federal 2004 para el análisis y diseño de losas planas aligeradas. Tesina por el grado de Especialista en Estructuras. Universidad Nacional Autónoma De México. MÉXICO D. F. Obtenido de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6926/Tesina.pdf?sequence=1>

Novas, J. (2010). Sistemas Constructivos Prefabricados Aplicables a la Construcción de Edificaciones en Países en Desarrollo. Proyecto Fin de Master. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. Obtenido de: [http://oa.upm.es/4514/1/TESIS\\_MASTER\\_JOEL\\_NOVAS\\_CABRERA.pdf](http://oa.upm.es/4514/1/TESIS_MASTER_JOEL_NOVAS_CABRERA.pdf)

ONNCCE, S. C. (2010). Industria de la construcción – bovedilla de poliestireno expandido para losas de entrepisos y azotea de concreto a base de viguetas prefabricadas-especificaciones y métodos de ensayo (PROY-NMX-C-463-ONNCCE-2009).

Sánchez, V. (2014). Cuantificación de bolsas de plástico en residuos sólidos urbanos. Universidad Autónoma Metropolitana. Azcapotzalco. Obtenido de :

[http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec\\_Sust/Cuantificacin-de-bolsas-de-plstico-en-integracin---Snchez-Glz.---Reporte.pdf](http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Cuantificacin-de-bolsas-de-plstico-en-integracin---Snchez-Glz.---Reporte.pdf)

Ávila. Carlos;(2001). Cristalización no-isotérmica y comportamiento en la fusión de copolímeros al azar de p(et/ct). Tesis-Doctorado en Polímeros. Saltillo, Coahuila.

CASTILLO. FELIPE; (2012). conformado de materiales plásticos. universidad nacional autónoma de México. Cuautitlán Izcalli.

C. Ibeh Christopher; (2011). Thermoplastic Materials. CRC Press. Taylor & Francis Group, LLC.

Cornement. F;(2006). Comportamiento térmico y mecánico de mezclas de PC/PET con altos contenidos de PC. Trabajo final de carrera. Universidad Politécnica de Catalunya.

Coreño. J, Méndez. M; (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. rea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.

Días. F;(2012). Conformado de Materiales Plásticos. Universidad Autónoma de México. Cuautitlán Izcalli.

González. D;(2018). Congreso Interdisciplinario de Ingenierías. Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Misantla, Veracruz, México.

González. M; (2017). Análisis de fractura en ensayos de compresión para materiales compuestos utilizando pruebas ópticas no destructivas. Centro de investigaciones en óptica. León, Guanajuato, México.

Hibbeler. R;(2011). MECÁNICA DE MATERIALES. PEARSON EDUCACIÓN. Octava edición. México.

ONNCCE;(2014). “NMX-C-406-ONNCCE-2014 Componentes para sistemas de losas prefabricadas de concreto – especificaciones y métodos de ensayo”

Ortiz. Laura; (2002). Efecto de la cristalización dinámica en la rugosidad del PET. Tesis en Opción de Grado de Maestro. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Toledo. I, Toledo. A, Vázquez. A, Santana. V, Flores. A, (2013). Reciclaje y utilización de Termoplásticos. Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero. Iguala-Guerrero, México.

<https://www.gcc.com/wp-content/uploads/2020/08/FTBCC0817->

[Bovedilla.pdf](#)

[http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/cworks/c\\_simp\\_method\\_topology.htm](http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm)

[https://www.solidworks.es/sw/docs/SIM\\_Optimization\\_WP\\_ESP.pdf](https://www.solidworks.es/sw/docs/SIM_Optimization_WP_ESP.pdf)

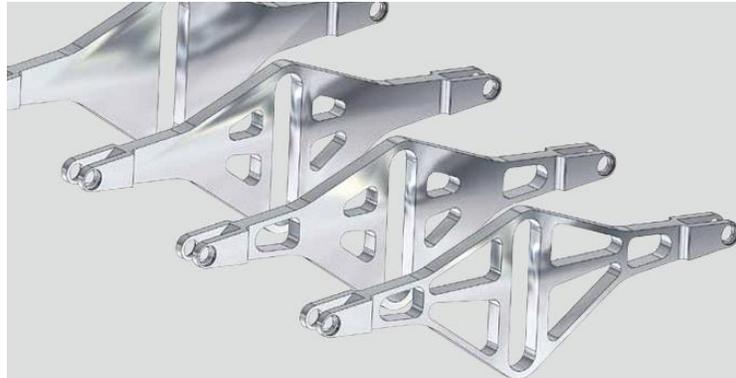
<http://www.viprocosa.com/portfolio/vigueta-y-bovedilla/>

<http://imcyc.com/revistacyt/pdf/febrero2016/problemas.pdf>

## Anexos

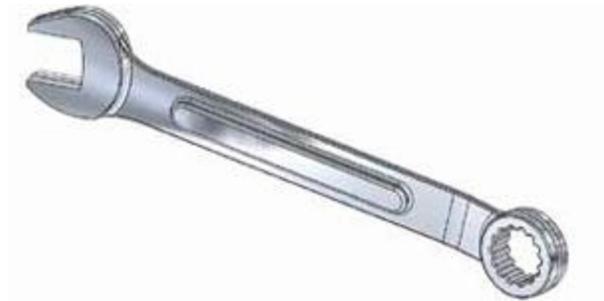
### Optimización de solidworks

Optimizar consiste en determinar el peso, la tensión, el coste, la desviación las frecuencias naturales y los factores de temperatura, que dependen de variables como las dimensiones, las cargas y restricciones, los materiales y los requisitos de fabricación. El reto radica en que apenas conocemos estos factores en las fases previas del proceso de diseño.



