



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO -SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERIAS

“ANÁLISIS TERMOESTRUCTURAL DEL PET RECICLADO
APLICADO A UN CALENTADOR SOLAR ECOLÓGICO”

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ING. DIEGO FERNANDO MESA VARGAS

DIRECTORES:
DR. AGUSTÍN VIDAL LESSO
DR. JORGE ARTURO ALFARO AYALA

SALAMANCA, GTO.

2019

Dedicatoria

A mis padres, Cecilia y Segundo, por sus consejos los cuales siempre acate, por el amor que nunca deje de recibir y por su apoyo que lo hizo todo posible, gracias por cada una de sus palabras de las cuales tanto aprendo.

A mis hermanos que de alguna u otra forma siempre fueron parte de mi motivación, y de la superación que tanto lucimos de buena forma entre nosotros.

A la familia Vargas Salamanca por su apoyo y por su cariño que siempre está presente.

A Daniela Guadalupe Razo Cabrera gracias por su cariño que alegra cada uno de mis días y que me hace sentir en casa, por sus casi siempre acertados consejos, y por la fortaleza que me brinda hasta el día de hoy, y sobre todo gracias por su paciencia.

A la familia Razo Cabrera que me hace sentir parte de una familia sin condición alguna, gracias.

Finalmente, a mis amigos Carlos Baeza, Cristian cruz, Andrés Rodríguez, Diego Puerto, Jorge Benítez, Julet Méndez, Santiago Rincón, Chata y Ruperto y a los que se me escapan, gracias.

Agradecimientos

Al Dr. Agustín Vidal Lesso, por todo su apoyo en sus áreas de conocimiento para la realización y los logros alcanzados en este proyecto.

Al Dr. Jorge Arturo Alfaro Ayala, por el apoyo en el área térmica, y por poder trabajar apoyando la patente del colector solar.

Al CONACYT, por otorgarme la beca para la maestría.

¡A todos muchas gracias!

TABLA DE CONTENIDO

Nomenclatura	VII
Glosario	IX
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XIII
Resumen	XIV
Abstract	XV
Introducción	XVI

CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA..... 1	
1.1	Antecedentes..... 2
1.2	Planteamiento del problema 4
1.3	Justificación..... 5
1.4	Objetivo 6
1.4.1	Objetivos específicos 6
1.5	Impacto 6
1.6	Alcances y limitaciones 7
1.7	Estado del arte 7
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO 9	
2.1	Introducción al concepto de ingeniera mecánica..... 10
2.2	Energía solar 10
2.3	Los plásticos 11
2.3.1	¿Qué son los plásticos? 11
2.3.2	Propiedades de los plásticos 11
2.3.3	Tipos de plásticos..... 12
2.3.4	El tereftalato de polietileno (PET) 12
2.3.5	Aplicaciones de PET..... 14
2.4	Colectores solares 15
2.4.1	Colectores solares de alta temperatura..... 15
2.4.2	Colectores solares de baja temperatura..... 17

2.4.3	Clasificación de los colectores solares según la temperatura alcanzada.	20
2.5	Indagaciones y desarrollos tecnológicos de colectores solares ecológicos.	20
2.5.1	Trabajos e investigaciones acerca de calentadores solares basados en material reciclado.	20
2.5.2	Patentes acerca de calentadores solares basados en material reciclado.	21
2.6	Método de elemento finito (MEF).	22
2.6.1	Breve reseña histórica.	22
2.6.2	Definición del método de elemento finito.	23
2.6.3	Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos	24
2.6.4	Linealidad Vs no linealidad en un análisis de esfuerzo	25
CAPITULO 3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS		27
3.1	¿Por qué y para qué caracterizar un material?	29
3.2	Norma ASTM D-882	30
3.3	Pruebas experimentales	31
3.3.1	Preparación de muestras y aplicación de método según norma.	34
3.4	Realización de pruebas experimentales.	35
3.5	Adquisición y tratamiento de datos.	37
3.6	Selección de modelo constitutivo con validación numérica.	40
3.6.1	Modelos constitutivos.	40
3.6.2	Modelamiento numérico.	41
CAPITULO 4 APLICACIÓN DE MODELO VIRTUAL		47
4.1	Modelo Virtual.	48
4.2	Diseño en el módulo de geometría.	48
4.3	Diseño en el módulo de mallado.	52
4.4	Módulo Transient Thermal.	57
4.5	Módulo Transient Structural.	61
4.5.1	Condiciones de Frontera para el modelo final.	61
4.5.2	Importación de perfiles de temperatura.	63
CAPITULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS		65
5.1	Datos experimentales por lote.	66
5.2	Resultados para lote 1	66
5.3	Resultados para lote 2	71

5.4	Resultados para lote 3.....	73
5.5	Compilación y análisis de resultados.	75
5.6	Programación para el modelo de predicción.	77
5.7	Diseño de propuesta para el colector solar	79
5.7.1	Condiciones de frontera para rediseño del colector solar.	81
5.7.2	Análisis de resultados para el rediseño del colector solar.	82
5.7.3	Modelo de predicción para el modelo de rediseño.	84
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
	FUTUROS TRABAJOS.....	89
	REFERENCIAS	91
	ANEXOS.....	95

Nomenclatura

Símbolo	Significado
PET	Tereftalato de polietileno
MEF	Método de elemento finito
MDF	Método de diferencias finitas
<i>mm</i>	Milímetro
<i>L</i>	Longitud
<i>cm</i>	Centímetro
<i>a</i>	Ancho
K_g	Factor de restricción geométrica
<i>h</i>	Espesor
<i>N</i>	Newton
P_a	Pascal
σ	Esfuerzo
ε	Deformación unitaria
L_i	Longitud inicial
L_T	Longitud total
Δ_t	Intervalo de tiempo
δ	Deformación
L_F	Longitud final
A_{tr}	Área transversal
σ_{ing}	Esfuerzo ingenieril
σ_{real}	Esfuerzo real
ε_{ing}	Deformación unitaria ingenieril
ε_{real}	Deformación unitaria real
<i>F</i>	Fuerza
<i>W</i>	Potencial de energía de deformación
\bar{I}_X	Invariante de deformación

C_{xx}	Constantes de ajuste de modelo constitutivo
d	Parámetro de incompresibilidad del material
J	Función de energía de tensión
CAD	Diseño asistido por ordenador
m^3	Metro cubico
g	Gravedad
ρ	Densidad
R	Vector de residuos
F_n^a	Vector de cargas aplicadas en el subpaso de carga n
F_{n1}^{nr}	Vector de fuerzas obtenidas en el subpaso de carga n iteración i

GLOSARIO

- **Tereftalato de polietileno:** El PET está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET se hace combinando el ácido tereftálico y el etilenglicol.
- **Diseño asistido por ordenador (CAD, computer aided desing):** es cuando se utilizan diferentes programadores gráficos para lograr crear una serie de imágenes que conjuntas crean una imagen más grande (por así decirlo) o más conocida como dibujo. El CAD es también utilizado como un medio de expresión mediante un ordenador y un gestor gráfico; a su vez, se puede decir que también es considerado como una, relativamente nueva técnica de dibujo revolucionaria, con la cual se pueden realizar dibujos y, o planos.
- **Heliostato:** o helióstato es un conjunto de espejos que se mueven sobre dos ejes normalmente en montura altazimutal (altura y azimut), lo que permite, con los movimientos apropiados, mantener el reflejo de los rayos solares que inciden sobre él en todo momento en un punto o pequeña superficie, deshaciendo en el rayo reflejado el movimiento diurno terrestre.
- **Lote:** Conjunto de cosas que tienen características comunes y que se agrupan con un fin determinado.
- **Opacidad:** Un material presenta opacidad cuando no deja pasar luz en proporción apreciable. Es una propiedad óptica de la materia, que tiene diversos grados y propiedades. Se dice, en cambio, que un material es traslúcido cuando deja pasar la luz, pero de manera que las formas se hacen irreconocibles, y que es transparente cuando deja pasar fácilmente la luz.

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Colector solar alta temperatura.	3
Fig. 2 Prototipo colector solar ecológico.	4
Fig. 3 Repuesto de tubos al vacío.	5
Fig. 4 Envases PET	13
Fig. 5 colector solar con botellas PET	15
Fig. 6 Cilindro parabólico (Izq.), Plato parabólico (Der.).	16
Fig. 7 Concentrador solar de cilindro parabólico.	16
Fig. 8 campo de heliostatos.	17
Fig. 9 principio de funcionamiento.	17
Fig. 10 Colector solar plano.	18
Fig. 11 tubos al vacío.	18
Fig. 12 Colector de tubos al vacío.	19
Fig. 13 Efecto de termosifón.	19
Fig. 14 proceso de discretización.	24
Fig. 15 discretización aplicada.	24
Fig. 16 Ejemplos de no linealidades: (a) geometría (b) material (c) contacto.	26
Fig. 17 Prueba uniaxial.	29
Fig. 18 Test de tensión biaxial.	30
Fig. 19 Lotes de botellas (Izq.), Envase de prueba. (Der.).	31
Fig. 20 Estructura.	32
Fig. 21 Sujeción de los envases.	32
Fig. 22 Orientación de envases.	33
Fig. 23 Orientación de la estructura.	34
Fig. 24 Probeta.	35
Fig. 25 Instron 8872	36
Fig. 26 Sujeción mecánica.	36
Fig. 27 Resultados de fuerza vs desplazamiento para las 5 muestras y promedio.	38
Fig. 28 Esfuerzo vs Deformación (real vs ingenieril)	39
Fig. 29 Algunos modelos matemáticos basados en las invariantes de la deformación.	41
Fig. 30 Esfuerzo vs deformación.	41
Fig. 31 Esfuerzo vs Deformación	42
Fig. 32 Modelo Mooney- Rivlin	42
Fig. 33 Geometría del modelo de validación. (90x20x0.27 mm)	43
Fig. 34 Análisis de sensibilidad de malla.	43
Fig. 35 Condiciones de frontera.	44
Fig. 36 Comparación de modelo vs datos experimentales.	44
Fig. 37 Error Vs desplazamiento.	45
Fig. 38 envase de Coca-Cola®.	48
Fig. 39 Revolución de sólido.	49
Fig. 40 Base el envase.	49
Fig. 41 Superficie con corte en plano xy.	50

Fig. 42 Superficie con corte en plano xz.	50
Fig. 43 Design modeler.	51
Fig. 44 Operaciones en DesingModeler.	52
Fig. 45 Shell 131.	53
Fig. 46 Solid 87.	53
Fig. 47 Conta174.	54
Fig. 48 Targe170.	55
Fig. 49 Mallado general.	55
Fig. 50 Mallado parte superior.	56
Fig. 51 Mallado parte media (sup.) base (inf.)	56
Fig. 52 Calidad de elementos average (84.57 %).	57
Fig. 53 FLIR E5 thermal camera.	58
Fig. 54 Tomas aleatorias de temperatura [5].	58
Fig. 55 Envase dividido simétricamente.	59
Fig. 56 Analysis Settings.	59
Fig. 57 Perfil de temperatura externo cara superior.	60
Fig. 58 Perfiles de temperatura a través un día.	60
Fig. 59 Acoplamiento en una vía (One-way coupling).	61
Fig. 60 Soporte fijo (Fixed support).	62
Fig. 61 Detalles de la presión hidrostática.	62
Fig. 62 Perfil de presiones hidrostáticas.	63
Fig. 63 Imported Load.	63
Fig. 64 Fuerza importada (1 de 4).	64
Fig. 65 resultados módulo de elasticidad.	66
Fig. 66 Curva de iteración (Desplazamiento).	67
Fig. 67 Curva de iteración (Fuerza).	68
Fig. 68 Distribución de esfuerzos de Von Mises para lote 1, [Pa] [5.4 Autoscale].	69
Fig. 69 Distribución de esfuerzos de Von Mises para lote 1, zona de máximo valor, [Pa] [Autoscale].	69
Fig. 70 Desplazamiento total del envase lote 1. [m] [5.4 Autoscale].	70
Fig. 71 Deformación unitaria. [mm] [Autoscale 5.4].	71
Fig. 72 Deformación unitaria área de valor máximo. [mm] [Autoscale 5.4].	71
Fig. 73 Esfuerzo de Von Mises máximo para lote 2. [Pa].	72
Fig. 74 Deformación unitaria para lote 2. [mm].	72
Fig. 75 Deformación total lote 2, corte en el eje medio. [m] [Autoscale 5.4].	73
Fig. 76 Esfuerzos de Von Mises para lote 3. [Pa].	73
Fig. 77 Deformación unitaria para lote 3. [mm].	74
Fig. 78 Deformación total para lote 3. [m].	74
Fig. 79 Curva correspondientes a ensayos de tracción para un material frágil y otro dúctil.	76
Fig. 80 Curva esfuerzo vs Deformación para lote 3 (zona plástica).	76
Fig. 81 Proceso iterativo del Software Table curve 2D.	78
Fig. 82 Ecuación de predicción.	78

Fig. 83 Curva de predicción.	79
Fig. 84 Diseño del soporte.	80
Fig. 85 Soporte fijo 2.	81
Fig. 86 Esfuerzo de Von Mises para botella con soporte. [Pa].	82
Fig. 87 Deformación unitaria para envase con soporte. [m/m].	83
Fig. 88 Deformación total para envase con soporte. [m].	83
Fig. 89 Grafica de predicción para el rediseño.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los colectores solares.	20
Tabla 2 Resultados de datos para prueba 1.....	37
Tabla 3 Esfuerzo máximos y desplazamientos obtenidos (Valores máximos).	75
Tabla 4 Materiales de estructura.....	80
Tabla 5 Porcentaje de disminución de efectos.....	84

RESUMEN

En esta tesis se realizó una investigación con el fin de plantear una metodología para el análisis termo-estructural del tereftalato de polietileno (PET) reciclado, a través de un análisis de simulaciones numéricas apoyadas en el software Ansys®, el fin de estos análisis es predecir el comportamiento del PET bajo condiciones climáticas y estructurales, ya que el material es utilizado en el diseño de colectores solares ecológicos, los cuales manejan rangos de temperaturas desde los 10° C hasta los 60° C normalmente, (existen variedad de modelos de colectores solares los cuales manejan rangos de temperaturas más amplios o por lo contrario más pequeños), adicionalmente se tienen cargas estructurales como es el peso del agua contenido por las botellas de PET utilizadas en el colector solar, finalmente esta tesis logró obtener un modelo de predicción del comportamiento del material y posteriormente de las botellas utilizadas en el modelo de recolección de energía solar, para así concluir un tiempo de operación de las mismas.

ABSTRACT

In this thesis a research was carried out in order to propose a methodology for the thermo-structural analysis of PET (recycled polyethylene terephthalate), through an analysis of numerical simulations supported by Ansys® software, the purpose of these analyzes is predict the behavior of PET under climatic and structural conditions, since the material is used in the design of ecological solar collectors, which handle temperature ranges from 10°C to 60°C normally, (there are a variety of collector models solar which handle wider temperature ranges or otherwise smaller), additionally have structural loads such as the weight of water contained by the PET bottles used in the solar collector, finally this thesis I get an idea of the behavior of the material and later of the bottles used in the solar energy collection model, to conclude go time of operation of them.

INTRODUCCIÓN

El proyecto “Análisis termo-estructural del PET reciclado aplicado a un calentador solar ecológico”, fue desarrollado con el fin de apoyar el avance de las energías renovables, ya que se ha visto que a través de los años el impacto ambiental producido por las energías no renovables ha ido incrementando de una manera significativa, es tanto así que la fauna y flora en algunos países se ha visto afectada directamente, según algunas estadísticas el consumo de energías para el año 2014 a nivel mundial es liderado por el petróleo y derivados con un 32.6% mientras que las energías renovables solo comprende un 2.5% entre otras (gas 23.7%, carbón 30%, nuclear 4.4% hidroeléctrica 6.8%), en contraste se tiene que para el año 2015 el petróleo y sus derivados aumento a 32.9% y las energías renovables a un 2.8%, este pequeño incremento hace referencia a que si se han estado desarrollando estas energías ecológicas pero hace falta bastante trabajo para que en un futuro llegara a superar los altos porcentajes de los combustibles y energías fósiles.

Con base a lo anteriormente dicho se ha vuelto prioridad desarrollar ideas con el fin de apoyar este tipo de energías ecológicas, esta investigación está dirigida a la mejora de un colector solar ecológico, el cual busca utilizar en su estructura botellas recicladas de tereftalato de polietileno (PET) las cuales se cambian como si fuesen focos, luego de que su tiempo de vida haya terminado, siendo las botellas una parte fundamental para el colector ya que son estas las que están expuestas a las condiciones climáticas (24/7), una vez expuesta las botellas luego de un determinado tiempo el plástico se cristalizará por las condiciones térmicas, luego de esto vendrá una falla del material y la eficiencia del colector claramente se verá afectada.

El primer capítulo hace referencia a la información encontrada con la cual se dio un punto de partida y uno de llegada para así delimitar los alcances de esta investigación, así mismo en este capítulo se describe la revisión bibliográfica realizada, tanto de artículos científicos sobre calentadores solares, análisis y caracterización de materiales, como de patentes relacionadas.

En el segundo capítulo luego de analizar la información bibliográfica se procede a proponer la teoría que se utilizara en el desarrollo de esta investigación, adicionalmente se contextualizara al lector con el fin de que entienda las bases que esta investigación está utilizando para su desarrollo.

Finalizado el capítulo anterior, pasaremos a desarrollar el proceso de caracterización para el PET reciclado donde será necesario someter el material a condiciones climáticas para ver cómo están variando sus propiedades mecánicas según el tiempo de exposición, este proceso parte desde la normatividad dada por la ASTM D882 la cual rige los parámetro dimensionales, cantidad de probetas, velocidades de prueba, etc. Luego de seguir un riguroso proceso en la preparación y obtención de los resultados, se determinó y caracterizó el modelo numérico del material, lo cual permitirá pasar a la última etapa del proyecto

donde se propondrá un modelo de elemento finito para el análisis fluido-estructura de las botellas utilizadas en el colector solar, finalmente con el cual se validen los resultados.

CAPÍTULO 1

A través de este capítulo se busca contextualizar al lector a cerca de la problemática que envuelve a la tecnología de los colectores solares, sus avances y la razón del porque está siendo esta tecnología de primera para ciertas aplicaciones, de igual forma se hablará de como la contaminación está influyendo en la salud de la gente y su impacto a nivel ambiental.

Para el desarrollo de este capítulo también hablaremos de información en la cual se basó esta tesis para su desarrollo, y de la revisión bibliográfica incluida para el desarrollo de la misma.

MARCO DE REFERENCIA

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Planteamiento del problema
- 1.3 Justificación
- 1.4 Objetivo
- 1.5 Impacto
- 1.6 Alcances y limitaciones
- 1.7 Estado del arte

Capítulo 1
Marco de referencia

1.1 Antecedentes

El desarrollo de las tecnologías, en la última década, ha dado un impulso notable al consumo de las energías fósiles, estas son las que proceden de la biomasa obtenida hace millones de años y que han sufrido grandes y rigurosos procesos hasta la formación de sustancias de gran contenido energético como son el carbón, el gas natural o el petróleo, alcanzando altos porcentajes de utilización en la industria a nivel mundial (85.9%) mientras que el porcentaje restante es utilizado en otro tipo de energías, entre estas las renovables [1].

México produce 91% de su energía utilizando combustible fósiles, como el carbón, el gas y el petróleo. Esta dependencia hacia los combustibles fósiles está provocando un deterioro en la calidad del aire, contaminación de ríos, mares y suelos, además, son responsables del cambio climático global. México cuenta con un potencial enorme para aprovechar las energías renovables [2], por esta y muchas más razones se han creado alternativas como el colector solar el cual ha sido impulsado e implementado a finales del 2006 para la calefacción en las viviendas de la ciudad de México, donde se obtienen 15 MJ/día/m² en verano, y 8-10 MJ/día/m² en invierno, así hoy día con el aumento del precio del petróleo, los calentadores solares constituyen una interesante inversión [3].

Las energías renovables se dividen en una gran variedad de áreas pero una de las más influyentes son los colectores solares, estos son dispositivos los cuales tienen como finalidad calentar agua a partir de la radiación solar. Actualmente los colectores se pueden dividir en colectores de baja temperatura, los cuales se utilizan principalmente en viviendas o donde se necesite agua caliente sanitaria, por otro lado se tienen los colectores de alta temperatura los cuales se utilizan a nivel industrial para la producción de energía eléctrica [4].



Fig. 1 Colector solar alta temperatura.

Los colectores solares están destinados a calentar agua, pero no todos lo hacen de la misma manera ya que existen diferentes métodos para cumplir esta función primordial, estos métodos dependen de la aplicación que se le quiera dar al líquido en cuestión, por ejemplo se tienen los colectores termosifónicos los cuales funcionan por convección natural, este no requiere de una bomba ni un sistema de regulación, por otro lado tenemos el colector de placa plana el cual se limita al uso de agua caliente sanitaria, entre otros colectores (colector de vacío, colector de polipropileno, colector cilíndrico parabólico, etc.)[4].

Esta tesis trabajó en el desarrollo de un colector solar (ver Figura 2), el cual tiene como objetivo principal trabajar de la mano con el medio ambiente sin descuidar la eficiencia del mismo, este colector trabaja de la misma forma que la mayoría, aprovechando la diferencia de densidades sobre el líquido (*efecto termosifón*), su mayor virtud está vista en la reutilización de botellas plásticas las cuales son las que están expuestas a la radiación solar y transmiten el flujo de calor al fluido, la idea es que cuando el material (PET) se cristalice se cambie como si fuese un foco y se reemplace por un nuevo envase, es decir tener un mantenimiento simple [5].



Fig. 2 Prototipo colector solar ecológico.

1.2 Planteamiento del problema

Es muy claro que actualmente se debe apostar en el desarrollo de las energías limpias, ya que la contaminación producida por estas son mínimas, por el contrario las energías como los combustibles fósiles generan un impacto altamente fuerte sobre el medio ambiente, trayendo consigo consecuencias como el efecto invernadero, disminución del agua potable, etc.

Ahora bien como anteriormente se mencionó los colectores solares son una alternativa al uso de los combustibles fósiles (alto impacto ambiental), lo cual lo hace una gran opción a la hora de ahorrar dinero y pensar en el ambiente, aspectos básicos como los anteriores influyen sobre el usuario a la hora de comprar este tipo de dispositivos (colectores solares), lo que sucede en la actualidad con los colectores solares es que luego de un tiempo de servicio requiere cambios de piezas lo cual implican un costo adicional para el usuario (ver Figura 3), adicionalmente estas piezas vienen de un proceso industrial lo cual implica un costo para el medio ambiente, lo que se busca es reducir los costos para el usuario y el consumo de repuestos lo cual directamente atacaría el problema de la contaminación ambiental.

Por lo anterior, se propone el análisis termo estructural del PET reciclado aplicado a un calentador solar ecológico con el objetivo generar un análisis para calentadores solares y predecir su comportamiento estructural utilizando herramientas numéricas.



Fig. 3 Repuesto de tubos al vacío.

1.3 Justificación.

En la actualidad la humanidad se ha visto sometida a ciertas problemáticas poblacionales, pero quizás unas de las más importantes a tener en cuenta es el índice de pobreza el cual ha estado aumentando de manera significativa, con esta pobreza se intensifican los factores como el hambre y la salud los cuales son considerados como índices agravantes para la calidad de vida para las personas, así instituciones han declarado un conjunto de derechos básicos los cuales preservan el concepto de “dignidad”, entre estos se encuentra el derecho a una vivienda digna, un derecho que se degrada conforme pasa el tiempo [6].

Actualmente este derecho a la vivienda propia y digna ha adquirido diferentes significados, siendo dependiente de una variedad de factores como el país, zona geográfica, entre otros, pero uno de los más influyentes que vale la pena mencionar es el clima, ya que las necesidades de una vivienda donde se manejan temperaturas de 30°C serán muy diferentes a un lugar donde se tengan temperaturas entre los 15°C y los -10°C, ahora bien hay que contar con el factor de la estación, ya que la vivienda que se encuentra en clima frío podría llegar a temperaturas negativas en la escala de grados Celsius cuando le corresponde la estación de invierno [6], [7].

Como parte de la solución a estos problemas se optando por la implementación en muchos países de los colectores solares, un colector solar es un tipo especial de intercambiador de calor el cual transforma energía solar radiante en calor[8], este es un tipo de energía alternativa hace de éste un tema que demanda una seria atención por parte de los gobiernos y de las entidades gubernamentales, si se pretende implementar tecnologías

medioambientales a costos razonables y accesibles al ciudadano promedio nacional, todo esto pensando en las poblaciones de más bajos recursos. [9]

Entonces una vez expuesta esta problemática se pretende analizar ciertos aspectos referentes que van desde su aspecto estructural hasta su desempeño térmico, para este proyecto de tesis es de suma importancia enfocarse en el desempeño térmico-estructural del PET (*tereftalato de polietileno*) como uno de los elementos principales del colector solar (véase Fig. 2), y así se contribuirá a mejorar la calidad de vida de las poblaciones menos afortunadas, incrementando el índice de dignidad.

1.4 Objetivo

El principal objetivo de esta investigación es realizar un análisis térmico-estructural del tereftalato de polietileno (PET) con aplicación en un colector solar ecológico, apoyándose en el análisis por elemento finito.

1.4.1 Objetivos específicos

- Analizar y proponer un modelo para la estructura base del colector solar.
- Caracterizar y determinar el comportamiento del tereftalato de polietileno (PET) por medio de pruebas experimentales, regidas por la norma ASTM D882.
- Determinar y caracterizar el modelo numérico del material utilizando elemento finito.
- Proponer un modelo de elemento finito para el análisis termo -estructural del colector solar.

1.5 Impacto

Este proyecto busca en su desarrollo no solo tener un impacto en el área de investigación de los modelos de colectores solares sino que también busca presentar un modelo de desarrollo para la caracterización de materiales plásticos como es el PET. Adicionalmente se tienen los siguientes aportes.

- A través de esta investigación se puede generar un análisis estructural para la base del colector solar y el usuario puede tomar como fundamento la metodología desarrollada para aplicarla posteriormente en un modelo propio.

- Mejorar el desempeño de un colector solar ecológico con el fin de hacer esta tecnología más competitiva.
- Disminuir los costos que tendrá que asumir el usuario al invertir en este tipo de colectores solares ecológicos.
- Aportación a la investigación y desarrollo de caracterización de materiales plásticos.

1.6 Alcances y limitaciones

Los alcances para este proyecto llegan a ser bastante amplios ya que hay una gran cantidad de variables que se pueden controlar, generando una gran cantidad de casos de estudio, como por ejemplo, se podría mencionar el espesor del material tratado en esta investigación, el cual si se variara junto con la geometría del envase resultaría efectos diferentes a los obtenidos en este caso, de igual forma se tienen perfiles de temperatura para cierta época del año pero valdría la pena asumir varios casos de estudio donde estos perfiles en cuestión se variaran para así tener nuevos casos de estudio.

Como limitaciones para este proyecto tenemos la falta de información acerca de los envases plásticos por parte de las empresas, datos como dimensiones, espesores y un perfil más detallado de los compuestos de los cuales está hecho el PET que los constituye, adicionalmente los tiempos de cómputo ya que las simulaciones fluido-estructura en régimen transitorio consumen bastante cantidad de recursos computacionales.

1.7 Estado del arte

Hay una gran variedad de investigaciones que tratan los colectores solares pero esta investigación se basó en un colector solar en desarrollo, por lo cual puntualmente la información es escasa, sin embargo este caso de estudio, trato como primera parte una caracterización del material PET (tereftalato de polietileno), esta caracterización que se realiza a las botella de PET es para comprobar su eficiencia, ante los efectos termo-estructurales a los cuales estarán sometidas las botellas, ya que soportaran fuerzas de presión, contracciones y expansiones debidas al líquido interno, peso neto del agua y de la botella, adicionalmente el plástico estará expuesto al sol lo que hace que este tenga un efecto de cristalización, y su módulo de Young varié [10].

En algunas investigaciones se realizan numerosos test de tensión, para el tereftalato de polipropileno con el fin de encontrar sus propiedades mecánicas, Dora Forti *et al.* [11] Realiza este proceso dirigido al desarrollo de un tipo de concreto reforzado con fibras de PET donde analiza por medio de test las propiedades del concreto y el PET por separado, para el plástico se obtuvieron módulos de elasticidad de $5000-7000 \text{ N/mm}^2$ (Elastic modulus), $500-750 \text{ N/mm}^2$ (Tensile strength) y 8% (ultimate elongation), entre otros, sin embargo estas características fueron determinadas para el PET en estado de fibras, otras

fuentes de información hablan de las características mecánicas para el material en cuestión pero en su estado de películas (Films), el libro “*polymer nanocomposites handbook*” [12] hace pruebas para el PET/LCP obteniendo valores de hasta 9 Gpa y 154 Mpa de resistencia a la tracción para una temperatura de 260°C, mientras que en el “*Thermoplastics: Directory and Databook*”[13] reporta valores de módulos de Young desde los 6.8 a 19.5 Gpa.

Como se puede apreciar el PET al igual que otros materiales, sus propiedades mecánicas se hacen dependientes de muchas variables como si está en estado de fibra o de película delgada (o gruesa); de igual forma influyen factores como la temperatura, también si el material está en su estado puro o si está siendo combinado en ciertos porcentajes de aditivos, así que para este proyecto se tienen referencias, pero no se pueden tomar con exactitud ya que las circunstancias no son exactamente las mismas.

Por otro lado se han encontrado tesis [14][15][16] que modelan botellas pero estos trabajos han sido dirigidos a estudiar el proceso de soplado de las preformas, este tipo de tesis concluyen en qué tipo de espesores, formas y otras características mejoraran el proceso de manufactura de las mismas.

Finalmente para este apartado mencionaremos un trabajo del cual se partirá para el análisis de esta investigación, en la tesis “Estudio térmico-fluido dinámico de un prototipo nivel laboratorio de un calentador solar que reutiliza botellas de plástico”[5] , donde se hace todo el análisis térmico para el colector solar y las botellas y de acá se concluyen perfiles de temperatura críticos para estos elementos en cuestión, entre otras características fundamentales tratadas en esta.

En los artículos consultados anteriormente no se encontró un modelo de elemento finito que trabaje el comportamiento termo-estructural de la botella de tereftalato de polietileno, a diferencia de trabajos anteriores esta investigación trabajará un modelo bajo estas condiciones, donde se utilizarán estrategias para simplificar el proceso.

CAPÍTULO 2

En el capítulo anterior se dio un enfoque básico hacia donde está dirigido este proyecto, se habló acerca de los parámetros principales bajo las cuales se regirá el desarrollo de este, adicionalmente se habló de los tipos y características de colectores solares, pero ahora en este apartado nos enfocaremos a entender la teoría que será necesaria para el desarrollo de la tesis, finalmente para explicar e interpretar los resultados obtenidos.

MARCO TEORICO

- 2.1 Introducción al concepto de ingeniería mecánica
- 2.2 Energía solar
- 2.3 Los plásticos
- 2.4 Colectores solares
- 2.5 Indagaciones y desarrollos tecnológicos de colectores solares ecológicos.
- 2.6 Método de elemento finito

Capítulo 2
Marco Teórico

2.1 Introducción al concepto de ingeniería mecánica

El origen de la palabra ingeniería proviene de épocas antiguas, donde las civilizaciones que tenían construcciones como templos, diques o canales donde era claro que se aplicaban conocimientos de tipo matemático y otros. La palabra “ingeniero” proviene el vocablo latino “*ingenium*” (ingenio), que hace referencia a máquinas, o artefactos mecánicos, así como también de la disposición innata y natural del espíritu para inventar, crear y diseñar [17].

La ingeniería mecánica es una ramificación del campo de las ingenierías que se basa en los principios de la física y matemáticas para el análisis, diseño y fabricación de elementos de la industria, la ingeniería mecánica de igual forma junto con otros campos de desarrollo, fabrican piezas de maquinaria, utensilios. Los ingenieros mecánicos utilizan conceptos de las áreas de transferencia de calor, análisis de esfuerzos, entre otros principios para analizar sistemas físicos estáticos y dinámicos, para darle solución a problemas industriales. [18]

El área de la ingeniería mecánica se divide en tres grandes ramificaciones que son:

- Área de diseño mecánico: esta área se caracteriza por enfocarse en la parte estructural de los elementos mecánicos analizar precargas, concentradores de esfuerzos y otros fenómenos de falla importantes para diseñar piezas, otra área de trabajo es la de mantenimiento y manufactura campos de acción más aplicables a la industria.
- Área de termodinámica: esta ramificación se enfoca a analizar los efectos termo-estructurales de dispositivos industriales donde la influencia de fluidos y temperaturas son esenciales en los análisis.
- Área de robótica: esta área se enfatiza en analizar la dinámica de los cuerpos más a profundidad, donde la influencia de movimiento hace de prioridad este tipo de análisis.

2.2 Energía solar

La energía solar es una fuente alternativa a los combustibles fósiles en ciertas aplicaciones, que cuenta con varias e importantes ventajas sobre otras, y que para su aprovechamiento, también presenta varias dificultades. Entre sus ventajas se destacan principalmente su naturaleza inagotable, renovable y su utilización libre de polución. Pero, para su utilización, es necesario tener en cuenta su naturaleza intermitente, su variabilidad fuera del control del hombre y su baja densidad de potencia. Estas dificultades conllevan entonces la necesidad de transformarla a otra forma de energía para su almacenamiento y posterior uso. La baja densidad de potencia resulta en que es una fuente extensiva: para mayor potencia, mayor extensión de equipos de conversión. La ingeniería solar precisamente se ocupa de asegurar

el suministro confiable de energía para el usuario teniendo en cuenta estas características [19].

La energía solar se transforma en la naturaleza en otras formas de energía, como biomasa y energía eólica, pero también se puede transformar a otras formas de energía como calor y electricidad. Las aplicaciones más difundidas en México son el calentamiento de agua para uso doméstico, industrial y recreacional (calentamiento de agua para piscinas) y la generación de electricidad a pequeña escala. Otras aplicaciones menos difundidas son el secado solar de productos agrícolas y la destilación solar de agua de mar u otras aguas no potables [19].

2.3 Los plásticos

2.3.1 ¿Qué son los plásticos?

En general un plástico es un material flexible, resistente, poco pesado y aislante de la electricidad y del calor, se emplea mucho en la industria porque es fácil de fabricar y moldear, es económico, ligero y admite pigmentos de gran variedad de colores. Además, puede combinarse con otros materiales y mejorar así sus propiedades.

Un plástico es un material que está formado por moléculas de gran longitud (macromoléculas) que se enredan formando una madeja; aunque existen plásticos naturales, como la celulosa y el caucho, la gran mayoría de los plásticos son materiales sintéticos los cuales se obtienen a partir de materias primas como el petróleo, el carbón, o el gas natural, aun que la inmensa mayoría se obtiene básicamente del petróleo.

Existen muchos métodos industriales y complicados de fabricación de plástico. El material plástico obtenido puede tener forma de bolitas, gránulos o polvos que después se procesan y moldean para convertirlas en láminas, tubos o piezas definitivas del objeto [20].

2.3.2 Propiedades de los plásticos

Es difícil generalizar sobre las propiedades de los plásticos debido a la gran variedad de estos que existe. Por ello se mencionara las más significativas, aquellas que todos ellos comparten:

- **Conductividad eléctrica nula.** Los plásticos conducen mal la electricidad, por eso se emplean como aislantes eléctricos; lo vemos, por ejemplo, en el recubrimiento de los cables.

- **Conductividad térmica baja.** Los plásticos suelen transmitir el calor muy lentamente, por eso suelen usarse como aislantes térmicos; por ejemplo, en los mangos de las baterías de cocina.
- **Resistencia mecánica.** Para lo ligeros que son, los plásticos resultan muy resistentes. Esto explica por qué se usan junto a las aleaciones metálicas para construir aviones y por qué casi todos los juguetes están hecho de algún tipo de plástico.
- **Combustibilidad.** La mayoría de los plásticos arde con facilidad, ya que sus moléculas se componen de carbono e hidrógeno. El color de la llama y el olor del humo que desprenden suele ser característico de cada tipo de plástico además podríamos destacar lo económicos que son, salvo excepciones, lo sencillo de sus **técnicas de fabricación** y la facilidad que tienen para combinarse con otros materiales, con lo que es posible crear materiales compuestos con mejores propiedades, como el poliéster reforzado con fibra de vidrio [20].

2.3.3 Tipos de plásticos.

Si clasificáramos los plásticos por su naturaleza tendremos dos grandes grupos:

- Naturales: los plásticos naturales se obtienen directamente de materias primas (látex, la caseína de la leche y la celulosa).
- Sintéticos: los plásticos sintéticos se elaboran a partir de compuestos derivados del petróleo, el gas natural, etc.

Si los clasificáramos por su estructura interna estarían divididos en los siguientes grupos:

- Termoestables: son aquellos que por su estructura interna, formada por cadenas entrecruzadas, se degradan con el calor antes de que el plástico se funda, solo pueden fundirse y fabricarse una vez, poca capacidad de reciclado.
- Elastómeros: son un tipo de termoestables, por lo cual solo pueden fundirse una vez, pero debido a su estructura interna con cadenas ramificadas, presentan un elevado grado de elasticidad.
- Termoplásticos: son aquellos que por su estructura interna, formada por cadenas lineales, se desarmen fácilmente con el calor y se reconstruyen al enfriarse, pueden fundirse y volver a fabricarse muchas veces, lo cual es un punto adicional al momento de reciclarlos [21].

2.3.4 El tereftalato de polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno más conocido por sus siglas en inglés PET (*polyethylene terephthalate*) es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. Es un polímero termoplástico, con un alto grado de cristalinidad, como todos los termoplásticos

puede ser procesado mediante extrusión, inyección y soplado, soplado de preforma y termoconformado. Para evitar el crecimiento rápido de esferulitas y lamelas de cristales, este material debe ser rápidamente enfriado, con lo que se logra una mayor transparencia [22].

Algunas características del tereftalato de polietileno:

- Actúa como barrera para los gases, como el CO₂, humedad y el O₂.
- Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes.
- Liviano, permite que una botella pese 20 veces menos que su contenido.
- Impermeable.
- Levemente tóxico: recientemente se ha descubierto que las botellas que se usan para embotellar zumos de frutas ácidos liberan algo de antimonio(Sb), aunque por debajo de los límites que admite la OMS (20µg/L)
- Inerte (al contenido).
- Resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza.
- Alta resistencia química y buenas propiedades térmicas: posee una gran indeformabilidad al calor.
- Totalmente reciclable.
- Superficie barnizable.
- Estabilidad a la intemperie.
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.
- No es biodegradable [22].



Fig. 4 Envases PET

2.3.5 Aplicaciones de PET

- El uso del PET en envases y empaque:

Las firmas de maquinaria han contribuido en gran medida a impulsar la evolución de manera rápida de los envases, por lo que hoy se encuentran disponibles envases para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente; también se desarrollan envases muy pequeños desde 10 mililitros hasta garrafrones de 19 litros. Los tarros de boca ancha son utilizados en el envasado de conservas alimenticias.

- El uso del PET en el área electro-electrónico

Esta área abarca diversos tipos de películas y aplicaciones desde las películas ultra delgadas para capacitores de un micrómetro o menos hasta de 0.5 milímetros, utilizadas para aislamiento de motores. Los capacitores tienen material dieléctrico una película PET empleada para telecomunicaciones, aparatos electrónicos entre otros.

- El uso del PET en las fibras (telas tejidas, cordeles, etc.)

En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir. Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras. Su resistencia química permite aplicarla en cerdas de brochas para pinturas y cepillos industriales.

- El uso del PET en el área de las energías renovables

Como bien se ha mencionado el tereftalato de polietileno es un material muy utilizado por la industria por muchas razones, pero pueda que sea una de las mejores es que sea muy reciclable, ya que el material permite nuevamente ser fundido y combinarse con aditamentos para lograr posteriormente un producto para su comercialización, otras formas de aprovechar el nivel de reciclaje de este material ha sido implementado por las energías renovables, donde equipos de recolección solar están utilizando los envases PET de diferentes maneras (*véase Figura 5*), como por ejemplo, adaptar los envases para crear mayor recolección de energía solar, otras maneras parten de utilizar el material (PET) fundido para crear los tanques principales de estos colectores solares.



Fig. 5 colector solar con botellas PET

2.4 Colectores solares

La definición más general de los colectores solares va dirigida a que son dispositivos que están diseñados para recolectar energía generada por el sol, posteriormente estos la convierten en energía térmica para su posterior utilización.

Los colectores solares se dividen en dos grandes grupos: los colectores solares de baja temperatura, los cuales son utilizados en el área doméstica (calefacción y/o en el área sanitaria) y los de alta temperatura los cuales son manejados para la generación de energía eléctrica. Hay una gran variedad de diseños de colectores solares en este apartado solo se mencionara los de mayor relevancia para la investigación.

2.4.1 Colectores solares de alta temperatura

- **Concentrador solar de espejo parabólico:**

Los concentradores solares de este tipo son capaces de redirigir la energía en un área reducida, así aumentando la intensidad energética, este tipo de colectores solares utilizan un principio similar al de las lupas las cuales enfocan la luz en un punto específico, los concentradores en cuestión reflejan la luz por medio de un arreglo de espejos alineados los cuales son diseñados con forma de una cilindro parabólico el cual puede alcanzar temperaturas de 300°C o plato parabólico que tiene un mayor desempeño alcanzando aproximadamente 650°C dependiendo del diseño.

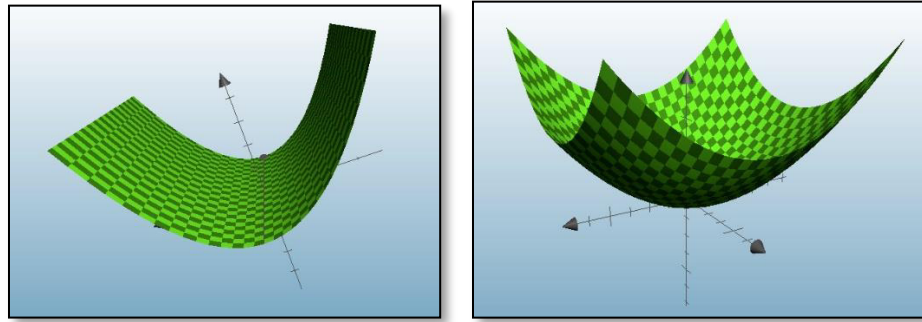


Fig. 6 Cilindro parabólico (Izq.), Plato parabólico (Der.).



Fig. 7 Concentrador solar de cilindro parabólico.

- **Colector por campo de heliostatos:**

Es también llamada central solar de torre, es un tipo de horno solar que cuenta con una torre ubicada en el centro del arreglo, la cual recibe luz solar concentrada, este tipo de arreglo cuenta con un conjunto de espejos planos móviles (heliostatos), estos espejos enfocan los rayos solares sobre la torre colectora la cual hace parte de un conjunto de elementos para la producción de energía eléctrica.



Fig. 8 campo de heliostatos.

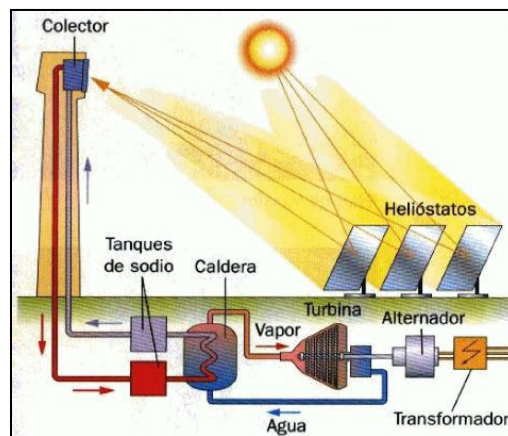


Fig. 9 principio de funcionamiento.

2.4.2 Colectores solares de baja temperatura

- **Colector solar plano:**

Este tipo de colector solar es de los más comunes en el área domestica ya que el rango de temperaturas que maneja es suficientemente conveniente para el uso de las redes sanitaria de un hogar promedio ($30^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$), este tipo de colectores se dividen en dos tipos los colectores planos no protegidos y los protegidos, estos últimos son los más utilizados por tener la relación costo-beneficio más favorable, este tipo de colector se ubica en una caja rectangular de dimensiones entre los 80 y 120 cm de ancho, 150 y 200 cm de alto, y 5 y 10 cm de ancho, claro que estas dimensiones variaran según aspectos como rendimiento, ubicación del colector, diseñador, etc.

La cara expuesta al sol cuenta con un vidrio (normalmente templado), mientras que el resto de caras son opacas y generalmente se aíslan térmicamente, dentro de la caja también se ubica una lámina metálica, la cual está unida o soldada a un conjunto de conductos, por los cuales fluye un caloportador (generalmente es agua aunque puede llegar a ser un anticongelante como el *glicol*), la placa mencionada anteriormente puede recibir tratamientos para aumentar su absorción térmica o simplemente puede ser pintada de negro.



Fig. 10 Colector solar plano.

- **Colector de tubos al vacío:**

Este tipo de colectores están conformados por un número determinado de tubos en donde cada uno de los mencionados está conformado por dos tubos concéntricos entre los cuales se ha evacuado el aire produciendo así el vacío, los cuales posteriormente se sellan para fijar esta configuración.



Fig. 11 tubos al vacío.

Este conjunto de tubos, posteriormente se une a un tanque el cual almacena el fluido de alta temperatura para su uso, generalmente este tipo de colectores alcanza temperaturas de 50°C pero con un mayor número de tubos y arreglos adicionales este puede acercarse a los 200°C.



Fig. 12 Colector de tubos al vacío.

Los colectores que utilizan un fluido para la recolección de la energía térmica experimentan un efecto de diferencia de densidades donde, como su nombre lo dice, cierta parte del fluido aumenta su temperatura lo cual hace que la densidad baje gradualmente al generarse ese efecto el agua más fría (más alta densidad) tiene a bajar desplazando el agua caliente hacia arriba, este efecto es llamado termosifón, el cual es un principio que casi todos los colectores utilizan, este es definido de una manera más formal como: “*El efecto Termosifón es un movimiento térmico circular en el cual, entre mayor sea la diferencia de temperatura entre el agua que hay en el colector y el agua almacenada en el tanque, más rápido fluye el agua a través del circuito*”.

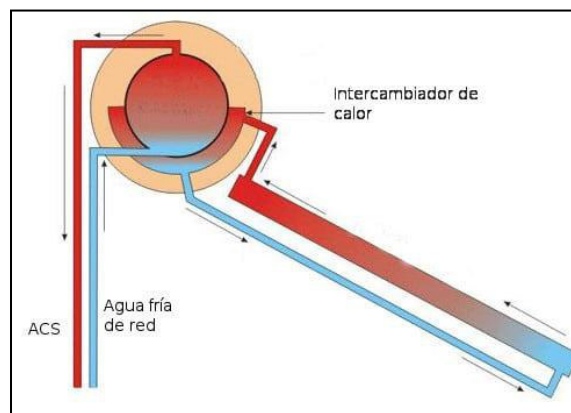


Fig. 13 Efecto de termosifón.

2.4.3 Clasificación de los colectores solares según la temperatura alcanzada.

Tabla 1 Clasificación de los colectores solares.

Movimiento	Tipo de colector	Rango de temperaturas indicativo (°C)
Estacionario	Captador solar plano	30-80
Estacionario	Colector de tubo de vacío	50-200
Estacionario - Seguimiento en un eje	Colector parabólico compuesto	60-300
Seguimiento en un eje	Reflector lineal de Fresnel	60-250
Seguimiento en un eje	Colector cilíndrico	60-300
Seguimiento en un eje	Colector parabólico	60-400
Seguimiento en dos ejes	Reflector de disco parabólico	100-1500
Seguimiento en dos ejes	Colector por campo de heliostatos	150-2000

2.5 Indagaciones y desarrollos tecnológicos de colectores solares ecológicos.

Como parte del proceso de investigación hay que recurrir a una búsqueda intensiva de trabajos, proyectos, patentes y otro tipo de documentación donde se comente el trabajo realizado por estos, con el fin de realizar una adquisición de información que contribuya al desarrollo de esta investigación para generar un aporte científico en el tema, así a continuación se expondrá la información más relevante encontrada:

2.5.1 Trabajos e investigaciones acerca de calentadores solares basados en material reciclado.

Contreras Trejo 2012 en su investigación, dio a conocer el diseño e implementación de un calentador solar elaborado con material reciclado destinado para un hogar en Coyopolan, Veracruz, en este modelo la radiación solar puede ser altamente aprovechada con dicho sistema y no presentó ninguna anomalía durante la exposición [23].

Careaga Muñoz 2015 presento los resultados de la eficiencia de un colector solar fabricado con tereftalato de polietileno (PET) para uso domiciliario, aplicado en el estado de Veracruz. En el modelo que se trabajó en esta investigación se dejó expuesto al sol durante un periodo de 3 horas, en las cuales se obtuvieron gradientes de incremento de hasta 45°C,

adicionalmente se realizaron encuestas con el fin saber si la gente aceptaría la implementación de esta tecnología en sus hogares [24].

Martínez, López y Suarez, en su trabajo de investigación, propusieron la instalación de colectores solares de la ciudad de Bogotá (Colombia), se diseñó y construyó varios modelos de colectores solares con materiales reciclados, para así finalmente escoger el mejor prototipo, el colector solar fue construido con envases de tereftalato de polietileno (PET), estos envases se cortaron y se ensamblaron en diferentes niveles. Para este prototipo de realizaron cálculos donde se determinó que el ángulo más eficiente es de 23.6° , también se calcularon datos de rendimientos [25].

Miranda Gassull 2011 elaboro un colector solar para uso domiciliario, utilizando materiales reciclado (PET, Polipropileno), adicionalmente realizo un análisis económico para la población de más bajos recursos, manuales de uso de esta tecnología y finalmente realizo pruebas del prototipo donde obtuvo temperaturas de 42°C [26].

Luján et al. 2013 muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de un modo de colector solar automatizado, el cual es construido a partir de material reciclable, el principio con el cual fue automatizado fue el modelo HIGH/LOW, el cual envía una señal alta cuando el agua esta fría y viceversa, así llegando a un punto de estabilidad térmica, se notificaron temperaturas aproximadamente de 50°C en el interior del tanque [27].