Optimización para los ingenieros de diseño la optimización del diseño puede incrementar el valor de un producto mejorando su rendimiento en su entorno operativo y reduciendo el coste de producción mediante la reducción de la cantidad de material utilizado para fabricarlo. El ingeniero de diseño está, por definición, a la vanguardia del desarrollo de productos. Actualmente, dicho ingeniero ya está familiarizado con el análisis de diseño, lo que significa que dispone de los conocimientos básicos necesarios para llevar a cabo la optimización y sólo necesita herramientas de optimización para dar el siguiente paso. Al utilizar la optimización, el ingeniero de diseño incrementará sus conocimientos acerca del comportamiento

de su producto y mejorará el diseño, mientras se centra en los datos obtenidos de los análisis realizados previamente.



*Ilustración 1. Llave fija para su optimización*

### Especificaciones de vigueta y bovedilla (Ficha técnica)

#### Descripción:

La bovedilla de concreto es un componente del sistema de losa para entresijos y azoteas que sustituye a los sistemas de losa tradicional (maciza, aligerada, etc.). Este sistema cuenta con las ventajas de ser más rápido, sencillo, ecológico y económico

#### Usos y aplicaciones:

La bovedilla de concreto es ampliamente usada en la industria de la construcción en losas estructurales para entresijos y azoteas para viviendas en serie, residenciales, locales comerciales, hoteles, etc.

#### Propiedades físicas:

##### Vigueta pretensada:

Concreto  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$

Alambres de presfuerzo de 4 y 5 mm  
Peralte de 13 cm y patín de 11.5 cm  
Peso de 22.5 kg/m aprox.

##### Capa de compresión:

Concreto de  $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$

Refuerzo con malla electrosoldada 6-6,  
10-10

##### Bovedilla:

Concreto resistente para trabajar sin cimbra.

Peso por pieza de 18.5 - 19.5 kg

## Ventajas:

El utilizar el sistema de viga pretensada con la bovedilla de concreto brinda una serie de ventajas como las que se mencionan:

Mayor calidad al tener un mejor control en planta de fabricación. -Eliminación de la cimbra de contacto utilizando puntales con viga transversal. -Rapidez en la construcción. -Mayor seguridad de trabajo en comparación al poliestireno. - Mayor limpieza en la obra. -Reducción de riesgo por incendio. -Menor afectación en rendimientos por climas fríos.

Recomendaciones para el almacenamiento:

El lugar para recepción y almacenamiento en obra de la bovedilla de concreto debe ser amplio, tener fácil acceso tanto desde el exterior como desde las edificaciones y tener un piso firme, limpio y nivelado. Cuando se maneje la bovedilla individualmente, se recomienda que las estibas no superen una altura de 1.6 m y se hagan trabados en dos sentidos horizontales para evitar

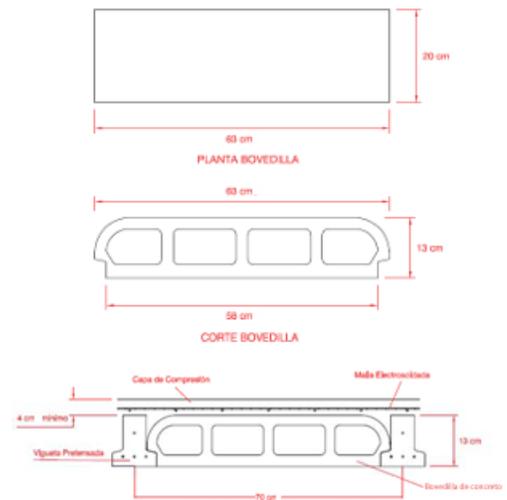


## Normas y especificaciones aplicables:

Las especificaciones y propiedades de este producto no son limitativas, si requiere de alguna característica especial favor de ponerse en contacto con Asistencia Técnica para obtener la ayuda y asesoría correspondiente

Concepto	Norma Mexicana
Cemento Pórtland	NMX-C-414-ONNCCE-2014
Agregados	NMX-C-111-ONNCCE-2014
Agua	NMX-C-122-ONNCCE-2004
Aditivos	NMX-C-255-ONNCCE-2013
Prueba de Bovedilla	NMX-C-406-ONNCCE-2014

### Presentaciones



La norma NMX-C-406-ONNCCE-2014, establece las especificaciones mínimas en el uso de sistemas prefabricados de concreto como vigueta y bovedilla y similares.