2.5.2 Patentes acerca de calentadores solares basados en material reciclado.

En el apartado anterior se presentaron resultados basado en investigaciones realizadas para colectores solares reciclables ahora mostraremos unos pocos trabajos que se han llevado al punto de patentar:

Harukara 2004, postulo una patente en China, en la cual construyeron un calentador solar de agua, el cual está conformado por un tubo principal el cual tiene latas de aluminio perforadas y conectadas en serie, estas se ubican tanto en la parte superior como inferior del tubo principal [28].

Oshima 2008, se desarrolló un modelo patentado, el cual está diseñado y construido con tereftalato de polietileno y latas de aluminio, las latas están conectadas en serie dentro de una base rectangular, una características interesante del modelo es que utiliza llaves de paso

en la parte inferior del calentador, una en cada lado, con el fin de poder extraer agua por cualquiera de los lados del equipo [29].

Naemura 2005, patentó un modelo de colector solar basado en material reciclado (PET), este es implementado para uso doméstico ya que las temperaturas que alcanzan son las necesarias para un baño promedio, este modelo fue construido basándose en un tubo principal con forma de espiral, en cada vuelta se conectaron una serie de botellas [30].

2.6 Método de elemento finito (MEF).

2.6.1 Breve reseña histórica.

El método de elemento finito surge en Francia, alrededor de los años 1850 a 1875, periodo en el cual surgen los conceptos de análisis estructural debidos a *Maxwell*, *Castigliano* y *Mohr* entre otros. Sus conceptos fueron la piedra angular del análisis matricial de estructuras, estos no tomarían forma útil sino 80 años después y serían fundamentales para la formulación del método de elemento finito (MEF).

El progreso en el desarrollo de teorías y de técnicas analíticas auxiliares al análisis del elemento finito fueron particularmente pocas de 1875 a 1920, debido en parte por las limitaciones existentes para solucionar el sistema de ecuaciones algebraicas. Aproximadamente para 1920 gracias a los esfuerzos de *Maney* en los Estados Unidos de *Ostenfeld* en Dinamarca, las ideas básicas para el análisis aproximado de marcos basados en parámetros de desplazamiento tomaron forma y fueron estas ideas las que hasta hoy son la base del análisis matricial de estructuras.

Grandes eran las limitaciones para los problemas grandes, pues las incógnitas (fuerza y desplazamiento) eran demasiadas, estas prevalecieron hasta 1932 año en el cual *Hardy Cross* introdujo el método de distribución de momentos; este método hizo factible la solución de problemas de análisis estructural que fueran de un orden de magnitud más compleja que los problemas tratados por las aproximaciones anteriores, convirtiéndose así en el método práctico de análisis estructural de los siguientes 25 años. A principio de 1950 hicieron su aparición las primeras computadoras digitales, y la práctica de ambas teorías tuvieron cierto impacto, impuesto por algunos individuos que empezaron a hacer codificaciones y formatos para las computadoras en forma matricial, siendo dos celebres personajes los que hicieron las publicaciones de estos trabajos: *Argyris* y *Patton*, los cuales representaron el predominio del método de elemento finito en los años subsecuentes.

A mediados de los 50's *Zienkiewicz* motivado por la formulación específica de elementos para esfuerzo plano, empezó a hacer investigación para elementos relacionados con sólidos, placas curvas, cascarones y otras formas estructurales [31].

2.6.2 Definición del método de elemento finito.

El método de elemento finito, es un conjunto de técnicas que nos aproxima a un sistema continuo, como un conjunto de elementos discretos. Así, las ecuaciones diferenciales que definen al medio continuo se transforman en un conjunto de ecuaciones relativas a un número finito de variables; las cuales deberán satisfacer las condiciones de equilibrio y compatibilidad [31].

También es definido como un procedimiento numérico el cual puede ser usado para obtener resultados a una amplia gama de problemas de ingeniería como análisis de esfuerzos, electromagnetismo, transferencia de calor y flujo de fluidos, en general, todos los problemas desarrollados en el área de ingeniería están basados en modelos matemáticos de situaciones físicas. Los modelos mencionados anteriormente están constituidos por ecuaciones diferenciales, apoyadas en un grupo de condiciones iniciales y de frontera. Estas ecuaciones gobernantes representan el balance de masa, fuerza o energía. Cuando es posible, la solución exacta describe detalladamente el comportamiento del sistema bajo el conjunto de condiciones dadas [32].

Hay una gran variedad de problemas ingenieriles en los cuales es posible obtener una solución exacta. Este problema es atribuido a la naturaleza compleja de las ecuaciones diferenciales o a la complejidad que se maneje en las condiciones de frontera o iniciales. Para solucionar este tipo de problemas, es necesario recurrir a aproximaciones numéricas. Estas aproximaciones se acercan a la solución exacta solamente en puntos discretos llamados nodos [32].

Lo primero que se debe realizar en cualquier problema es discretizar el modelo esto hace referencia a que se debe dividir el medio de interés en pequeñas subregiones y nodos. Los dos métodos numéricos más famosos son: el método de diferencias finitas y el método de elemento finito; con el *MDF* (método de diferencias finitas), se asigna una ecuación diferencial por cada nodo presente en el modelo y las derivadas son sustituidas por ecuaciones diferenciales, esto aproxima los resultados mediante un conjunto de ecuaciones lineales simultáneas, a pesar de que entender la teoría y aplicarla se oye relativamente sencillo este tipo de planteamientos se complica cuando el modelo presenta geometrías o condiciones de frontera más complejas de igual forma la complejidad también se presenta cuando el modelo está constituido con materiales no isotrópicos. Por otro lado el método de elemento finito (*MEF*) usa la formulación integral en lugar de las ecuaciones diferenciales para crear un sistema de ecuaciones algebraicas, adicionalmente una función continua aproximada es considerada para representar la solución de cada elemento. Entonces la solución general se basa en el conjunto ensamblado de las soluciones para cada elemento, así generando continuidad en cada una de las fronteras que el modelo posea [32].

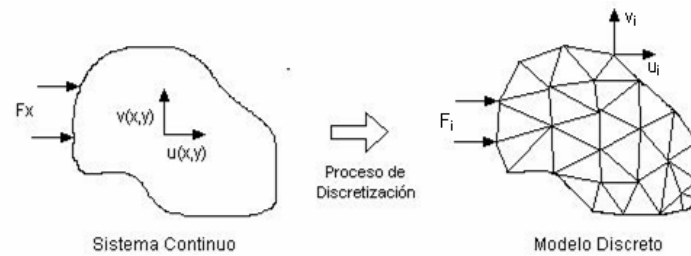


Fig. 14 proceso de discretización.

En la siguiente figura podremos apreciar el proceso de discretización aplicado a una figura geométrica de nivel medio. En la izquierda el modelo está listo para el proceso de discretización una vez llevado a cabo se puede observar que el elemento está bien distribuido y no hay un discontinuidad del elemento.

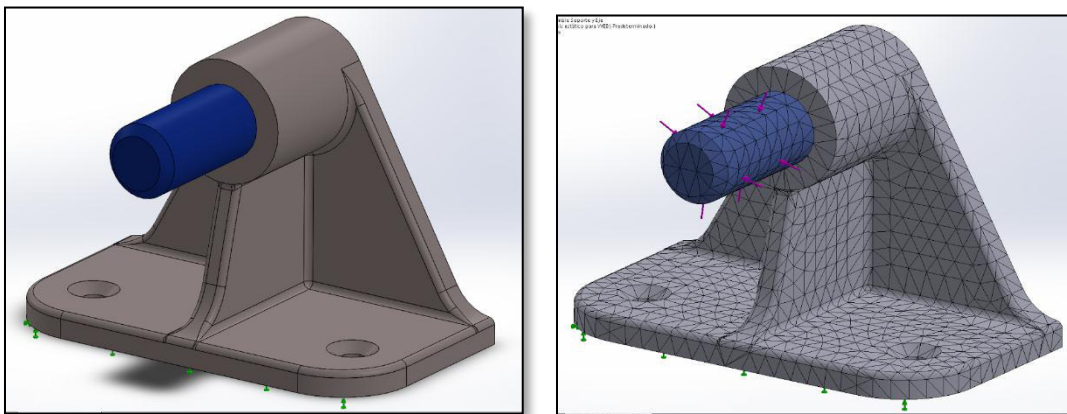


Fig. 15 discretización aplicada.

2.6.3 Etapas básicas en la utilización del método de los elementos finitos

Independientemente de la naturaleza física del problema, el análisis del mismo mediante el MEF sigue los siguientes pasos:

- Definición del problema y su dominio.
- Discretización del dominio.
- Identificación de la(s) variable(s) de estado.
- Formulación del problema.

- Establecimiento de los sistemas de referencia.
- Construcción de las funciones de aproximación.
- Determinación de las ecuaciones a nivel de cada elemento.
- Transformación de coordenadas.
- Ensamble de las ecuaciones de los elementos.
- Introducción de las condiciones de contorno.
- Solución del conjunto de ecuaciones simultaneas resultante.
- Interpretación de los resultados.

2.6.4 Linealidad vs no linealidad en un análisis de esfuerzo

Para una gran variedad de problemas en el estudio del elemento finito se tienen los análisis lineales en los cuales la respuesta obtenida es directamente proporcional a la carga ejercida sobre el modelo, generalmente la linealidad puede ser una buena representación de la realidad del modelo o simplemente puede verse ya que se hizo una serie de análisis que simplifico el modelo. Para los análisis lineales se asume que los desplazamientos y las rotaciones son pequeños, el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación y las cargas ejercidas sobre el modelo siempre mantienen las direcciones de aplicación según la estructura del modelo impuesto.

Las ecuaciones de equilibrio $kD = F$, donde k es la constante de rigidez, D el desplazamiento y finalmente F la fuerza, como podemos ver es la ecuación de una recta lo cual confirma que la variación del modelo es directamente proporcional, para los desplazamientos se re expresa la ecuación $D = k^{-1}F$ así los desplazamientos se obtienen directamente, entonces muchos problemas prácticos se pueden resolver directamente, pero hay que tener en cuenta que cualquiera de las suposiciones que llevan a un análisis lineal pueden no ser afín a la realidad, por ejemplo partes del solido pueden crear o romper una superficie de contacto, las áreas de contacto pueden ser variar según fluctúa la magnitud de la fuerza que se le esté proporcionando al modelo, los materiales podrían pasar de la zona elástica (lineal) a la zona plástica o finalmente la relación esfuerzo-deformación podría no tener una relación lineal durante todo el proceso donde se le aplique una fuerza. Así entonces por una o varias razones el modelo puede pasar de un estado lineal a uno no lineal [32].

Un modelo no lineal hacen que el problema se complique ya que las ecuaciones de solución deben tener en cuenta condiciones que no son totalmente conocidas hasta que la solución se determina (condiciones iniciales, condiciones de carga, estado de esfuerzos, soportes utilizados en el modelo), lo que se quiere hacer entender es que como la solución lineal esta

no puede ser obtenida de manera directa, lo que se hará es que se tendrá una solución y se recalculara nuevamente hasta que el criterio de convergencia sea alcanzado[32]

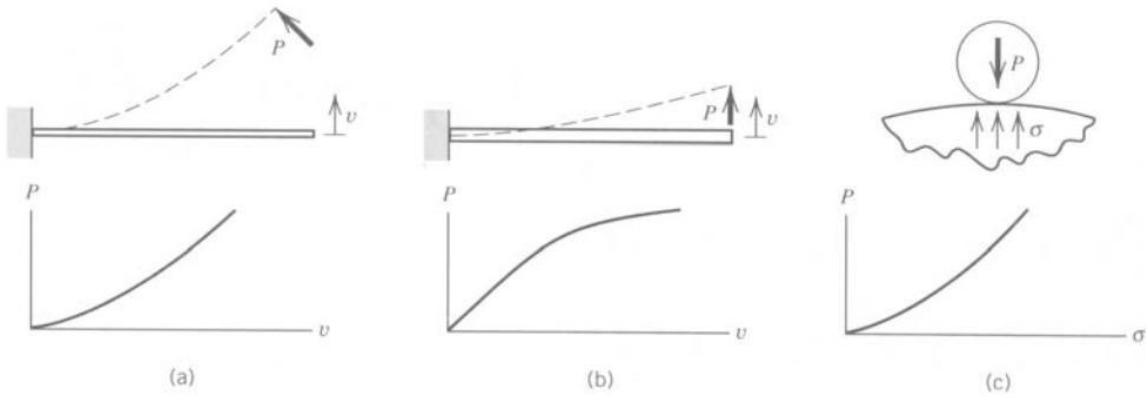


Fig. 16 Ejemplos de no linealidades: (a) geometría (b) material (c) contacto.

CAPITULO 3

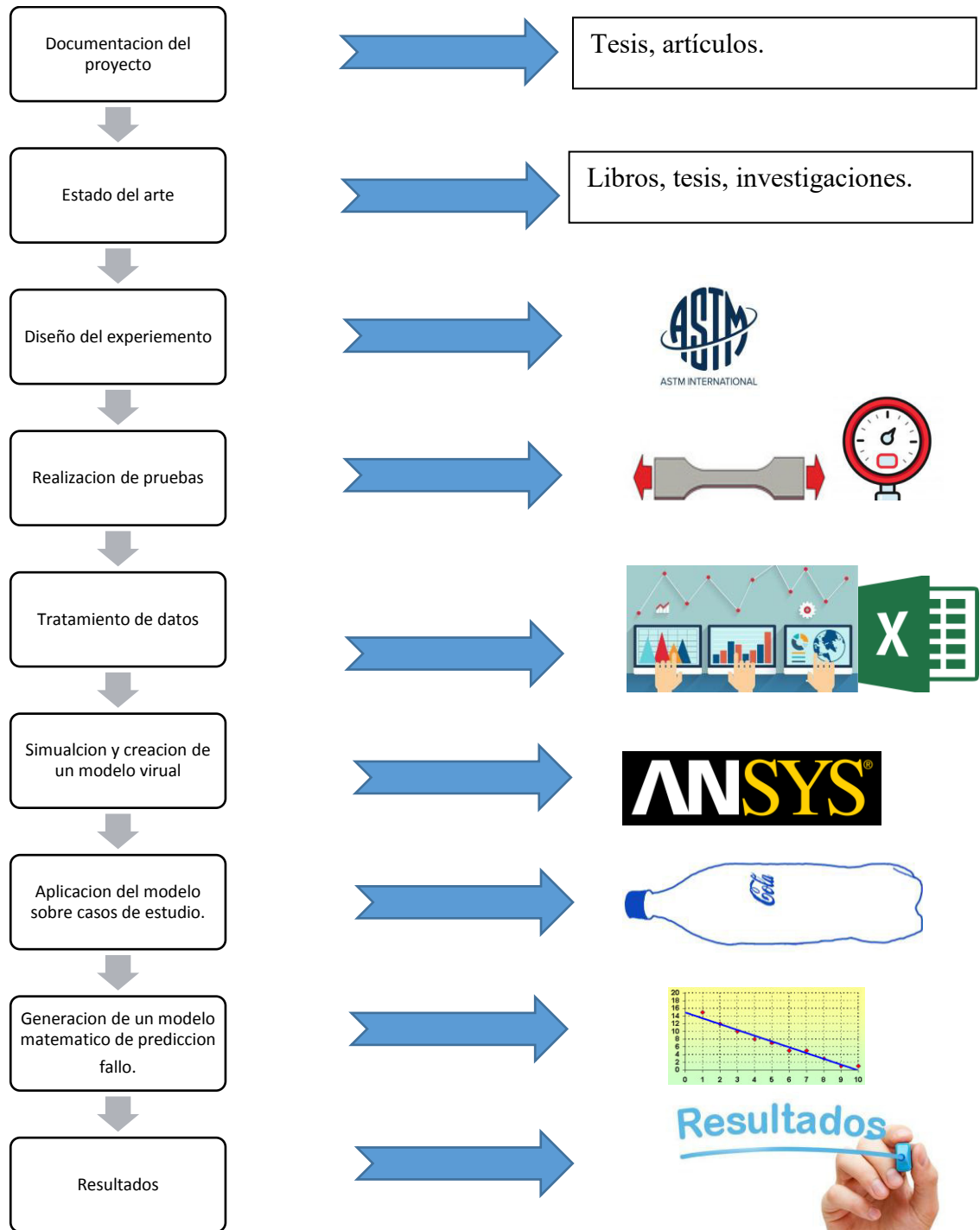
En este capítulo se mostrará la metodología desarrollada para el proceso de caracterización del material (*PET*), esta fase se debe realizar con el fin de poder recrear el modelo de forma virtual y así posteriormente recrear situaciones reales, esta etapa estará regida por la norma ASTM-D-882 la cual nos ofrecerá la información necesaria para un correcto proceso.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

- 3.1 ¿Por qué y para qué caracterizar un material?
- 3.2 Norma ASTM D-882
- 3.3 Pruebas experimentales
- 3.4 Realización de pruebas experimentales.
- 3.5 Adquisición y tratamiento de datos.
- 3.6 Selección de modelo constitutivo numérico con validación experimental.

Capítulo 3
Metodología de Análisis.

La implementación de una metodología para el desarrollo de la investigación es un punto muy importante para un avance estructurado, por lo cual a continuación se presentará la metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto.



3.1 ¿Por qué y para qué caracterizar un material?

Actualmente en la industria existe una gran variedad de materiales los cuales se han clasificado de muchas maneras (dureza, flexibilidad, conductividad, etc.), estas clasificaciones están basadas en las propiedades mecánicas o térmicas del mismo, las cuales son encontradas por medio de las pruebas experimentales regidas por la normatividad existente.

Estas metodologías se desarrollan cada vez que se desconoce alguna propiedad del material y es necesario conocerla, ya que por ejemplo para un diseño mecánico es de suma importancia conocer el valor del módulo de Young entre otras propiedades igualmente importantes. Hay variedad de pruebas experimentales una de la más conocidas es el test de tensión uniaxial (véase *Figura 17*) el cual tiene como objetivo principal encontrar el módulo de elasticidad, poisson, entre otras, este test debe contar con dimensiones y velocidades estándar las cuales son dadas por normas como la ASTM, ISO, etc.

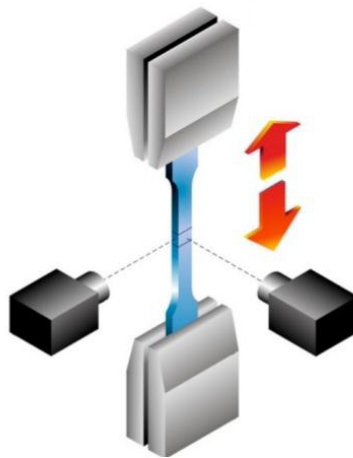


Fig. 17 Prueba uniaxial.

En el área de las pruebas de tensión también se tiene el test de tensión biaxial (véase *figura 18*) esta prueba consiste en estirar en dos direcciones distintas el material en cuestión, la finalidad de esta prueba es obtener las características mecánicas de materiales que son considerados anisótropos, este test la mayoría de las veces se enfoca en materiales compuestos, tejidos biológicos y textiles. Existen tres tipos de pruebas de tensión biaxial: prueba de estallido, de cilindros y biaxial plana.

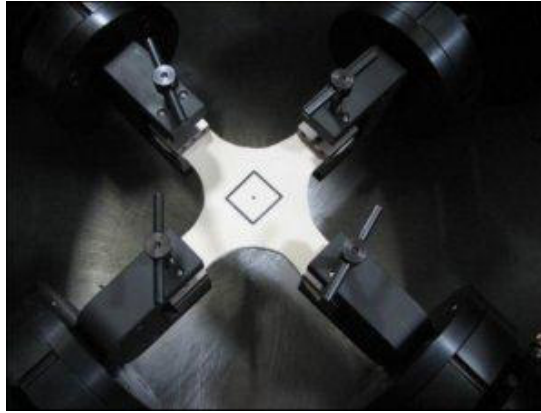


Fig. 18 Test de tensión biaxial.

3.2 Norma ASTM D-882

La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas más grandes del mundo, en la ASTM se reúnen productores, usuarios y consumidores, entre otros, de todo el mundo, para crear normas de consenso voluntarias.

La ASTM maneja una amplia gama de normas para muchos materiales y para cada uno existe su normatividad respectiva, con un cierto número de parámetros los cuales harán que la prueba se regularice, en el caso de esta investigación se determinó el uso de la norma D882-00 (Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting) esta norma se utiliza para pruebas de tensión uniaxial en materiales plásticos con espesores delgados menores a 1 mm (laminas).

A continuación daremos a conocer los parámetros que nos competen según la norma ASTM D882-00 la cual es aplicable a nuestro caso de estudio:

- Norma aplicable para plásticos con espesores menores a 1 mm (0.04 in).
- Velocidad de prueba $1\frac{\text{in}}{\text{min}}$.
- Las muestras de ensayo deberán consistir en tiras uniformes de forma rectangular (se recomienda mínimo 50 mm mas longitud de agarre).
- Una relación ancho-espesor $\frac{\text{ancho}}{\text{espesor}} \geq 8$.
- Relación de anchura: $0.2\text{ in} < a < 1\text{ in}$.

- En caso de isotropía se recomiendan 5 pruebas (min) y anisotropía 5 pruebas normales y 5 paralelas.
- Para ver más detalles sobre la prueba remitirse a la norma (ASTM D-882).

Con los parámetros definidos por la norma pasaremos al siguiente paso el cual será plantear las condiciones bajo las cuales se realizaran las pruebas.

3.3 Pruebas experimentales

Como anteriormente se mencionó la norma ASTM D882-00 es aplicable para plásticos con espesores menores a 1 mm (0.04 in), ya que nuestras muestras cuentan con un espesor de $270\ \mu\text{m}$ [33], es válida la aplicación de la norma, hay que recordar que hace parte de las suposiciones del proyecto pensar que el espesor a través de toda la botella es constante.

El objetivo de las pruebas experimentales es conocer la variación de las propiedades mecánicas del material (PET) bajo la influencia de condiciones térmicas y estructurales, para completar esta fase de la investigación se optó por exponer tres lotes de envases (PET) inclinados a 45° (respecto a la horizontal)[5], (este ángulo es definido ya que para el colector solar que se está teniendo en cuenta es el mejor en el sentido de captación solar. Véase referencia 5) de igual forma los envases fueron llenados de agua en su totalidad simulando un estado de operación lo más real posible.



Fig. 19 Lotes de botellas (Izq.), Envase de prueba. (Der.).

Para poder llevar a cabo la experimentación fue necesario realizar un bastidor que sujetase los envases asegurando el ángulo y la sujeción lo más real posible, para ello se propuso una serie de modelos donde finalmente se construyó la que funcionalmente iba a servir y que generaría costos mínimos.



Fig. 20 Estructura.

Los tubos horizontales fueron inclinados a 45° para simular el ángulo que el colector iba a darle a los envases en la realidad, mientras que para la sujeción se utilizó la misma tapa del envase y esta entraba a presión en la estructura.

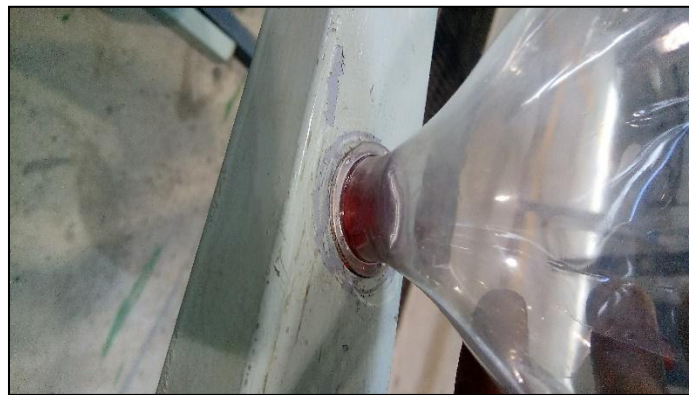


Fig. 21 Sujeción de los envases.

El fin de realizar tres lotes de prueba es generar tres tipos de exposición solar al material, así luego se procesarán los datos y se podrá generar una predicción del tiempo en el que el material estará en óptima condición para trabajar de forma eficiente en el colector solar; los tiempos propuestos de exposición son:

- Sin exposición: el material se ha expuesto a las condiciones climáticas normales de uso antes de ser reciclado.
- 3 meses
- 6 meses

Estos tiempos fueron asignados según un cronograma en el cual se tendría como límite para el desarrollo de la investigación. Una vez lista la estructura y los envases se procedió a buscar el lugar más indicado para la exposición solar, y se decidió que la azotea de uno de las instalaciones de la DICIS (Salamanca-Guanajuato) sería la mejor opción, estando en el lugar la estructura se alineo en dirección Este-Oeste con la ayuda de una brújula, la razón de esta dirección se debe a que el sol hace su recorrido alineado a este eje y así la área de transferencia de las botellas sería mayor.

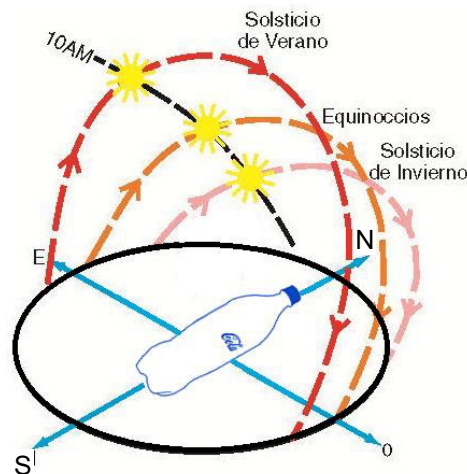


Fig. 22 Orientación de envases.



Fig. 23 Orientación de la estructura.

3.3.1 Preparación de muestras y aplicación de método según norma.

En el proceso de preparación de muestras lo primero que se definió basándose en la norma fueron las medidas, la norma dicta que la probeta debe medir como mínimo 50 mm de altura y adicionar cierta medida para el agarre de las mordazas, esa medida se basa en que si es muy corta la mordaza no lograrán una buena sujeción haciendo que la probeta se deslice y la prueba falle. Luego de unas pruebas se determinó experimentalmente que dos centímetros serían suficientes, una vez dicho eso la longitud de la probeta será 90 mm más 40 mm para agarre de ambas mordazas (longitud total 130 mm [L]).

Para el ancho hay que cumplir la siguiente restricción:

$$0.2\text{ in} < a < 1\text{ in} \quad (1)$$

Basándonos en investigaciones pasadas el ancho fluctuaba con valores cercanos a los 20 mm (a). Una vez definido se revisó la restricción de geometría (k_g) el cual dice:

$$K_g = \frac{a}{h} \geq 8 \quad (2)$$

$$K_g = \frac{2 \text{ cm}}{0.027 \text{ cm}} = 74.04 \quad (3)$$

Donde h es el espesor del material y a el ancho de la probeta, así observamos que se cumple la restricción geométrica K_g .

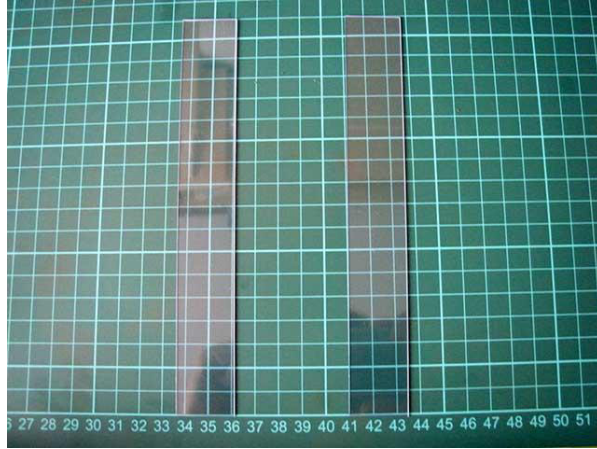


Fig. 24 Probeta.

3.4 Realización de pruebas experimentales.

Una vez definida las medidas de la probeta se procede a la realización de las pruebas, estas se realizaron en la maquina *Instron 8872* la cual cuenta con las siguientes características como:

- Hasta ± 25 kN (5620 lbf) capacidad de la fuerza axial.
- *Dynacell*, celda de carga patentada para la compensación de las cargas inerciales causada por mordazas pesadas y accesorios.
- Opciones del bastidor estándar o extra alta.
- Amplia gama de mordazas y accesorios.



Fig. 25 Instron 8872

Este equipo cuenta con dos tipos de sujeciones: una es la sujeción hidráulica y otra manual, la cual con ayuda una llave brístol se aseguraba firmemente la probeta para que no hubiera posibilidad de que esta se resbalase, en contraparte la presión ejercida por la sujeción hidráulica presento problemas de fijación.

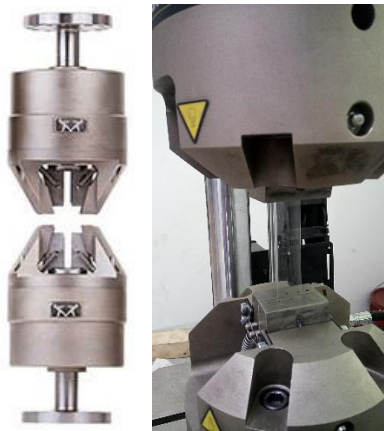


Fig. 26 Sujeción mecánica.

Los datos de entrada según la norma para calcular propiedades mecánicas aparte de las dimensiones de la probeta, es la velocidad de prueba la cual debe ser constante ($1 \text{ in}/\text{min}$) lo cual implica que la variable que se está controlando es el desplazamiento.

3.5 Adquisición y tratamiento de datos.

Posteriormente de que las pruebas se llevaron a cabo, se hizo la adquisición de datos, donde se tuvo como respuesta gráfica de fuerza [N] vs deformación [mm], esta respuesta de datos se capturaba en intervalos de 0.1 segundos, a la velocidad indicada por la norma, así finalmente se obtenían datos estructurados de la siguiente manera:

Tabla 2 Resultados de datos para prueba 1.

Prueba 1		
Módulo Elástico	6047,86053	MPa
Tiempo (s)	Desplazamiento (mm)	Carga (N)
0	0	0.156549
0,1	0,03253	46,770280
0,2	0,07614	63,071100
0,3	0,11849	78,561740
0,4	0,16041	94,298070
0,5	0,20294	109,690590
0,6	0,24578	125,236790
0,7	0,28887	140,445070

Como podemos apreciar en la *Tabla 2* los datos de respuesta empezaban balanceados en el tiempo cero, luego iba incrementando hasta el grado de generar la rotura de la probeta, es claro que esta tabla solo representa una pequeña fracción de los datos arrojados por la máquina para una prueba completa. En la *Tabla 2* también tenemos como respuesta el cálculo del módulo de elasticidad el cual para esta prueba es de 6.047 *Gpa*.

Hay que recordar que este mismo proceso se realizó para cada una de las probetas de cada uno de los tres lotes propuestos lo cual implicó como mínimo quince pruebas de tensión uniaxial, para el primer lote (5 muestras tomadas) se calculó un promedio siendo el resultado gráfico el siguiente:

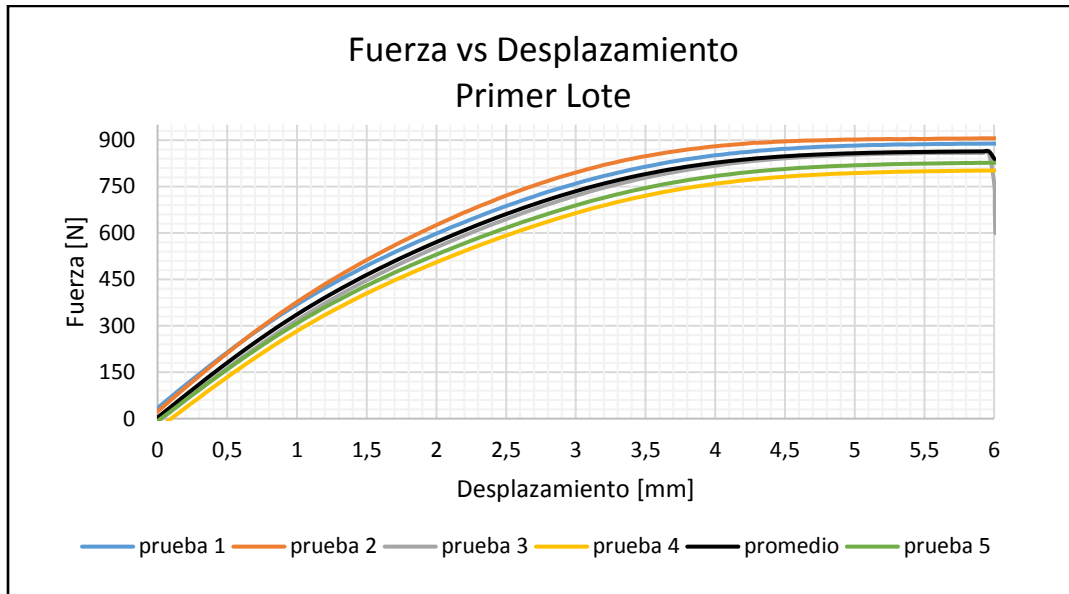


Fig. 27 Resultados de fuerza vs desplazamiento para las 5 muestras y promedio.

Luego de manipular los datos obtenidos por la máquina Instron para las cinco muestras se obtuvo un módulo de elasticidad promedio para el primer lote de 5.920 Gpa , una vez obtenido este dato se procede a hacer los cálculos de esfuerzos (σ) y de la deformación unitaria (ϵ) para ello se hace de la siguiente manera:

Datos de dimensión:

$$L_i = 0.09 \text{ m} \quad (4)$$

$$L_T = L_i + \delta \quad (5)$$

Donde L_i es la longitud inicial de la probeta, L_T longitud total en cierto intervalo de tiempo (Δ_t) y δ la deformación para cierto Δ_t , esto quiere decir que para cada intervalo de tiempo se tendrá una longitud total ya que la deformación incrementara hasta que el espécimen llegue a la rotura, en ese punto se alcanzara la longitud final (L_F), ahora procederemos a calcular el área transversal (A_{tr}) de la probeta.

$$A_{tr} = a * h = 0.02 \text{ m} * 270 \mu\text{m} \quad (6)$$

$$A_{tr} = 5.4 \mu m^2 \quad (7)$$

Donde a hace referencia al ancho y h al espesor de la probeta. Luego se calculara la deformación unitaria ingenieril junto con el esfuerzo ingenieril. Por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_i} \quad (8)$$

$$\sigma_{ing} = \frac{F}{A_{tr}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{real} = Ln\left(\frac{L_T}{L_i}\right) \quad (10)$$

$$\sigma_{real} = \sigma_{ing} * (1 + \varepsilon_{ing}) \quad (11)$$

Con este conjunto de ecuaciones se puede definir en su totalidad todos los datos requeridos para hallar las curvas de esfuerzo contra deformación tanto ingenieril como los datos ajustados (reales), entonces luego de hacer este tratamiento a los datos obtendremos las siguientes curvas:

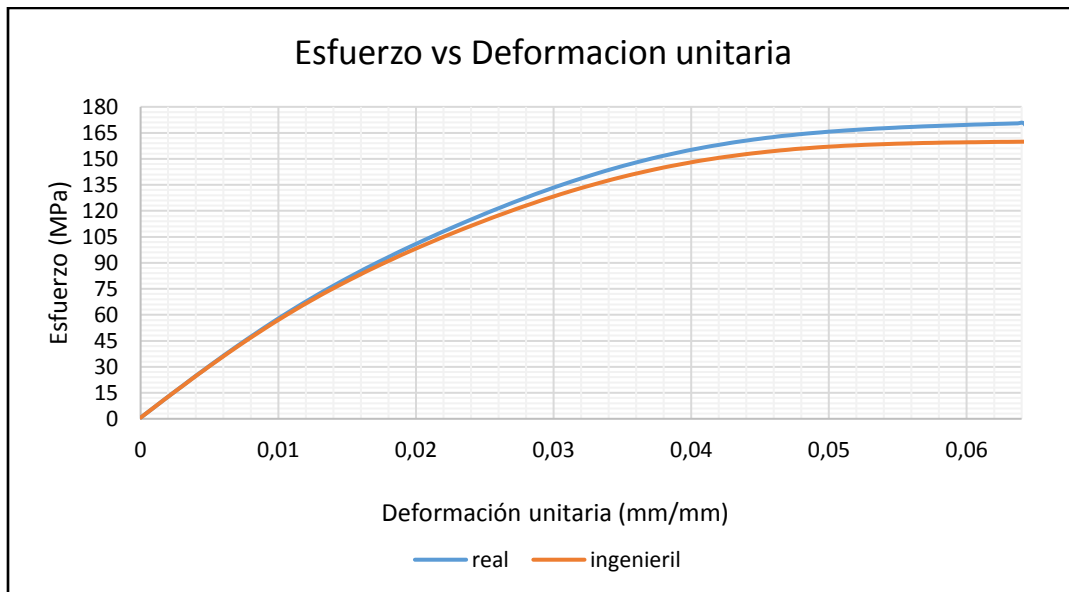


Fig. 28 Esfuerzo vs Deformación (real vs ingenieril)

3.6 Selección de modelo constitutivo con validación numérica.

Ahora que fueron procesados los datos obtenidos en el modelo experimental bajo la norma correspondiente, es momento de realizar una selección del modelo constitutivo, el cual una vez definido deberá modelar el prototipo lo más cercano a la realidad.

3.6.1 Modelos constitutivos.

Los modelos constitutivos son ecuaciones desarrolladas por una gran variedad de autores las cuales describen el cambio ya sea lineal o no lineal de variables como el esfuerzo o la deformación unitaria, este tipo de modelos se han basado en modelos más generales con el fin de mejorar la proximidad a la realidad, estos se han modificado, agregado constantes extras. Así entonces, existen una gran variedad de modelos constitutivos de los cuales algunos de ellos se han especializado en ciertos tipos de materiales como es el ejemplo de los materiales viscosos, elásticos, viscoelásticos, hiperelásticos, etc.

Para modelar el material en cuestión (PET) se opta por utilizar los modelos no lineales (hiperelásticos), ya que algunos materiales como son los elastómeros, polímeros, gomas, Materiales biológicos, entre otros, pueden estar sometidos a grandes deformaciones sin presentar deformación permanente, como se dijo un material hiperelástico tiene un comportamiento no lineal, el cual significa que su respuesta a la carga no es directamente proporcional a la deformación. Hay un gran número de materiales (polímeros) que se pueden modelar con ecuaciones constitutivas hiperelásticas, la teoría no lineal se usa para explicar estos fenómenos. Las principales características de un material con un comportamiento no lineal son:

- Grandes deformaciones.
- La variación del esfuerzo y deformación no son proporcionales.
- Las deformaciones no son permanentes.

La densidad de energía de deformación está en función de las invariantes de deformación:

$$W = f(I_1, I_2, I_3) \quad (12)$$

El modelo más representativo de esta clasificación es el polinomial ya que es un modelo basado en la primera y segunda invariante, este fue desarrollado por *Rivlin* y fue el primer modelo que se propuso para el análisis de elastómeros y ha servido de base para el desarrollo de otros modelos como el de *Mooney Rivlin* (*similar al polinomial*), *Yeoh* (*conocido como la forma reducida del modelo polinomial*) y *Neo Hookean* (*modelo más simple*) [34].

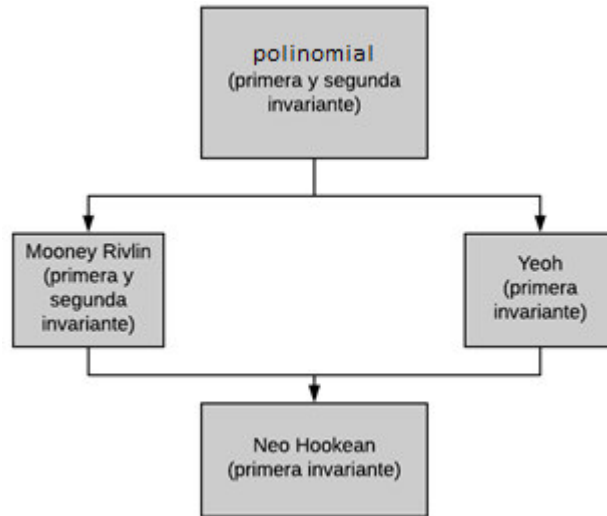


Fig. 29 Algunos modelos matemáticos basados en las invariantes de la deformación.

Teniendo en cuenta lo anterior dicho se escogieron los modelos *Polinomial*, *Mooney Rivlin* y *Yeoh* para el análisis de esta investigación, basado en esto se procede a trabajar en el modelado numérico.

3.6.2 Modelado numérico.

Para esta parte del proceso se trabajó con el software ANSYS®, el primer paso a seguir fue proporcionar al programa los datos recolectados del test de fuerza uniaxial, como son el esfuerzo y la deformación unitaria reales estos datos se proporcionaron en *Pascales [Pa]* y $\frac{mm}{mm}$ respectivamente (véase Fig. 30).

	B	C
1	Strain (mm mm ⁻¹)	Stress (Pa)
2	0.00069231	1.4348E+07
3	0.001	1.7625E+07
4	0.0013846	2.098E+07
5	0.0016923	2.4189E+07
6	0.002	2.7437E+07
7	0.0023077	3.0595E+07
8	0.0026923	3.3678E+07
9	0.003	3.6757E+07
10	0.0033077	3.9822E+07
11	0.0036154	4.2741E+07
12	0.004	4.5719E+07

Fig. 30 Esfuerzo vs deformación.

Estos datos el programa los muestra también de forma gráfica, con el fin de poder visualizar el desarrollo de las variables proporcionadas por el usuario. (Ver Figura 31).

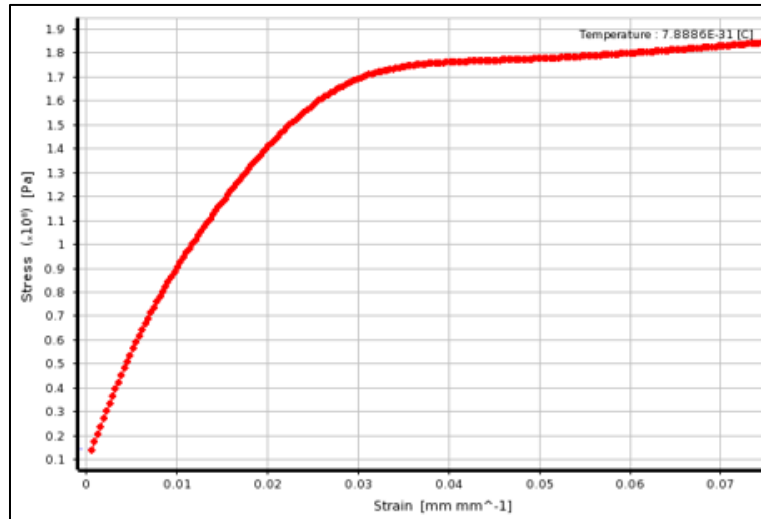


Fig. 31 Esfuerzo vs Deformación

Ahora que se le proporcionó al programa los datos de las pruebas experimentales se procede a asignarle un modelo constitutivo (*Polinomial, Mooney Rivlin, Yeoh*) el cual se ajustará automáticamente con el fin de seguir el comportamiento real. Estos modelos gráficamente se ajustarán de la mejor manera pero hay que realizar una validación de estos datos para comprobar que en realidad a través de toda la gráfica el ajuste es el mejor.

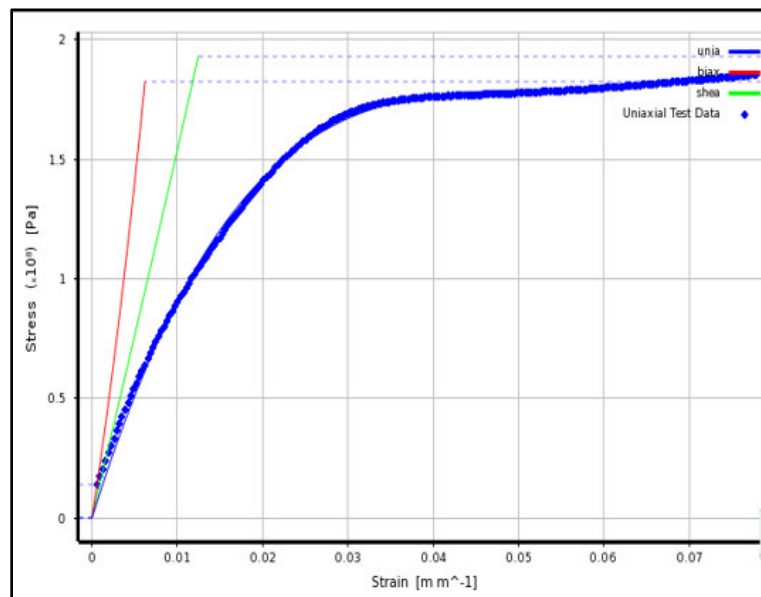


Fig. 32 Modelo Mooney- Rivlin

Una vez asignado y ajustado el modelo constitutivo a los datos experimentales, se crea la geometría con la cual se comprobaran los datos, para nuestro caso el modelo de validación se basa en la geometría de la probeta sometida a la tensión uniaxial, esta está definida como un rectángulo de 90 mm de largo y 20 mm de ancho con 270 μm de espesor.

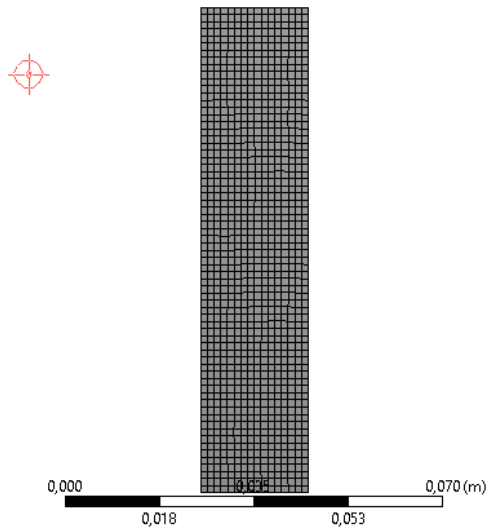


Fig. 33 Geometría del modelo de validación. (90x20x0.27 mm)

Lo siguiente fue realizar un mallado simple ya que la geometría no tiene mayor complejidad sin embargo parte del proceso pide demostrarlo a través de un análisis de sensibilidad de malla, como podemos apreciar en la siguiente figura se asignó distinta variedad de elementos hasta que la variable requerida (Fuerza de reacción) se estabilizara, de esto se concluyó que con 78 elementos eran suficientes para estabilizar el valor de la fuerza.

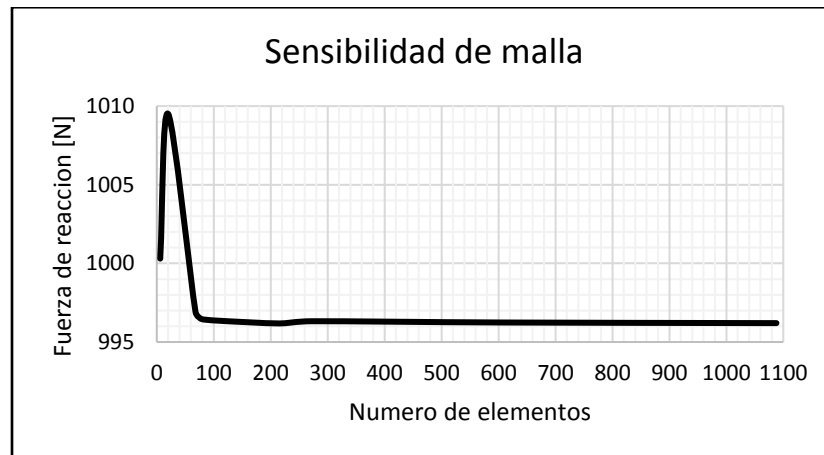


Fig. 34 Análisis de sensibilidad de malla.

Con esto se procede a asignar las condiciones de frontera las cuales modelaran una situación de tensión uniaxial para ellos se utilizó un “Fixed Support” en la parte inferior del modelo y en la parte superior se asignó un desplazamiento máximo de 6 mm, este desplazamiento se debe a que los datos recolectados en la experimentación llegaban a este límite antes de llegar a un punto de rotura.

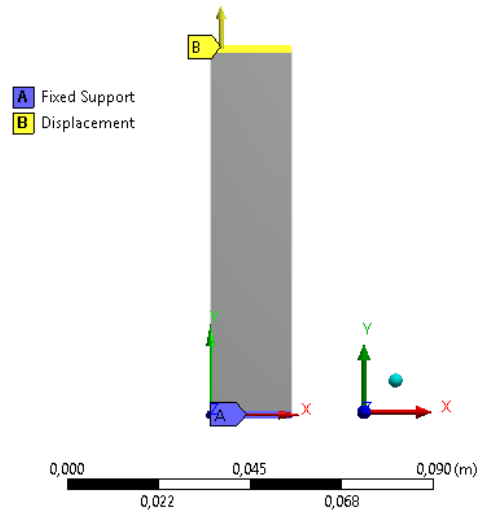


Fig. 35 Condiciones de frontera.

Una vez aplicado estas condiciones de frontera se simuló y se requirió al programa datos de fuerza vs deformación, para cada uno de los modelos constitutivos, esto con el fin de comparar estos resultados con los datos experimentales y mirar que tan bueno es el ajuste de las curvas, como podemos apreciar en la siguiente figura (Fig. 36) están las respuestas de los tres modelos constitutivo seleccionados y su respectivo ajuste, era de esperarse que no todos los modelos ajustaran de la mejor manera.

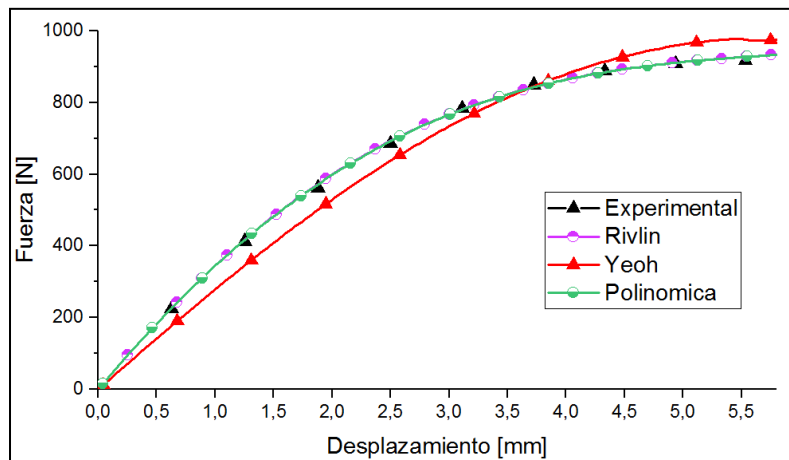


Fig. 36 Comparación de modelo vs datos experimentales.