El campo de aplicación se extiende a sistemas de vigueta y bovedilla, en donde se incluyen los componentes prefabricados para losas, como las placas y las viguetas de alma abierta y similares; quedando fuera de esta norma las viguetas metálicas y de madera.

Se indican las especificaciones mínimas de los materiales utilizados para los elementos portantes (viguetas) y para los elementos aligerantes (bovedillas), así como para el concreto colado en obra.

También, se establecen el tamaño máximo del agregado del firme de concreto armado, las cargas mínimas sobre el firme de concreto, y las longitudes mínimas de apoyos y peraltes mínimos recomendados para el sistema. Asimismo, se establecen los espesores mínimos del firme de concreto armado conforme a la longitud del claro.

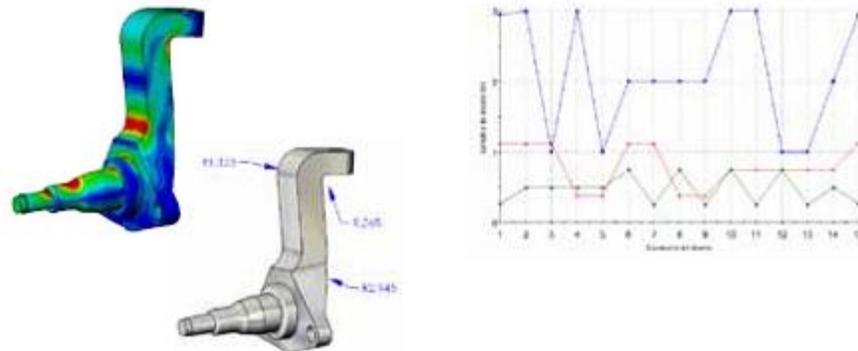
Con fines de certificación se indican los procedimientos de muestreo y ensaye a los componentes portantes y aligerantes del sistema. A la norma la acompaña un anexo técnico en donde se describen en forma detallada aspectos técnicos del sistema y de los ensayos de laboratorio.

CLAVE O CDIGO	TTULO DE LA NORMA
NMX-C-406-ONNCCE-2014	INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIN-COMPONENTES PARA SISTEMAS DE LOSAS PREFABRICADAS DE CONCRETOâESPECIFICACIONES Y MTODOS DE ENSAYO. (CANCELA A LA NMX-C-406-1997-ONNCCE).
<b>Objetivo y campo de aplicación</b>	
Esta norma mexicana establece las especificaciones y métodos de ensayo que deben cumplir los componentes prefabricados que se utilizan para la construcción de todo tipo de sistemas de losas de concreto para toda clase de edificaciones.	
Esta norma mexicana es aplicable a los componentes prefabricados de concreto y elementos aligerantes de cemento arena y poliestireno para losa; tales como vigas tubulares, placas alveolares, bandas, placas, viguetas pretensadas y similares. (Se excluyen viguetas de cualquier otro material).	
<b>Concordancia con Normas Internacionales</b>	
Esta norma mexicana no coincide con ninguna norma internacional por no existir alguna al momento de su elaboración.	

## Optimización con SolidWorks

SolidWorks Simulation utiliza un método de optimización basado en doE. para ejecutar un problema, el ingeniero proporciona los valores máximos y mínimos de sus variables de diseño de cotas y, a continuación, selecciona una optimización “Estándar” o de “Alta calidad”. El método estándar funciona suponiendo que la curva de respuesta objetiva entre los valores límite sea lineal y calcula sólo la respuesta

a estos valores. la optimización de alta calidad tiene en cuenta la posibilidad de una respuesta de segundo orden entre los límites y evalúa un valor medio, así como los extremos. la ilustración 7 muestra las iteraciones de diseño automático realizadas para una suspensión de automóvil en la que el tamaño de los tres redondeos es diferente. En este caso, la restricción del diseño consiste en no superar el límite elástico del material bajo la carga estática.



#### La conexión de CAD y análisis para la optimización

Todo lo mencionado anteriormente se refiere a la optimización mediante FEA y muy a menudo el FEA depende del programa de cAd en el que se haya creado el diseño. El sistema de cAd también es muy importante para la optimización, porque el método de creación de modelos, los esquemas de acotación y las relaciones incrustadas afectan a la capacidad del diseñador para analizar las alternativas de diseño. A medida que el ingeniero crea sus modelos, debe tener en cuenta la acotación que permite modificar las operaciones que anteriormente se beneficiaron de la optimización sin causar errores de reconstrucción en el modelo. para la optimización, la planificación es vital. Un diseñador puede descubrir beneficios en la creación de un modelo de cAd que se va a usar exclusivamente para la optimización y, a continuación, usar la información recopilada en el proceso para realizar un modelo de cAd para la documentación y la producción. la complejidad de la pieza y la estructura deberían guiarle a la hora de seleccionar las operaciones que se van a estudiar