Ahora a primera vista se puede ver que el modelo de *Yeoh* es el de peor ajuste y que los otros modelos (*Polinomial* y *Rivlin*) ajustan casi a la perfección, pero hay que realizar un proceso más riguroso para determinar el mejor modelo, para esta investigación se optó por utilizar un modelo de error relativo el cual genera un descarte lo suficientemente completo yendo de la mano con la simplicidad del mismo, así mismo se obtuvo el siguiente resultado (véase Fig. 37).

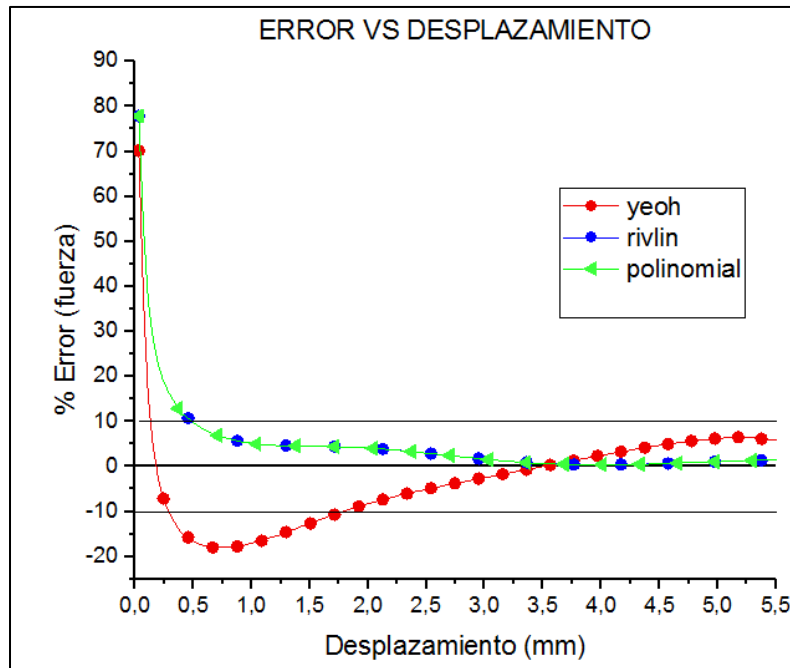


Fig. 37 Error Vs desplazamiento.

Gracias a este gráfico observamos que el modelo de *Yeoh* es el de peor ajuste ya que no reduce su error a un 0% , y en cierto punto el error llega a ser de casi 18% lo cual es inaceptable para poderlo tener en cuenta, mientras que los modelos de *Mooney Rivlin* y *Polinomial* tiene un ajuste lo suficientemente rápido y menor al 6% lo cual implica que estos modelos constitutivos están modelando la realidad del proceso de una forma muy apropiada, ahora bien según la literatura para este tipo de materiales con este porcentaje de elongación lo más recomendable es utilizar el modelo de *Mooney Rivlin*, el cual coincide con los resultados obtenidos.

El modelo de *Mooney Rivlin* finalmente seleccionado se ajusta con cierto número de variables dependiendo del caso, para el nuestro con 5 parámetros fue suficiente, ya que este arroja el ajuste que se ve en la *Figura 37*, el modelo hace un seguimiento bastante bueno a la curva real, ahora la ecuación que describe el modelo de *Mooney Rivlin 5 parámetros* es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 W_5 = & C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{02}(\bar{I}_2 - 3)^2 \\
 & + C_{11}(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Dónde:

W = Potencial de energía de deformación.

\bar{I}_1 = Primera invariante de deformación.

\bar{I}_2 = Segunda invariante de deformación.

C_{xx} = Constantes de ajuste para el modelo.

d = Parámetro de incompresibilidad del material.

J = Función de energía de tensión del modelo constitutivo hiperelástico.

El valor de las constantes para esta ecuación en el lote número 1 son de:

$$C_{10} = 1.0629 * 10^9 [Pa]$$

$$C_{01} = -9.5635 * 10^7 [Pa]$$

$$C_{20} = -3.8331 * 10^{12} [Pa]$$

$$C_{11} = 8.5124 * 10^{12} [Pa]$$

$$C_{02} = -4.7374 * 10^{12} [Pa]$$

$$d = 0 [Pa^{-1}]$$

CAPITULO 4

Este capítulo mostrará el modelado general para las simulaciones finales, donde se hará énfasis desde la creación de la geometría hasta el análisis de los resultados finales, todo con el fin de que el lector pueda seguir el proceso de manera detallada.

APLICACIÓN DE MODELO VIRTUAL

- 4.1 Modelo virtual.
- 4.2 Diseño en el módulo de geometría.
- 4.3 Diseño en el módulo de mallado.
- 4.4 Módulo transitorio térmico.
- 4.5 Módulo transitorio estructural.

Capítulo 4
Aplicación del modelo virtual.

4.1 Modelo Virtual.

Retomando el desarrollo que se llevó a cabo en los capítulos anteriores, ahora se procede al paso del modelo virtual, el cual trabajará a la par con el modelo constitutivo seleccionado previamente, así entonces, el modelo virtual está basando en el desarrollo de un envase de PET el cual fue el escogido para su utilización en el colector solar en cuestión, así que este envase poseerá las dimensiones de un de refresco de la empresa *Coca-cola*® de una capacidad de 3 litros, una vez diseñado el modelo se procederá a mallar de la forma más conveniente, posteriormente se agregarán las condiciones de frontera y finalmente se revisarán los resultados con el fin de definir un modelo de predicción de degradación del material para este caso de estudio en específico.

4.2 Diseño en el módulo de geometría.

Para diseñar cualquier simulación hay que seguir un proceso básico con el fin de obtener buenos resultados, la primera etapa se tiene el diseño del modelo CAD (Computer Aided Design) que traduce diseño asistido por computadora, el objetivo de esta etapa es modelar el envase lo más parecido a la realidad, para esto se propuso un proceso de modelamiento con el fin de simplificar el trabajo sin desviar el modelo de la realidad.

Como primera parte del diseño se propuso realizar el modelo por medio de la técnica de escaneo de nube de puntos, una técnica utilizada para adquirir geometrías irregulares o de cierta complejidad (alta), sin embargo se quería tener una segunda opción ya que el envase tiene una geometría regular, así que se optó por realizar el diseño basado en imágenes de tamaño real.



Fig. 38 envase de Coca-Cola®.

Esta técnica está basada en importar la imagen y realizar un croquis, esto claro se podrá hacer de manera satisfactoria siempre y cuando se tenga la certeza de que la imagen este en escala real así pues, utiliza la opción de exportar en el software *Solid Works*® y se utilizan las herramientas como líneas, curvas, spline, etc. para así seguir el contorno del envase para así utilizar posteriormente la herramienta revolución, todo lo anteriormente dicho se puede visualizar en la Figura 39.



Fig. 39 Revolución de sólido.

Una vez hecho el sólido solo es cuestión de utilizar las herramientas disponibles para generar los detalles como las curvaturas que se aprecian en la superficie del envase adicionalmente se busca una técnica para modelar la base no regular del modelo la cual es posible modelarla de varias maneras, esto es criterio de diseñador.

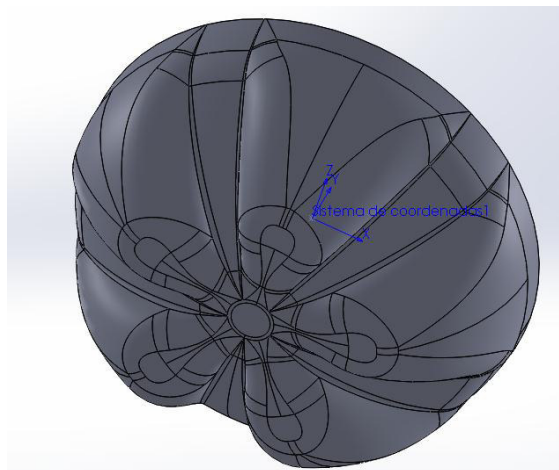


Fig. 40 Base el envase.

Una vez definido el sólido completamente (ver Fig. 39 izq.) se utilizó la herramienta de superficie a partir de un sólido ya que para el modelo que se utilizará será a partir de solamente superficies, así que el resultado final se parecía en la siguiente figura (ver Fig. 41).

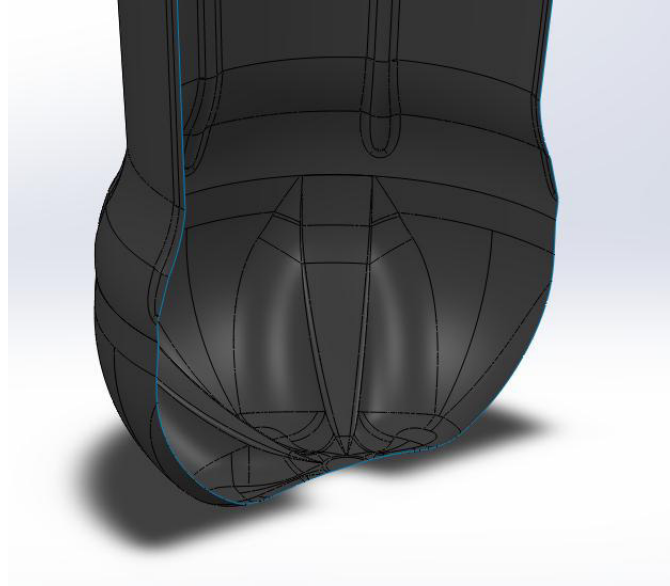


Fig. 41 Superficie con corte en plano xy.

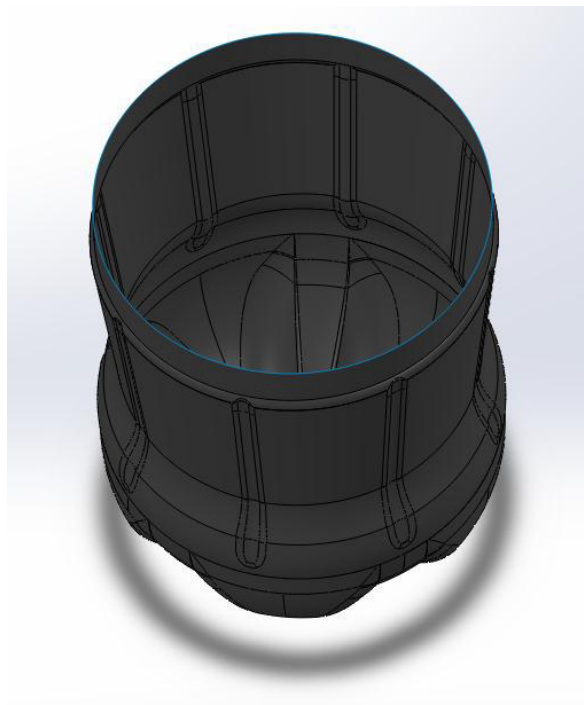


Fig. 42 Superficie con corte en plano xz.

Ahora, como se aprecia en las figuras anteriores se tiene la superficie que hará de la capa de plástico del envase, esta superficie adoptará un espesor con el fin de simular el espesor real de un envase plástico, ahora el modelo CAD cuenta con una superficie y un sólido en su interior, este sólido representará virtualmente el líquido contenido por el envase, este modelo de superficies se escogió basándose en un único criterio: con el fin de simplificar el modelo se busca que desde la geometría hasta las condiciones de contorno sean lo más exactas y simples para así no “cargar” el modelo de forma innecesaria, lo anteriormente dicho debe ser tomado con exactitud ya que una mala decisión haría que el modelo se desviara de la situación real, para el software Ansys® es más sencillo trabajar con modelos superficiales (cuando sea posible) que con sólidos ya que los elementos Shell (cáscara) se resuelven más fácilmente con resultados eficientes a comparación de elementos como solid 46.

Cuando se tiene el modelo se procede a exportarlo al Ansys®, para esto el mejor formato fue el parasolid (x_t), ya que los otros formatos de exportación presentaban problemas como aberturas entre la superficie y simplemente no aparecían los sólidos completos, luego de tener el modelo virtual en el módulo de geometría del Ansys®, se dividió los sólidos por la mitad y se inclinó a 45° ya que esta es la configuración definida por el colector solar (ver figura 43).

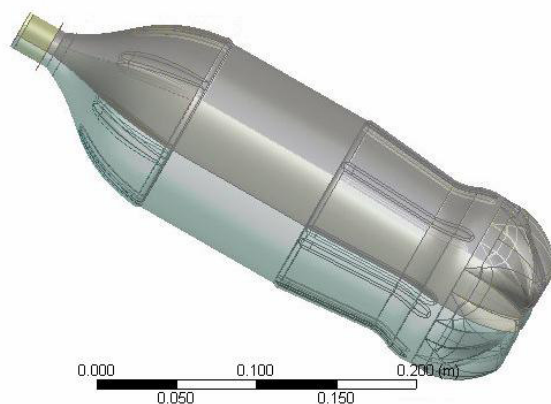


Fig. 43 Design modeler.

En la siguiente Figura 44, se apreciará el proceso complementario de modelado a través del módulo de diseño de Ansys®.

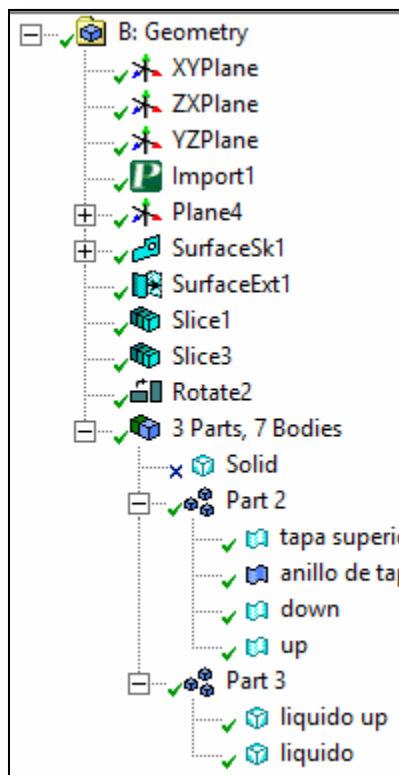


Fig. 44 Operaciones en DesingModeler.

4.3 Diseño en el módulo de mallado.

Ahora que se tiene el modelo CAD totalmente definido se procede al asunto del mallado en este punto no fue necesario utilizar un módulo especial ya que con el apartado de mallado que *Ansys®* tiene se obtuvieron resultados eficientes, ahora lo primero para el mallado fue definir el método con el cual el programa encontrará una solución para este modelo virtual, el mejor resultado lo arrojó el *Automatic Method* el cual definió elementos de tamaños apropiados en las zonas más críticas (curvaturas), igualmente el método respecto la continuidad del elemento, este mallado generado no hubiese sido posible de no ser por la herramienta “Virtual Topology” la cual se encarga de unificar áreas y aristas con el fin del facilitar el mallado.

Ahora los elementos definidos para este modelo fueron los siguientes:

- SHELL131: es un elemento cascaron 3D que tiene la capacidad de conducción térmica en el plano y a través del espesor, este elemento tiene cuatro nodos con hasta 32 grados de temperatura de libertad en cada nodo, este elemento cascaron es aplicable para análisis térmico 3D de estado transitorio y estacionario, Shell 131 genera temperaturas que pueden pasarse a los elementos de la estructura para modelar la flexión térmica [35].

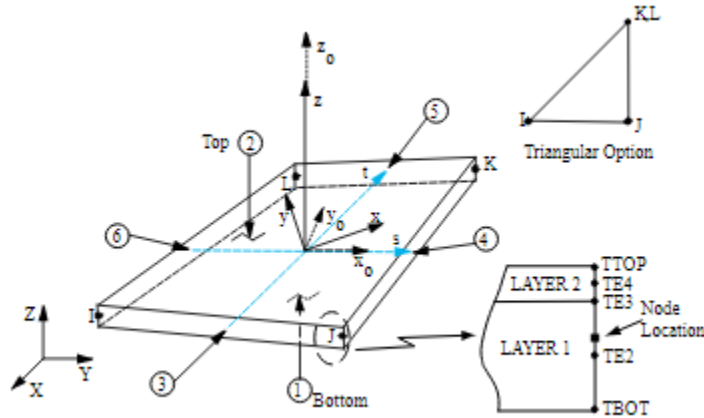


Fig. 45 Shell 131.

- SOLID87: es un elemento muy adecuado para modelar mallas irregulares (como las producidas a partir de varios sistemas CAD/CAM). El elemento tiene un grado de libertad, temperatura, en cada nodo, este elemento es aplicable a un análisis térmico tridimensional, de estado estacionario o transitorio [35].

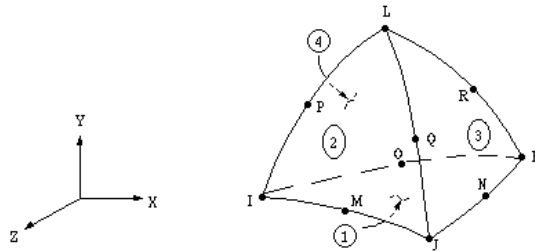


Fig. 46 Solid 87.

- CONTA174: se utiliza para representar el contacto y el deslizamiento entre las superficies objetivo tridimensional y una superficie deformable definida por este elemento. El elemento es aplicable a los análisis de contacto tridimensional estructural y de campo acoplado. Se puede usar tanto para contacto basado en pares como para contacto general.

El elemento tiene las mismas características geométricas que la cara del elemento solid o Shell, con la que está. El contacto ocurre cuando la superficie del elemento penetra una superficie objetivo asociada. Se permite la fricción de Coulomb, la fricción por tensión de corte, la fricción definida por el usuario con la subrutina USERFRIC y la interacción de contacto definida por el usuario con la subrutina USERINTER. El elemento también permite la separación del contacto unido para simular la delaminación de la interfaz [35].

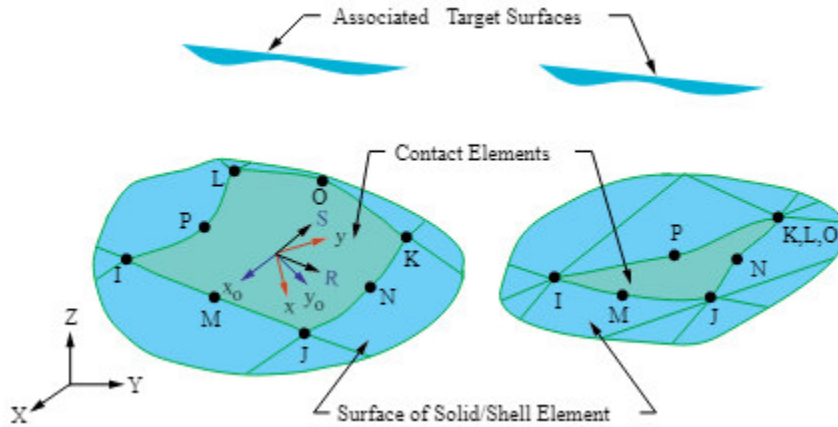


Fig. 47 Conta174.

- TARGE170: se usa para representar varias superficies 3-D “objetivo” para los elementos de contacto asociados (CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 y CONTA177). Los elementos de contacto se superponen a los elementos sólidos, de cascaron o de línea que describen el límite de un cuerpo deformable y potencialmente están en contacto con la superficie objetivo, definida por TARGE170.

Puede imponer cualquier desplazamiento traslacional o rotacional, temperatura, voltaje y potencial magnético en el elemento del segmento objetivo. También puede imponer fuerzas y momentos en los elementos objetivo. Para superficies objetivo rígidas, estos elementos pueden modelar fácilmente formas complejas de objetivos. Para objetivos flexibles, estos elementos se superpondrán a los elementos sólidos, de caparazón o de línea que describen el límite del cuerpo objetivo deformable [35].

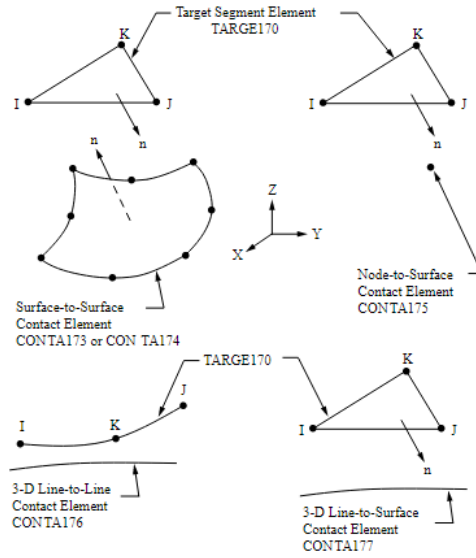


Fig. 48 Targe170.

Así finalmente el modelado del mallado tuvo el siguiente resultado gráfico:

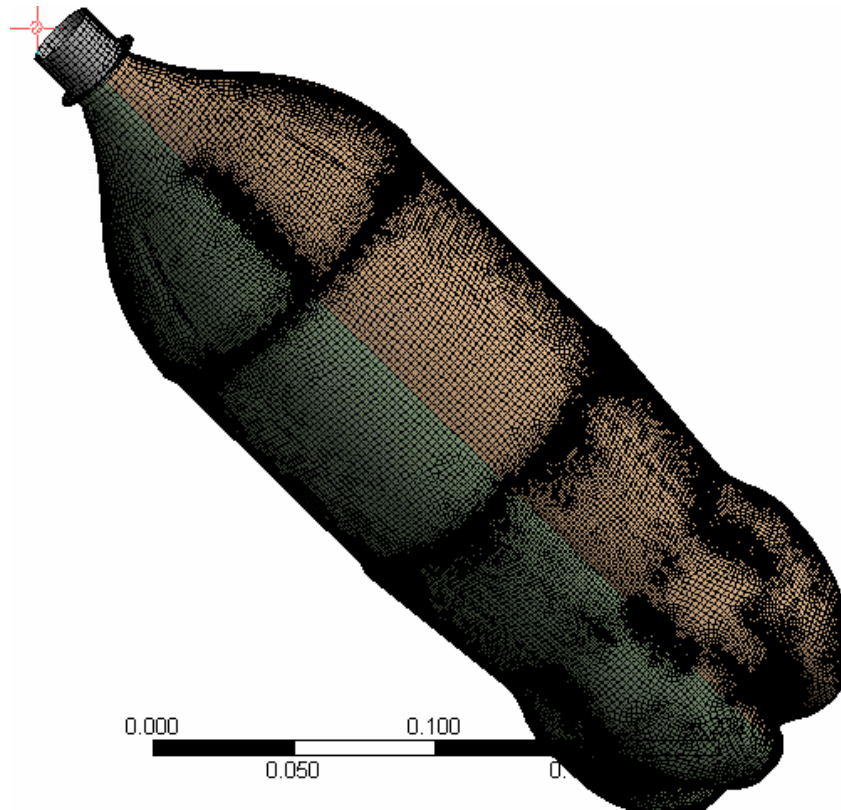


Fig. 49 Mallado general.

Como podemos apreciar en la Figura 49. Es algo complicado ver los elementos definitivamente ya que estos poseen un tamaño muy pequeño, este mallado cuenta con 52.701.139 de nodos y 3.844.171 de elementos, en las Figuras 50, 51 y 52 se mostrará de manera más específica la distribución de elementos para ciertas partes del modelo.

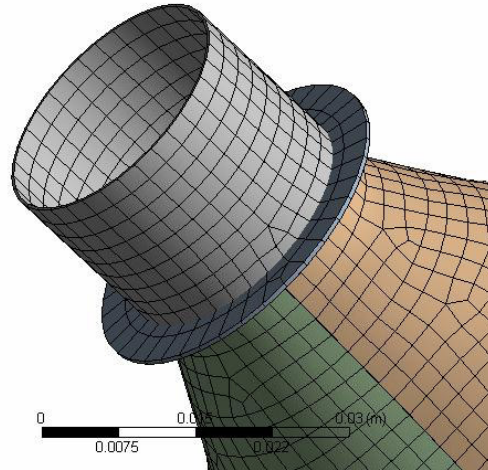


Fig. 50 Mallado parte superior.

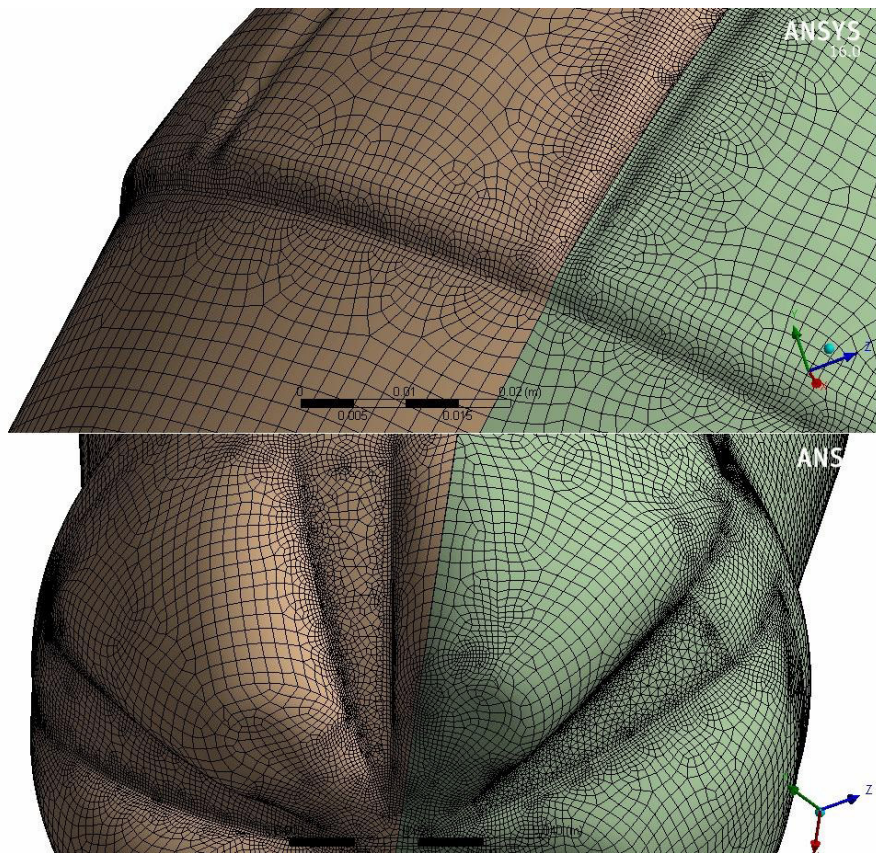


Fig. 51 Mallado parte media (sup.) base (inf.)

Finalmente se comprobó la eficiencia de los elementos que constituyen el modelo virtual, así comprobamos que el mallado es muy conveniente, ya que una gran cantidad de estos elementos se encuentran en una zona de 88% de calidad (ver Figura).

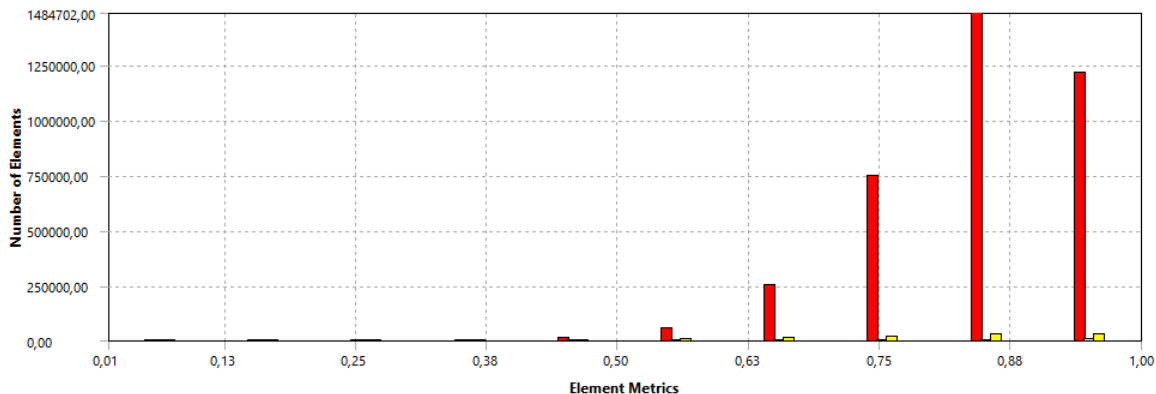


Fig. 52 Calidad de elementos average (84.57 %).

4.4 Módulo transitorio térmico (*Transient Thermal*).

El módulo “Transient Thermal” está diseñado para realizar análisis de tipo térmico, especialmente los efectos producidos por la temperatura, flujos de calor, etc. Para el caso de esta investigación se aplicaran perfiles de temperatura los cuales fueron adquiridos de la investigación paralela “estudio térmico-fluido dinámico de un prototipo nivel laboratorio de un calentador solar que reutiliza botellas de plástico”[5] este proyecto se enfatizó en hacer un estudio térmico-fluido para un prototipo construido con una impresora 3D para ver al eficiencia que el modelo sería capaz generar, ahora en cuanto a las temperaturas esta investigación en cuestión utilizo un método para la adquisición de las mismas, este método consiste en utilizar una cámara termográfica, la cual es capaz de captar con bastante precisión gradientes de temperatura sobre cuerpos, una cámara de este tipo tiene una sensibilidad térmica de 0.1°C a 25°C y su rango de temperatura de operación es de -20°C a 250 °C (ver Figura 53).



Fig. 53 FLIR E5 thermal camera.

El proceso que se realizó para la obtención de datos fue exponer el modelo diseñado a un día promedio bajo las condiciones climáticas, así la cámara podría registrar la variación térmica sobre este, las tomas se realizaron cada 900 segundo para así obtener un total de 85.500 segundos lo cual básicamente cubriría la toma de datos para un día completo. A continuación mostraremos algunas tomas obtenidas y brindadas por la investigación anteriormente mencionada, estas tomas son aleatorias (tiempo).

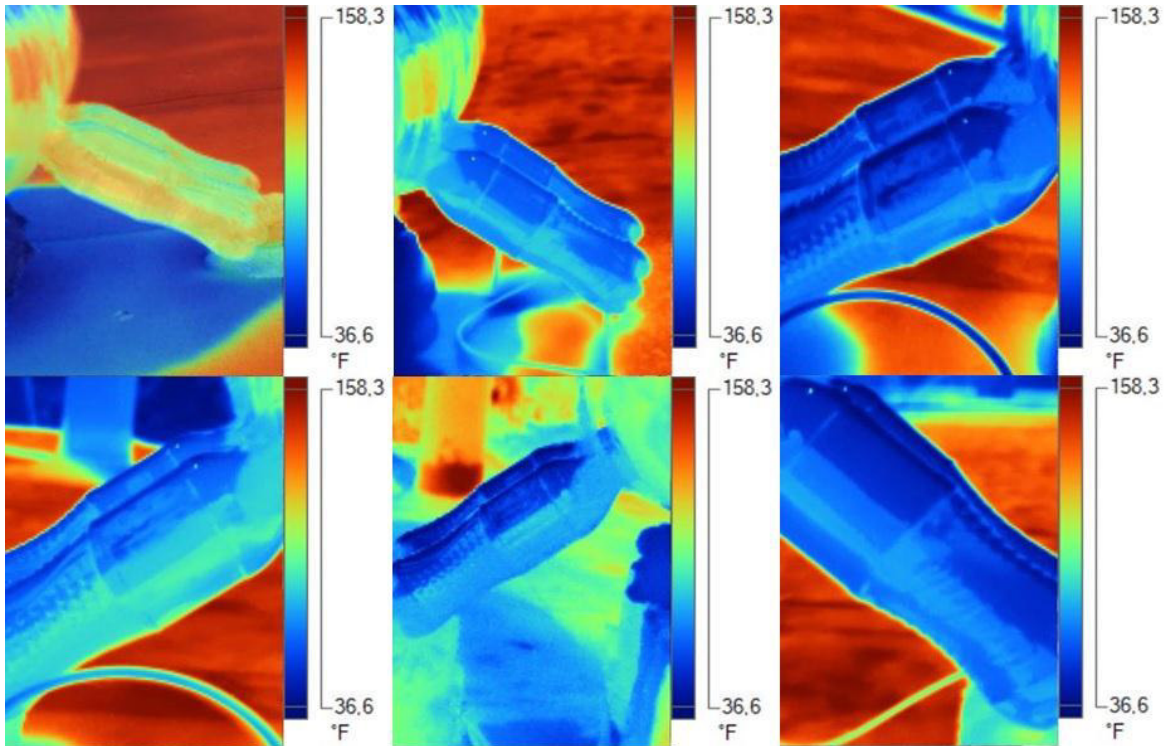


Fig. 54 Tomas aleatorias de temperatura [5].

Es claro ver que bajo las condiciones térmicas a las cuales está sometido el envase este muestra una diferencia de gamma de colores, la cual implica un cambio de temperatura

entre la cara superior e inferior del envase (ver Figura 54), esto es nuestro punto de partida para asignar las temperaturas sobre el modelo virtual, aunque los perfiles no están distribuidos simétricamente totalmente para una primera intensión de modelo en esta investigación se asignaron así, tratando de simplificar el modelo y claramente pensando en que no se desvié de la realidad lo que podría conllevar a resultados incorrectos, lo anteriormente dicho lo podremos visualizar de una mejor manera en la Figura 55.

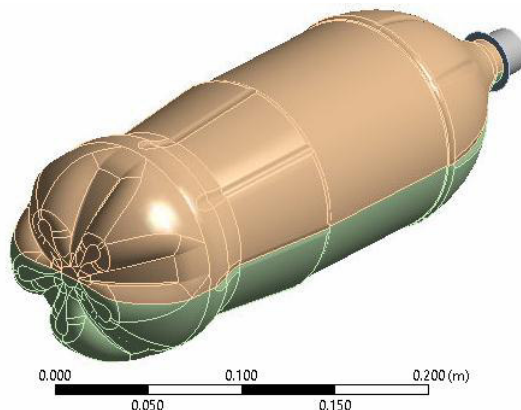


Fig. 55 Envase dividido simétricamente.

Una vez aclarado la razón del porque fue dividido el envase a la mitad, se procede a la asignación de temperaturas lo cual implica agregar pasos de carga en intervalos de 900 segundos, que fue el tiempo en el cual se tomaron las muestras, para ello se debe configurar el módulo “Analysis Settings” de la siguiente manera:

Details of "Analysis Settings"	
<input checked="" type="checkbox"/> Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	85500 s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Initial Time Step	855, s
Minimum Time Step	85,5 s
Maximum Time Step	8550, s
Time Integration	On

Fig. 56 Analysis Settings.

Así se generaran 96 pasos con intervalos de 900 segundos lo cual corresponde a los intervalos de temperatura que se tienen, ahora bien se tienen 4 perfiles de temperatura para un día completo, estos perfiles corresponden a la parte interior y exterior de cada mitad del envase estas se asignarán individualmente para finalmente obtener el siguiente resultado gráfico (Ver Fig. 57):

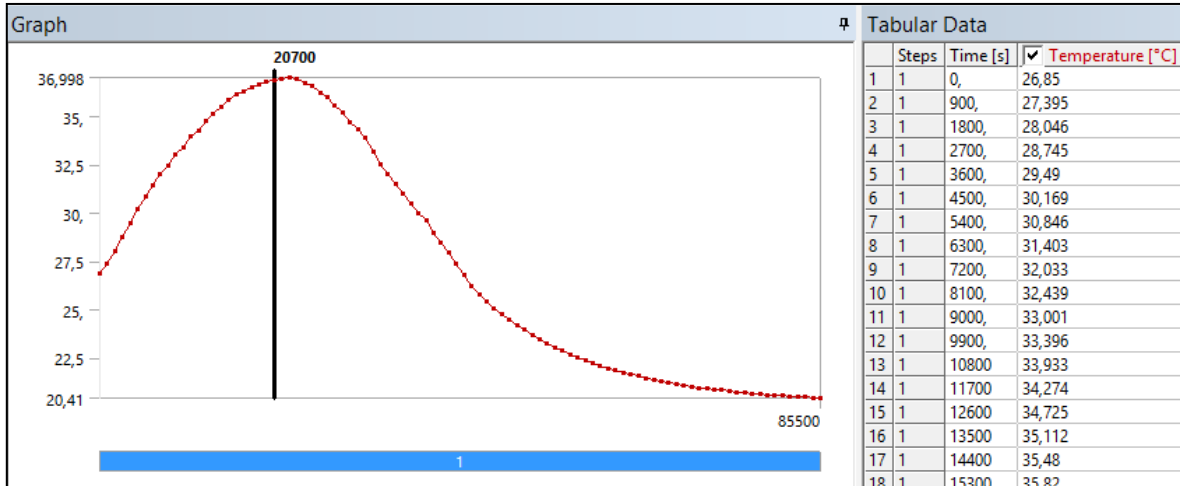


Fig. 57 Perfil de temperatura externo cara superior.

Este proceso es necesario porque de esta forma podemos analizar la evolución estructural y térmica según los perfiles de temperatura asignados, y también poderlo analizar para un momento puntual, como es claro de visualizar en la Figura anterior existe un pico de temperatura que es 39.84 °C una temperatura que corresponde aproximadamente a la 1 pm (hora central de México).

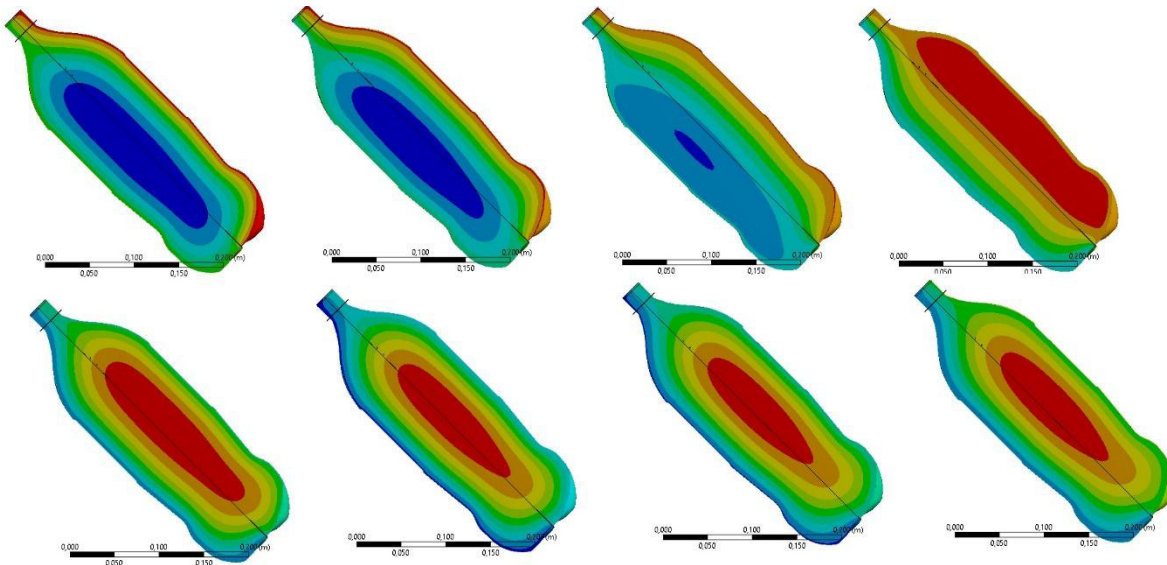


Fig. 58 Perfiles de temperatura a través un día.

Estos serán básicamente los efectos obtenidos únicamente por el módulo térmico ahora que se tienen estos resultados, es necesario acoplar este módulo y el módulo estructural lo cual se mencionará con mayor detalle en el siguiente apartado.

4.5 Módulo Transitorio Estructural (Transient Structural).

El módulo “Transient Structural” está diseñado con el fin de aplicar cargas estructurales como son fuerzas, presiones, fuerzas hidrostáticas, varios tipos de restricciones, etc. así entonces se hace uso de un “One-way Coupling” (acoplamiento de una vía) este tipo de acoplamiento significa que los datos de un módulo serán transferidos al siguiente de manera unidireccional con el fin de combinar los efectos de la parte térmica y la parte estructural este acople se puede ver en la siguiente figura.

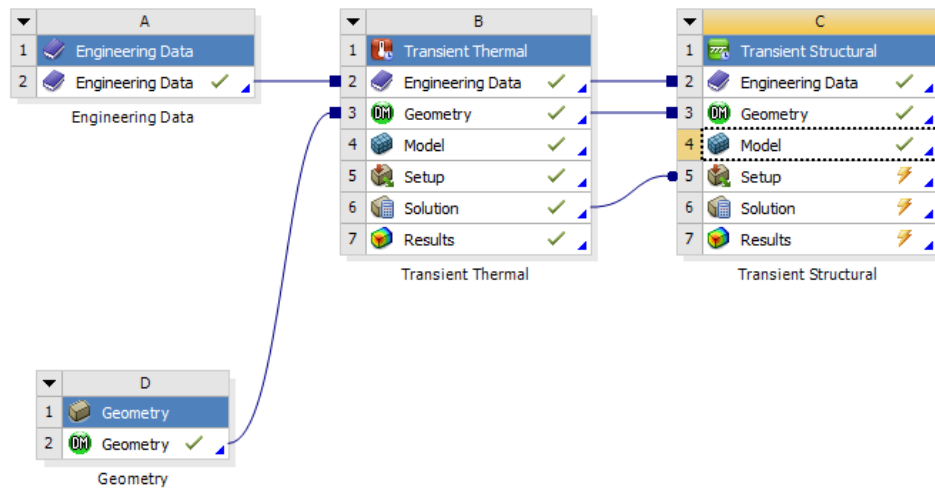


Fig. 59 Acoplamiento en una vía (One-way coupling).

En la Figura 59 vemos como del módulo B comparte la “Engineering Data”, la geometría y el apartado de solución el cual contiene todos los resultados referentes a este análisis térmico, una vez compartida esta información el módulo C importa los resultados en cada uno de los pasos de carga y los combina junto a la solución del módulo “Transient Structural” para así obtener un resultado de deformaciones y esfuerzos combinados de todos los efectos.

4.5.1 Condiciones de Frontera para el modelo final.

Ahora en este apartado nos corresponde fijar las condiciones de frontera que hará de este un caso específico y lo aproximará lo más posible al modelo real, la primera condición de frontera es la que se puede visualizar en la Figura 60 donde se simula el agarre del envase al tanque principal del modelo.

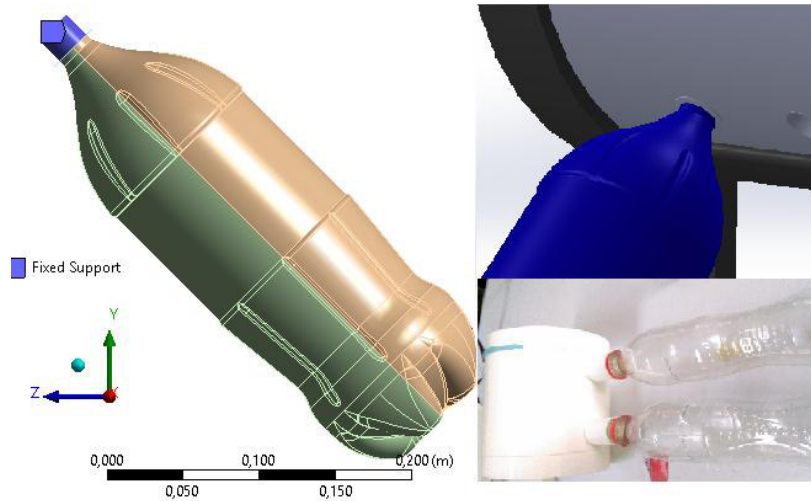


Fig. 60 Soporte fijo (Fixed support).

La siguiente condición de frontera es la fuerza hidrostática ejercida por el líquido que contiene el envase, a conveniencia del usuario se tiene un módulo para aplicar este tipo de fuerzas, los datos de entrada para este módulo son el área de contacto del líquido, en caso de ser una superficie si la aplicación es por la parte externa o interna (Top Or Bottom), densidad del fluido $[\frac{Kg}{m^3}]$, dirección y magnitud de vector gravedad y finalmente la altura bajo la cual estaría el modelo (ρgh), estas variables las veremos aplicadas en la siguiente figura:

Details of "Hydrostatic Pressure"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	514 Faces
Shell Face	Bottom
Definition	
Type	Hydrostatic Pressure
Coordinate System	Global Coordinate System
Suppressed	No
<input type="checkbox"/> Fluid Density	1000, kg/m ³
Hydrostatic Acceleration	
Define By	Components
<input type="checkbox"/> X Component	0, m/s ² (step applied)
<input type="checkbox"/> Y Component	9,81 m/s ² (step applied)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, m/s ² (step applied)
Free Surface Location	
<input type="checkbox"/> X Coordinate	0, m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0,4 m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0, m

Fig. 61 Detalles de la presión hidrostática.

Una vez configurada la información tal cual como muestra la Figura 61, gráficamente la fuerza se verá aplicada como lo muestra la Figura 62, donde se ve el perfil de presiones para el líquido configurado, donde respecto al eje Y se tomara en cuenta la magnitud y dirección de la profundidad de la columna de líquido, La ecuación que rige estas presiones es: $P = \rho gh$.

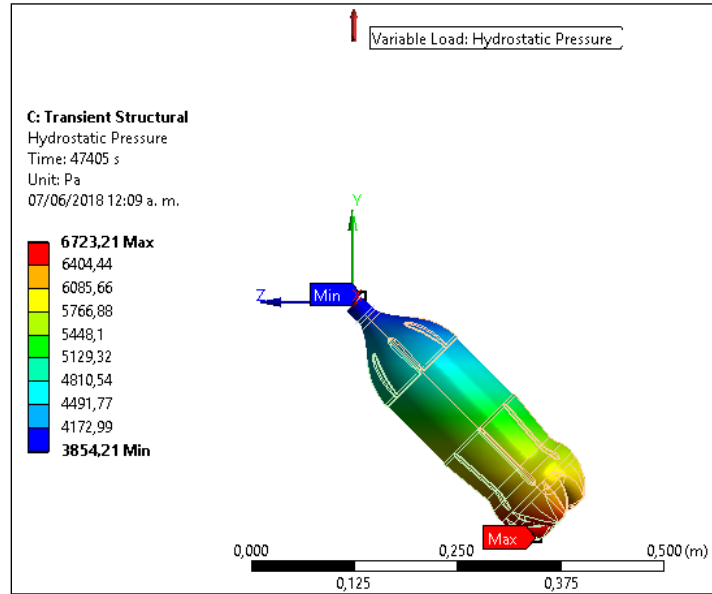


Fig. 62 Perfil de presiones hidrostáticas.

4.5.2 Importación de perfiles de temperatura.

Una vez realizados las anteriores condiciones de frontera se procede a la importación de la información térmica, adquirida en el módulo “Transient Thermal” para ello basta con buscar la carpeta de importación y asignar los sólidos que deseamos cargar su información térmica (Ver Figura 63) para nuestro caso solamente se asignará a toda la superficie ya que este módulo no trabaja con sólidos designados con características de fluidos, para compensar esta parte de la simulación se adicionó la condición de frontera de la fuerza hidrostática anteriormente mencionada.

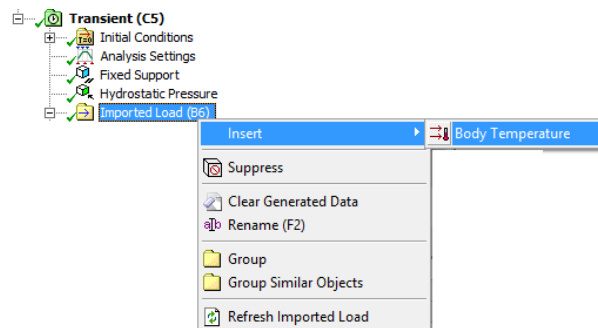


Fig. 63 Imported Load.

Una vez realizado esta etapa es de suma importancia revisar algunos datos importantes como el número de nodos, cantidad de nodos mapeados, porcentaje de nodos mapeados etc. En la siguiente figura mostraremos la tabla estadística de los resultados para 1 (tapa superior) de las 4 partes que se les realizó una importación de temperaturas, es posible evidenciar que se llevó un proceso adecuado tanto en el mallado previo como en la importación de temperaturas respectiva.

Target Body	Source Material Id	Volume Difference (%)	Distance Between Centroids (m)	Bounding Box Diagonal (m)	Distance Between Centroids/Bounding Box Diagonal (%)
tapa superior	1	3.8278e-007	1.3182e-006	5.0197e-002	2.626e-003

Using multiple cores: [Yes]
 Number of cores requested: 30

Number of source nodes: 352
 Number of target nodes: 352

Number of nodes mapped : 352
 Number of nodes not mapped : 0
 Number of nodes outside : 0

Percent nodes mapped: 100%
 Weight calculation time: 0.106 (s)
 Interpolation time: 0.536 (s)

Fig. 64 Fuerza importada (1 de 4).

CAPITULO 5

La metodología anteriormente aplicada fue fundamental para la obtención de resultados que se mostrarán en el siguiente capítulo. Los resultados corresponden a los tres casos de análisis previamente mencionados (lote 1, lote 2, lote 3), se presentará una comparativa en los resultados de cada uno de estos para así concluir la incidencia de los efectos termo-estructurales sobre el modelo.

ANALISIS DE RESULTADOS

- 5.1 Datos experimentales por lote.
- 5.2 Resultados para lote 1.
- 5.3 Resultados para lote 2.
- 5.4 Resultados para lote 3.
- 5.5 Compilación y análisis de resultados.
- 5.6 Programación para el modelo de predicción.

Capítulo 5
Análisis de resultados.

5.1 Datos experimentales por lote.

En el capítulo 3 se habló de cómo fue la realización de las pruebas experimentales para la obtención de datos y su posterior adaptación y validación del modelo constitutivo, los resultados para cada lote (ver Figura 65) fueron graficados para así poder evidenciar la tendencia del módulo de elasticidad, el cual incrementó a causa de las condiciones de degradación a las cuales fue sometido el material, este resultado como se esperaba fue causado ya que los plásticos cuando se someten a degradación tienden a cristalizarse lo cual implica un incremento en la fragilización del material, el incremento porcentual del lote 1 al lote dos fue del 18.5% mientras que del lote dos al tres fue del 7.4% una tendencia de estabilización por parte de esta variable.

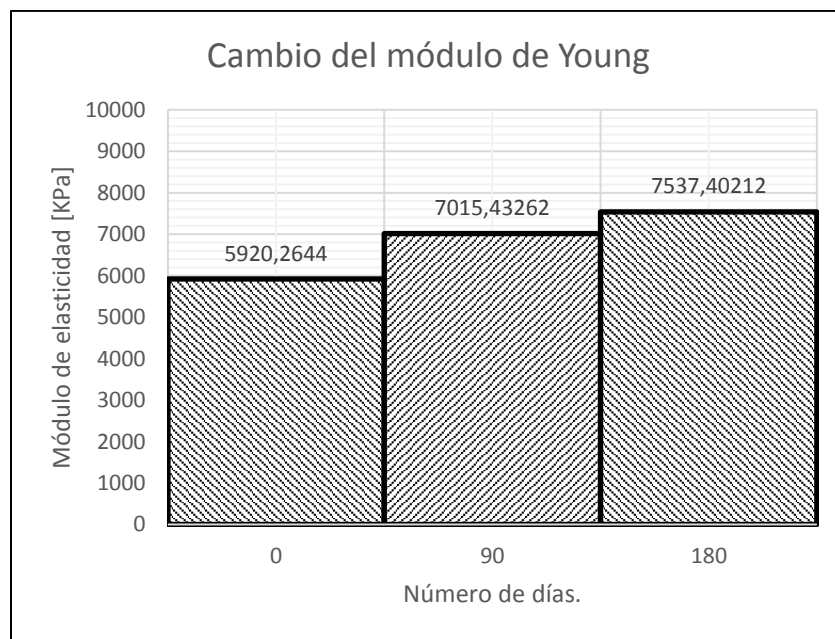


Fig. 65 resultados módulo de elasticidad.

5.2 Resultados para lote 1.

Como se mencionó en capítulos anteriores, las condiciones de carga aplicadas para el modelo en el lote 1, consta de cuatro perfiles de temperatura transitorios (1 día) aplicados sobre las caras tanto internas como externas del envase, recolectados con la ayuda de una cámara captadora de temperaturas (Temperatura máxima alcanzada 40°C), una presión hidrostática aplicada sobre todas las caras internas teniendo en cuenta una altura medida desde la boquilla del envase de 0.35 metros, y finalmente se adaptó el modelo constitutivo previamente validado con el fin de que la respuesta fuera lo más semejante a la realidad.

Para lograr la convergencia de los resultados del análisis se presentaron ciertas dificultades debido a las no linealidades presentes en el modelo, así que se realizó un seguimiento de guías para generar una correcta solución, ahora bien en la siguiente figura se mostrará las curvas de convergencia para la fuerza y el desplazamiento, estas muestran para cada uno el comportamiento de los residuos para alcanzar la convergencia basados en la norma $L2$ la cual se define como la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de los residuos, la cual se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$|\{R\}|_2 = \left(\sum R_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Donde:

R_i = Componentes del vector de residuos R.

Ahora bien el vector de residuos es representado por la siguiente ecuación:

$$\{R\} = \{F_n^a\} - \{F_{n,i}^{nr}\} \quad (15)$$

Donde:

$\{R\}$ = Vector de residuos.

$\{F_n^a\}$ = Vector de cargas aplicadas en el subpaso de carga n .

$\{F_{n,i}^{nr}\}$ = Vector de fuerzas obtenidas en el subpaso de carga n , iteración i

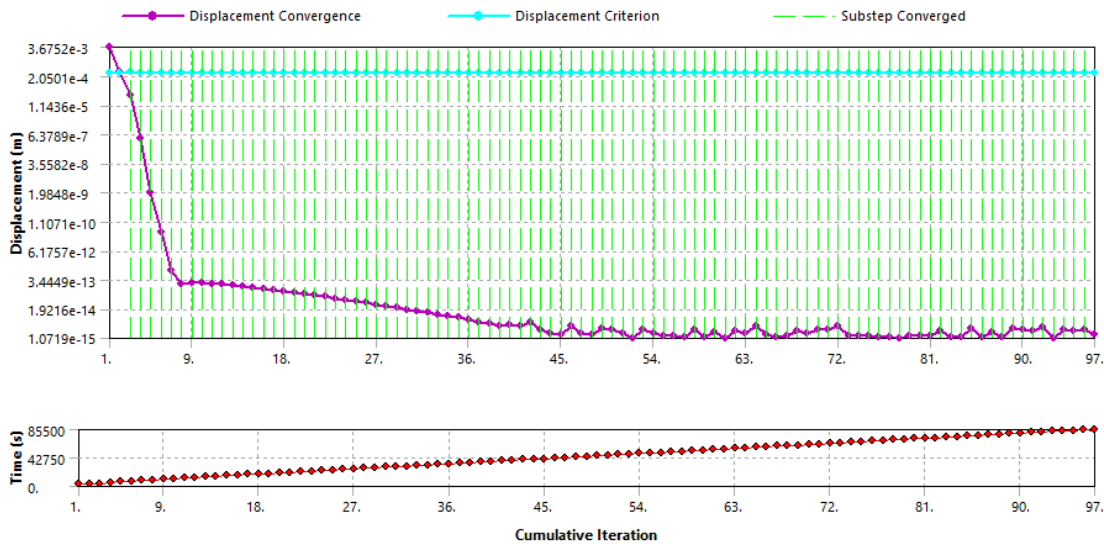


Fig. 66 Curva de iteración (Desplazamiento).

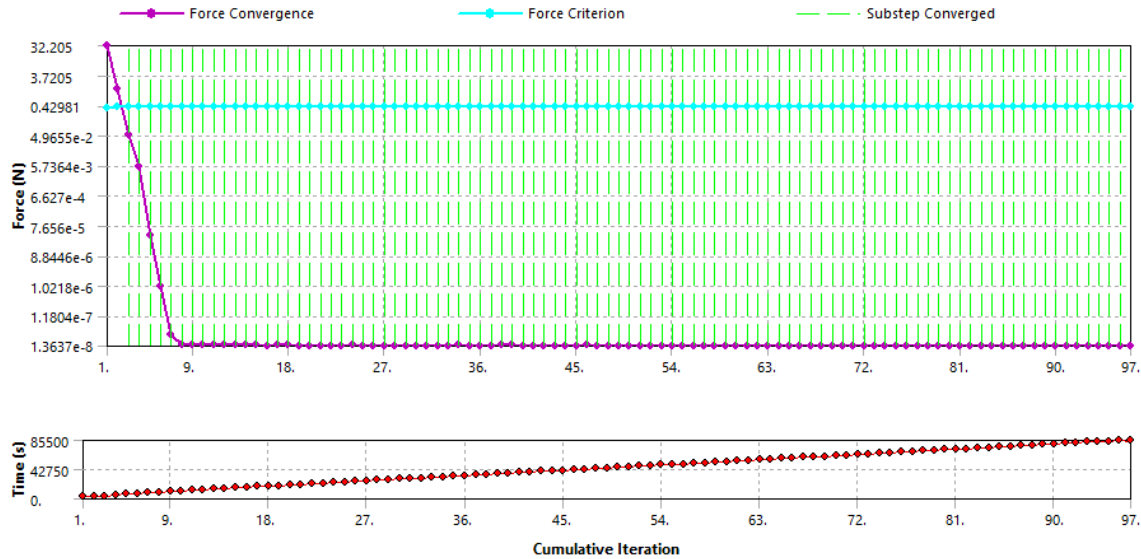


Fig. 67 Curva de iteración (Fuerza).

Como se ve en las figuras 66 y 67 la convergencia tanto para el desplazamiento como para la fuerza fueron acertados ya que para cada iteración la variable de fuerza de convergencia (línea morada, fig. 67) o la variable desplazamiento de convergencia (línea morada, fig. 66) se encuentra por debajo del criterio lo cual significa que para esa iteración si hay convergencia.

Una vez obtenida la convergencia para la solución, el siguiente paso es el postprocesamiento de resultados. Para esto es necesario inicialmente seleccionar cuáles serán los criterios para la evaluación de estos resultados, si el esfuerzo o los desplazamientos, el criterio de falla etc. Siempre buscando el más conveniente a la hora de generar resultados útiles. Para este proyecto se busca saber hasta qué momento bajo las condiciones termo-estructurales el envase no resistirá más o simplemente su deformación llego a un punto donde el envase no pueda trabajar en condiciones óptimas afectando la eficiencia del colector solar reciclable, por estas razones es necesario analizar el esfuerzo y las deformaciones que se producen al aplicar y someter el envase bajo diferentes condiciones termo-estructurales.

Los esfuerzos de *Von Mises* obtenidos para el caso del primer lote, se presentan gráficamente en las siguientes figuras.

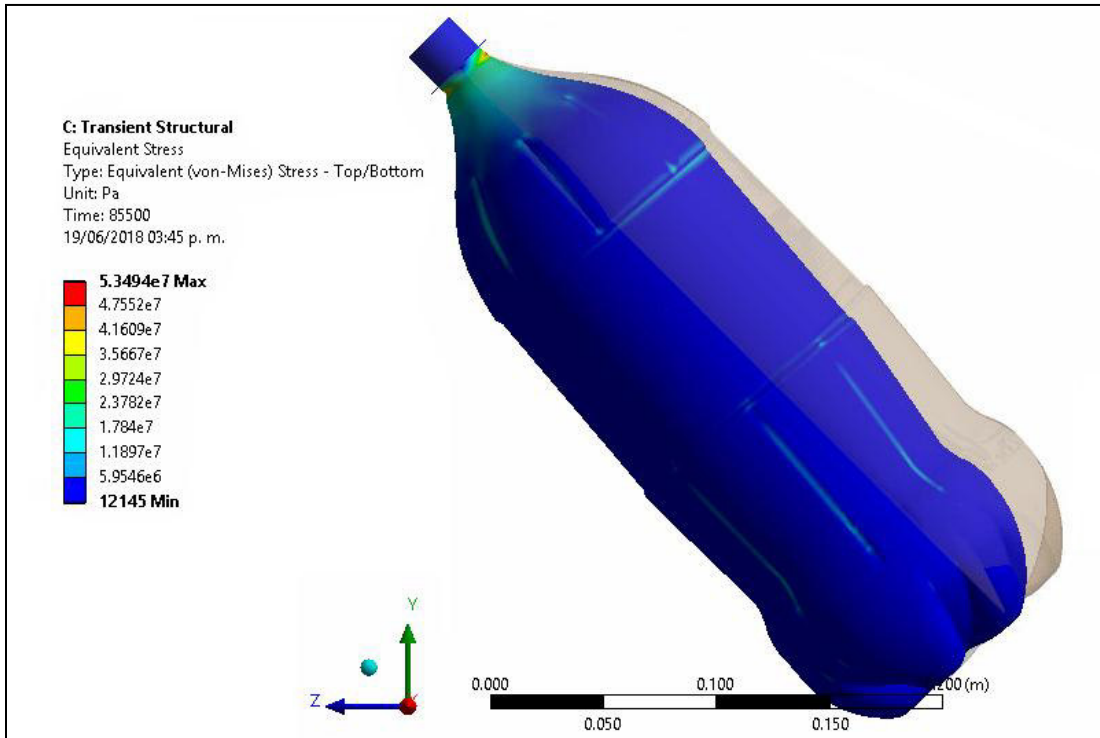


Fig. 68 Distribución de esfuerzos de Von Mises para lote 1, [Pa] [5.4 Autoscale].

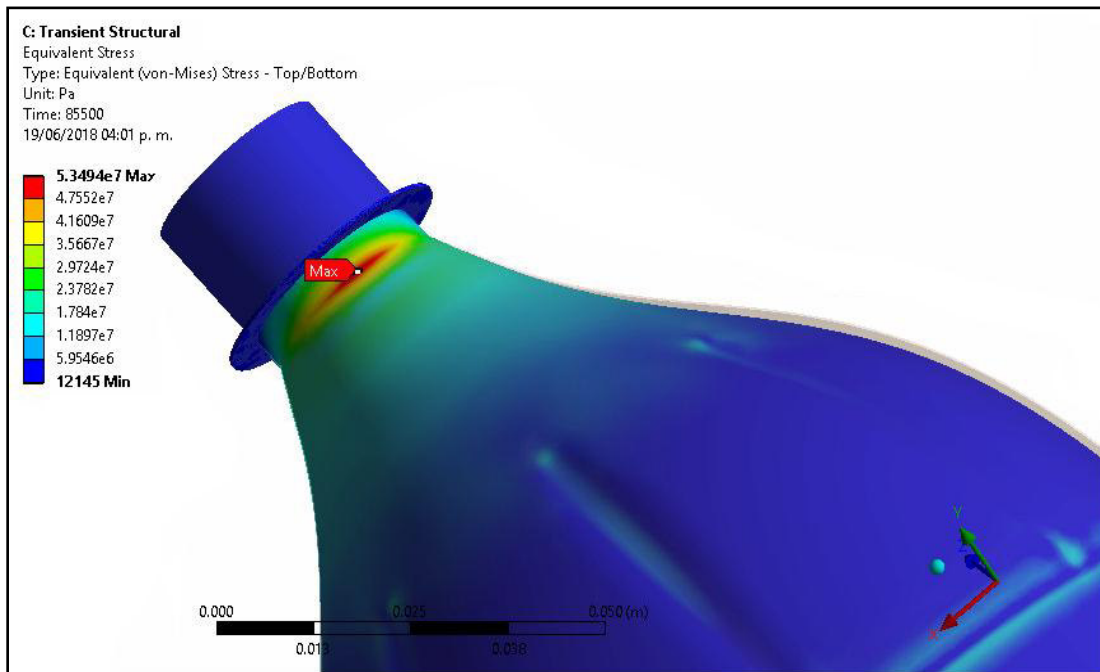


Fig. 69 Distribución de esfuerzos de Von Mises para lote 1, zona de máximo valor, [Pa] [Autoscale].

En las figuras 68 y 69 se muestran los esfuerzos máximos presentados en el envase con una magnitud de 53.494 MPa presentados en la zona llamada cuello de la botella, esto debido a que es una zona de diámetro estrecho a comparación del resto del envase, de igual forma es posible evidenciar que los efectos termo-estructurales afectan el envase en áreas de curvatura pronunciada con valores de 17.84 Mpa aproximadamente.

En las siguientes figuras se mostrará el valor de desplazamiento total junto con la deformación unitaria.

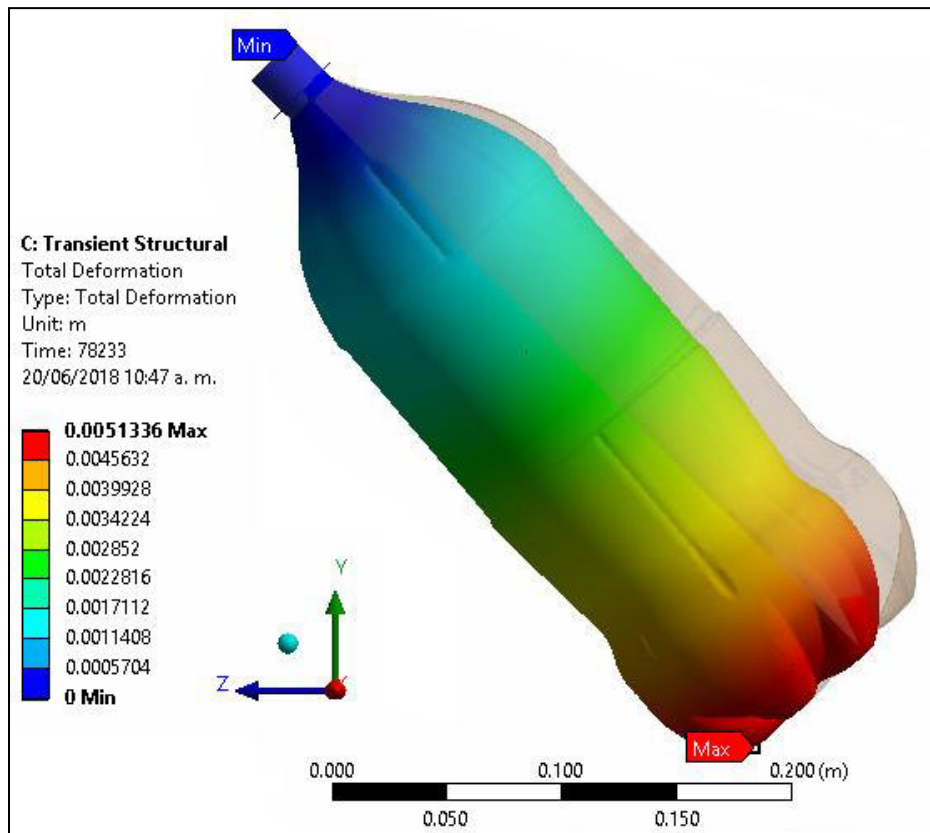


Fig. 70 Desplazamiento total del envase lote 1. [m] [5.4 Autoscale].

En la Figura 70 se pueden evidenciar deformaciones máximas de 5.1336 mm en la parte baja del envase esto claramente debido a efectos térmicos y adicionalmente a efectos estructurales como la fuerza hidrostática presente en el modelo, la sección más baja del modelo tiene el gradiente de presiones más alto con un valor de 6226.4 Pa y esto se ve reflejado en la deformación del envase.

Ahora bien la deformación unitaria es la relación que existe entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, de acuerdo a esto la relación más alta para el modelo en cuestión se dio nuevamente en el cuello de la botella con un valor de $0.010242 \frac{\text{m}}{\text{m}}$.

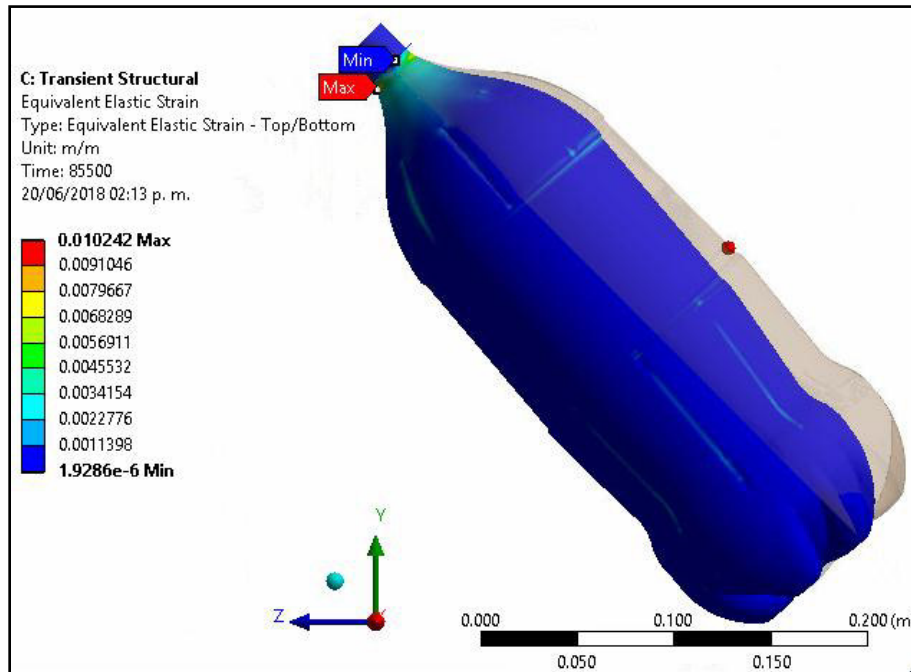


Fig. 71 Deformación unitaria. $[\frac{m}{m}]$ [Autoscale 5.4].

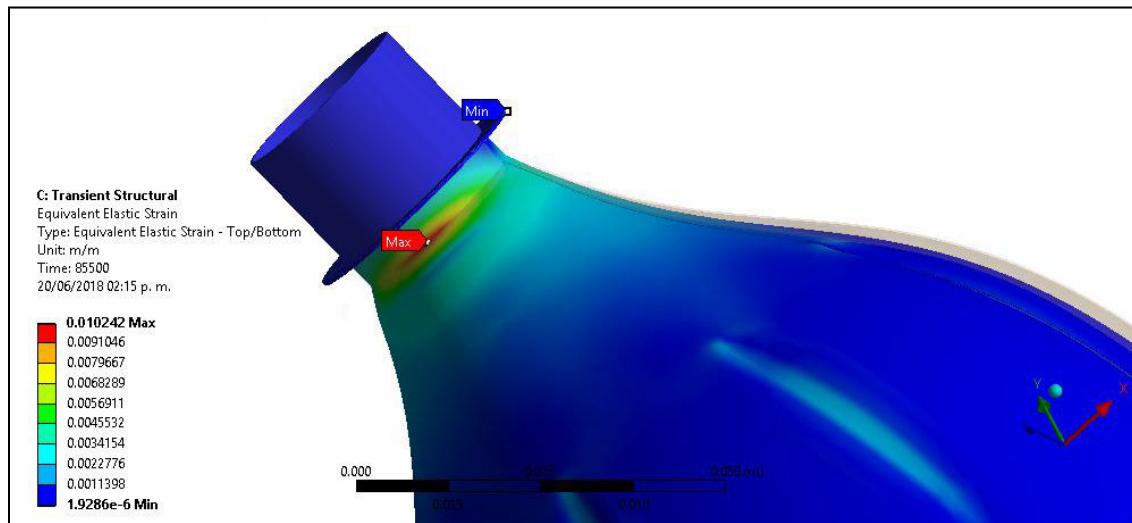


Fig. 72 Deformación unitaria área de valor máximo. $[\frac{m}{m}]$ [Autoscale 5.4].

5.3 Resultados para lote 2.

Para este apartado mostraremos los resultados gráficos en el mismo orden que se hizo en el apartado 5.2, para empezar el esfuerzo de *Von Mises* se tiene un valor máximo de 56.119 MPa.

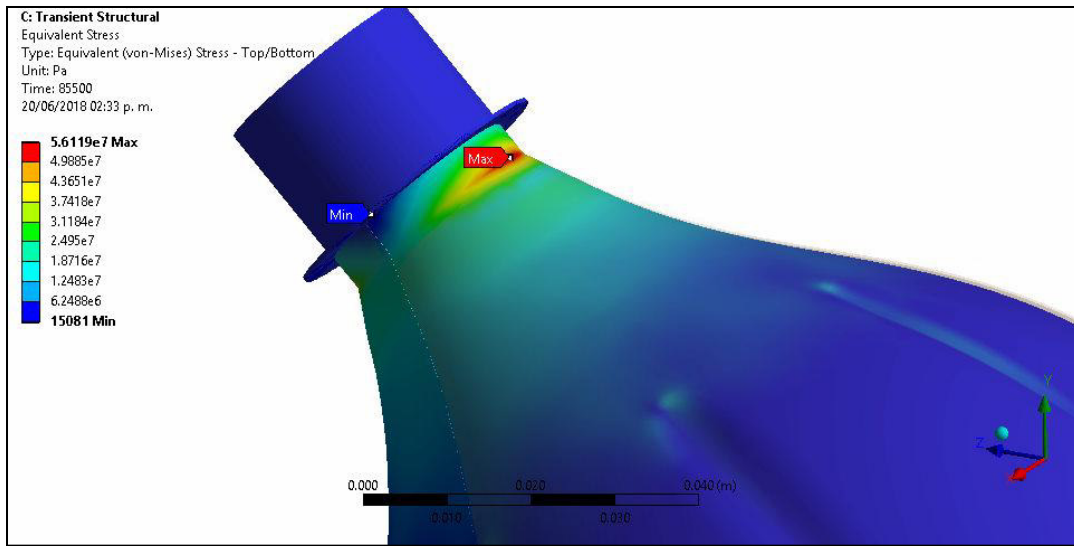


Fig. 73 Esfuerzo de Von Mises máximo para lote 2. [Pa].

En la Figura 74 se aprecia un valor de $0.0082105 \frac{m}{m}$ para la deformación unitaria, nuevamente está ubicado en el cuello del envase como es de esperarse el hecho de que el material se esté fragilizando su capacidad de deformación disminuye.

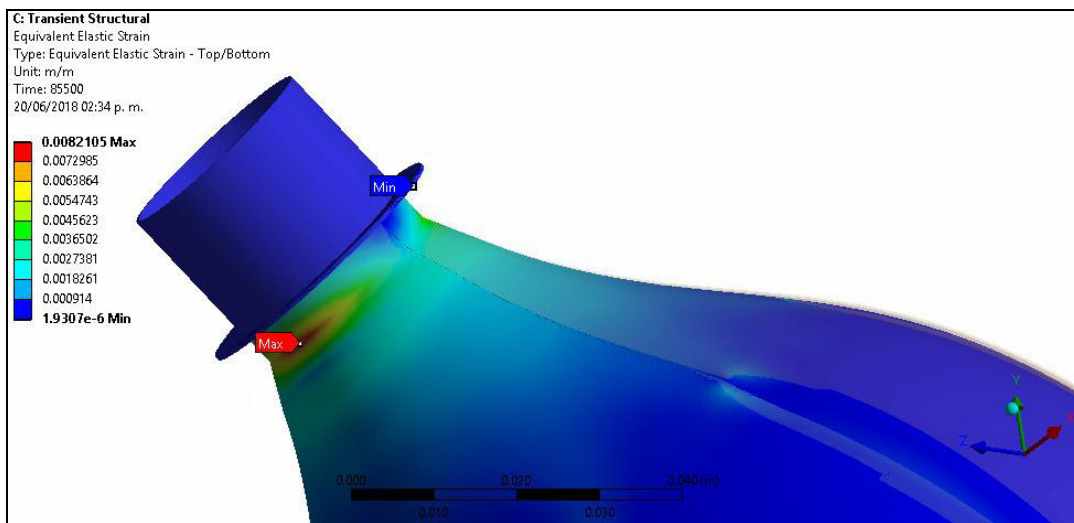


Fig. 74 Deformación unitaria para lote 2. [$\frac{m}{m}$].

La deformación total presenta un valor máximo de 4.132 mm nuevamente ubicado en la base del envase.

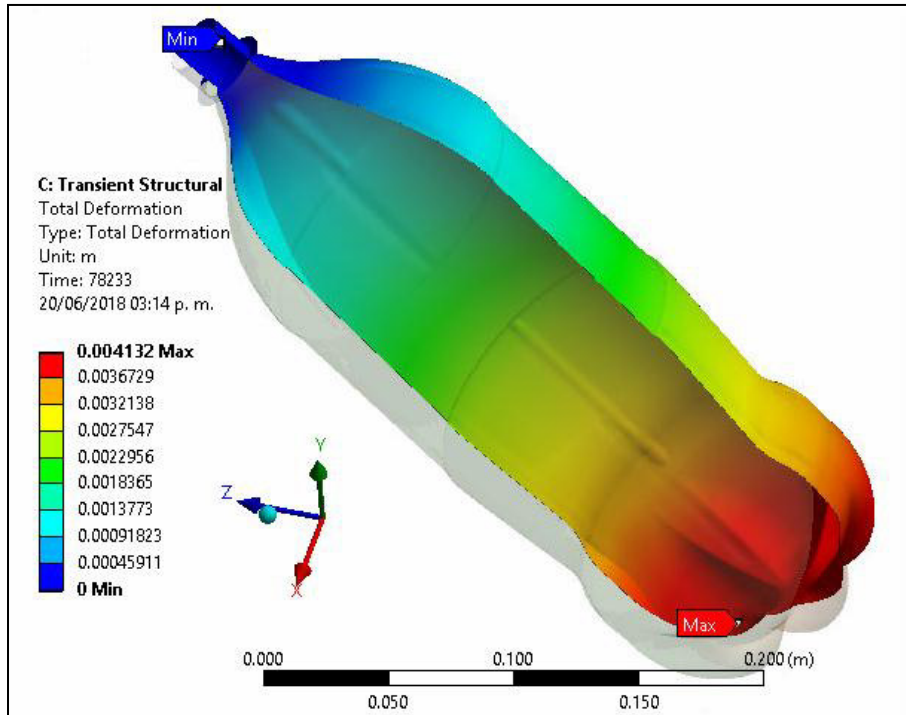


Fig. 75 Deformación total lote 2, corte en el eje medio. [m] [Autoscale 5.4].

5.4 Resultados para lote 3.

Para el ultimo lote sometido a 6 semanas de exposición se obtuvo un esfuerzo de *Von Mises* de 57.354 MPa como se podrá apreciar en la Figura 76.

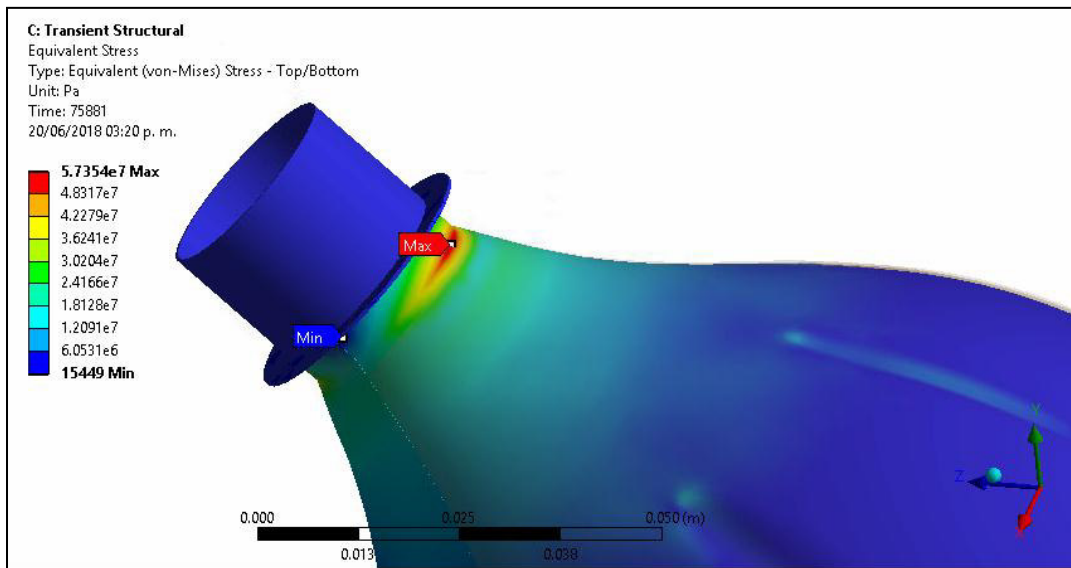


Fig. 76 Esfuerzos de Von Mises para lote 3. [Pa].

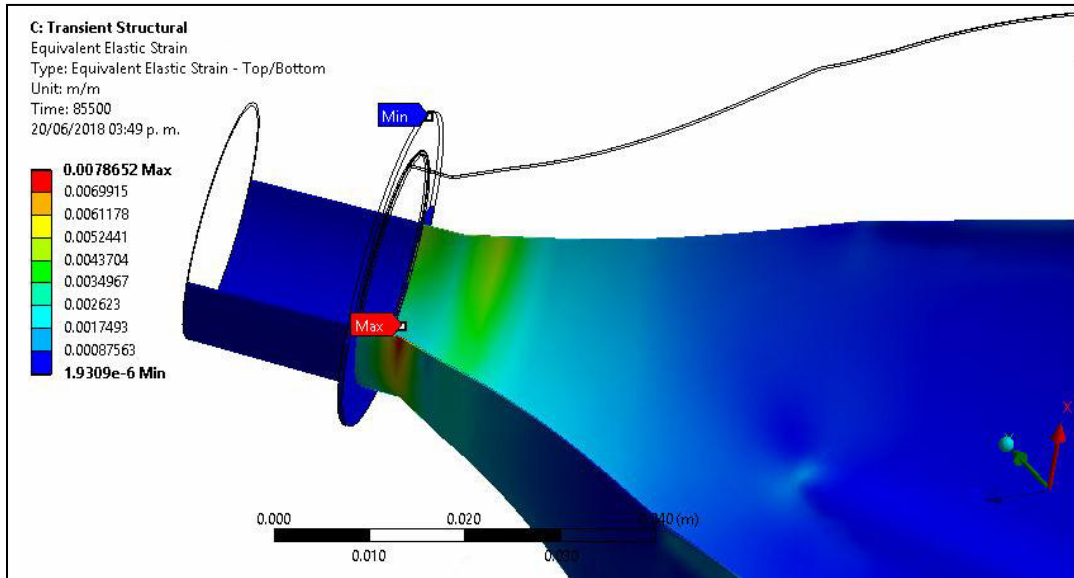


Fig. 77 Deformación unitaria para lote 3. [$\frac{m}{m}$].

Para el lote tres se tiene una deformación unitaria de $0.0078652 \frac{m}{m}$ siguiendo la tendencia de disminución que se ve a través de los resultados de los lotes previos y finalmente tenemos la deformación total para el modelo la cual alcanza un valor de 4.0339 mm .

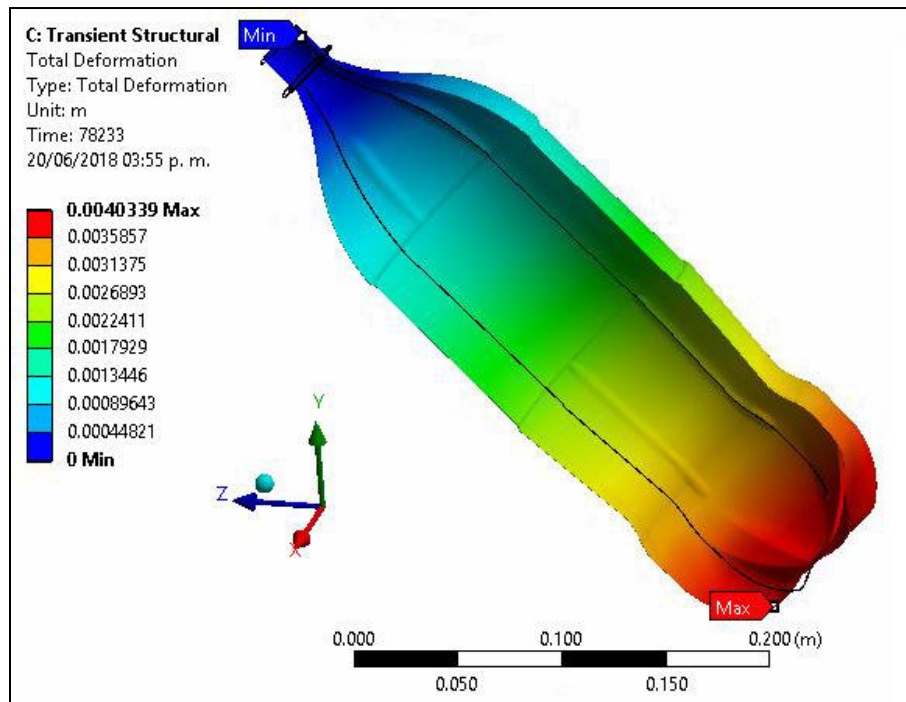


Fig. 78 Deformación total para lote 3. [m].

5.5 Compilación y análisis de resultados.

Finalmente, los esfuerzos máximos y desplazamientos obtenidos en los diferentes casos de estudio del modelo virtual, considerando las condiciones anteriormente mencionadas, se presentan los resultados en la tabla 3.

Tabla 3 Esfuerzo máximos y desplazamientos obtenidos (Valores máximos).

Parámetro	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Esfuerzo Von Mises [MPa]	53,49	56,119	57,35
Deformación unitaria [m/m]	0,010242	0,0082105	0,0078652
Deformación total [mm]	5,1336	4,132	4,0339
Porcentaje de alargamiento [%]	14,915	14,54	11,17

El primer parámetro a analizar es el esfuerzo de von Mises el cual anteriormente se mencionó que es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión, como podemos apreciar entre más tiempo se expuso el material a las condiciones climáticas este aumento su magnitud, esta variable es comparable ya que los valores máximos se presentaron en el mismo lugar (cuello de botella), ahora se puede apreciar que el esfuerzo aumento del lote uno al lote dos un 4.89% mientras que del lote dos al tres aumento un 2.2 %, esto indica que el esfuerzo producido por las condiciones termo-estructurales crece a medida del tiempo de exposición, pero tiende a disminuir el gradiente de crecimiento, se podría esperar que este valor de esfuerzo aumente hasta que el material entre en una zona de falla.

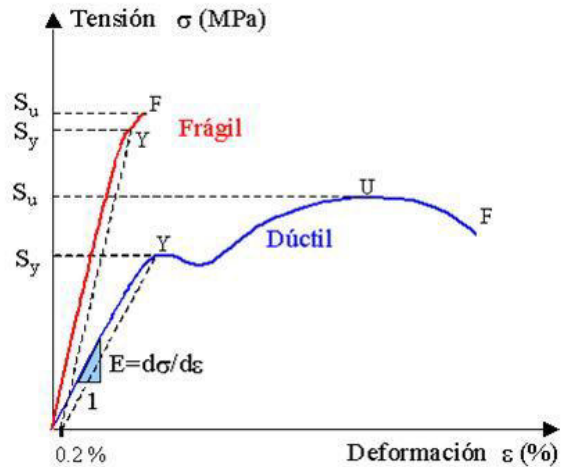


Fig. 79 Curva correspondientes a ensayos de tracción para un material frágil y otro dúctil.

Ahora según la literatura el esfuerzo último (UTS) se encuentra entre un rango de 60 – 140 Mpa [36] (48.3 – 72.4 MPa [37]), el valor máximo alcanzado en el lote tres con 180 días de exposición climática fue de 57.35 Mpa así que de acuerdo a valores promedios de los rangos encontrados no entra en zona de falla por el momento, por otro lado según el data book de Cambridge para todo tipo de materiales[37] se tiene un valor de 56.5 – 62.3 Mpa para el esfuerzo elástico por lo cual es claro ver que el material del envase se ubicó en el área plástica de la curva de la curva de esfuerzo-deformación (ver Figura 80).

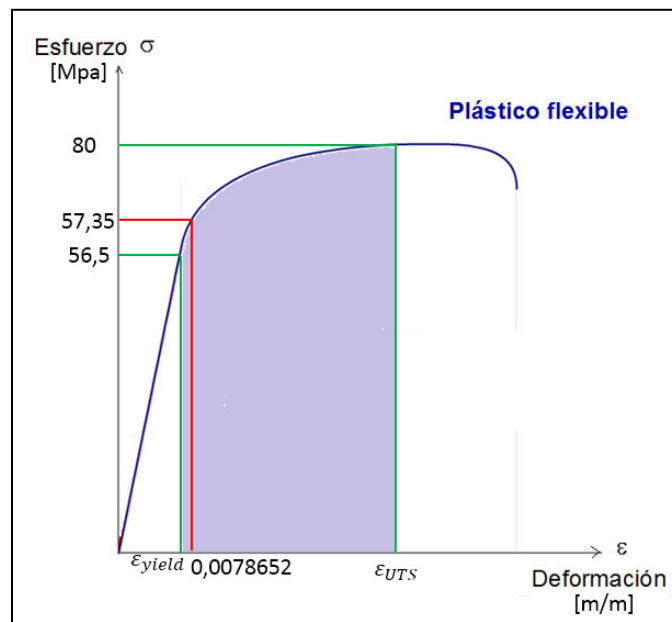


Fig. 80 Curva esfuerzo vs Deformación para lote 3 (zona plástica).

Ahora el esfuerzo es una variable que se relaciona con la deformación unitaria, cuando un material aumenta su módulo de elasticidad se fragiliza por lo cual para el mismo esfuerzo su capacidad de deformarse se reduce, por lo cual la respuesta de los lotes disminuye a medida que la exposición solar sobre el tereftalato de polietileno fue expuesto a una mayor cantidad de días, la disminución de la variable deformación unitaria del lote uno al dos es de 19.835 % mientras que el decremento del lote dos al lote tres es de 4.2056 %, estas cantidades disminuyeron notablemente ya que como se mencionó un material que es más frágil disminuye su capacidad de deformación.

5.6 Programación para el modelo de predicción.

Con los resultados obtenidos se buscará un modelo de predicción con el fin de saber en tiempo futuro en que momento el envase no será útil debido al esfuerzo que los está afectando y paralelamente afectará la eficiencia del colector solar.

En el capítulo anterior se mostraron curvas y resultados del comportamiento del esfuerzo de *von Mises* en la estructura del envase, estas curvas están basadas en varios efectos que intervienen de manera distinta el envase, pero que finalmente todos sumados simbolizan finalmente un esfuerzo final sobre la zona crítica de la botella, ahora bien las variables de más interés para el proyecto las cuales se consideraron más significantes serán tomadas en cuenta para generar el modelo de predicción como son: *esfuerzo de Von Mises* y *tiempo(días)*, estas dos variables fueron tenidas en cuenta ya que el esfuerzo de Von mises utilizado para este cálculo reunía todos los efectos producidos por los efectos térmicos, fuerzas hidrostáticas, etc.

Para cada una de las ecuaciones encontradas por el programa este realiza las iteraciones necesarias para encontrar cada uno de los coeficientes de las diferentes ecuaciones a ajustar, como se muestra en la Figura 81 este proceso es posible haciéndolo manualmente, de tal forma que se debe buscar el conjunto de coeficientes que minimicen el cuadrado de la suma de los residuos, así, se inician las interacciones con un conjunto de valores iniciales de los coeficientes e iterativamente se busca la convergencia de los coeficientes que hagan mínimo a los residuos, es claro que realizar este procedimiento de manera manual para un conjunto de ecuaciones propuestas, implicaría una inversión de tiempo significativamente alta, lo cual es solucionado con el uso del software en cuestión (*Table Curve 2D*).

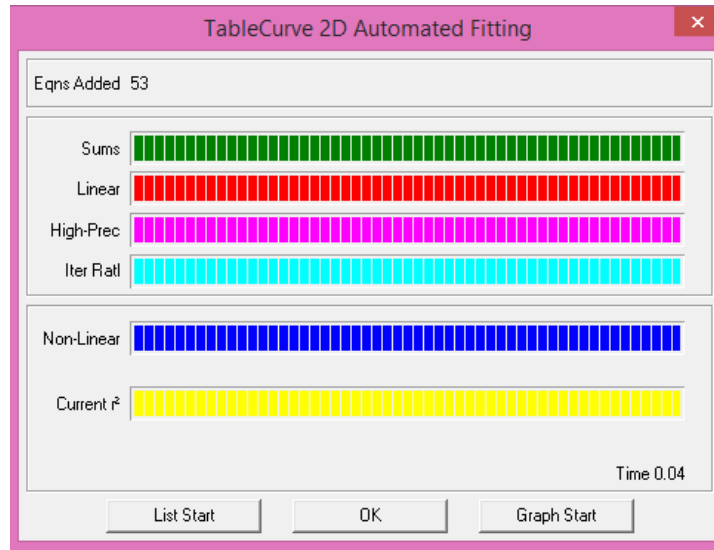


Fig. 81 Proceso iterativo del Software Table curve 2D.

Implementando el software “Table Curve” el cual fue diseñado para generar modelos de predicción basándose en datos proporcionados por el usuario se obtuvo el siguiente modelo el cual obtuvo un ajuste de 0.9941 el cual es muy bueno para seleccionarlo como ecuación de predicción:

$$\sigma = 53.557 + 0.055963 * d^{0.5} * \ln(d) \quad (16)$$

Donde σ es el esfuerzo de *Von Mises* en [Mpa] y d cantidad de días, en la siguiente figura se muestra el resultado brindado por el programa en cuestión.

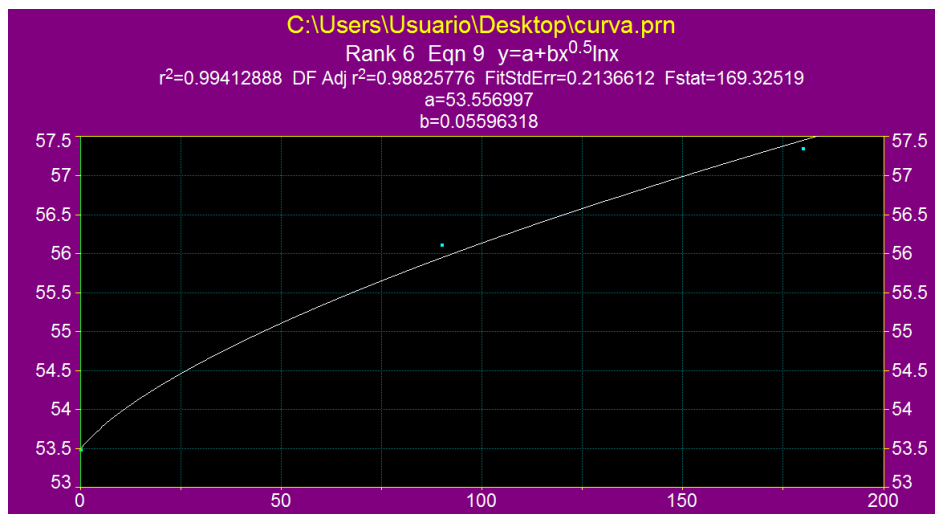


Fig. 82 Ecuación de predicción.

Finalmente con la ecuación 16 es posible predecir cuantos días se requieren para llegar a las condiciones propuestas de nuestro caso y llevar al material al fallo, ahora la ecuación 16 modelará la siguiente curva de predicción:

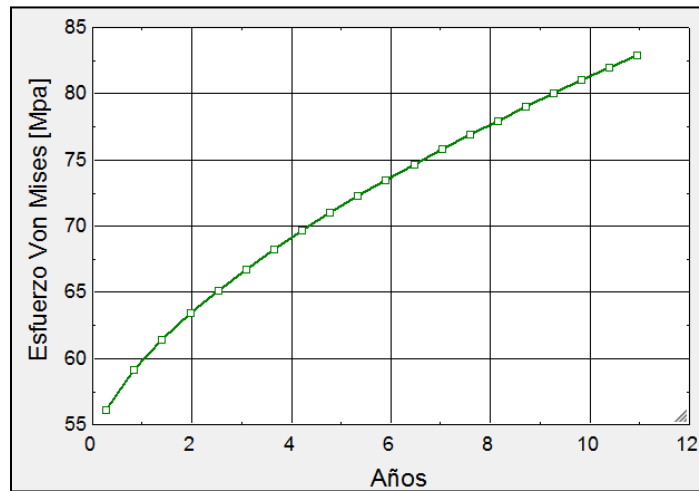


Fig. 83 Curva de predicción.

Ahora bien ya que de los datos de las consultas bibliográficas variaban entre 48.3 – 72.4 MPa [37] el esfuerzo último, se promedia un valor de 60.5 Mpa lo cual para la curva de predicción representaría un 1.22 Años (445.3 días), estos serán los días que el material resistirá bajo las condiciones asumidas para nuestro caso.

5.7 Diseño de propuesta para el soporte del colector solar

Ahora que sabemos que los envases resisten 445 días bajo las condiciones climáticas, de hidrostática y de posición, se propondrá un modelo el cual ayude a solucionar y a extender la vida de los envases de tereftalato de polietileno, como principal punto de partida se tomará la variable de esfuerzo para ese rediseño, esta variable será tenida en cuenta ya que reúne los efectos producidos por todas las condiciones que afectan el envase.

Ahora bien como rediseño dependiente del esfuerzo lo primero será analizar donde este posee su mayor magnitud, si acudimos a la Figura 76 observaremos que el máximo esfuerzo se encuentra en el cuello de la botella (parte más angosta antes de la rosca), esto nos da a conocer que el hecho de que la botella se encuentre en cantiléver hace que el esfuerzo se concentre en esta zona, lo cual sugiere que la botella necesita un soporte que le ayude a distribuir este esfuerzo en otra zona de su estructura.

Para ello es claro que se necesita un soporte en la parte inferior del envase como se muestra en la Figura 84 donde se apoya el peso de cada uno de los envases y del líquido que este contiene, así con esta configuración el esfuerzo disminuirá en el cuello de la botella el cual

el objetivo principal, en cuanto a los efectos térmicos serán los más críticos que afecten el material.

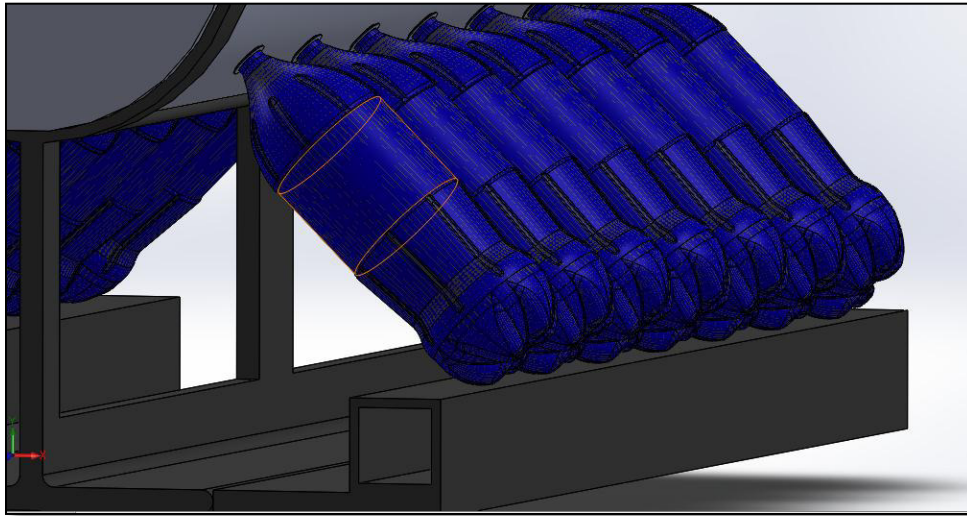


Fig. 84 Diseño del soporte.

Para este proceso de diseño se basó en mantener la economía para el colector solar así que simplemente se utilizó los siguientes materiales:

Tabla 4 Materiales de estructura.

Elemento	cantidad	Especificación	Material
Perfil T 300x300x20 Longitud 1390	1	Perfil de alas y base iguales con bordes redondeados, disponible con la empresa Montanstahl (<i>special profiles in steel</i>)	Perfil en T de acero inoxidable se puede atornillar, soldar, laminar en caliente o extrudir.
Platina 200x1390x20	2	Platina normalizada disponible con la empresa Montanstahl (<i>special profiles in steel</i>)	Acero inoxidable
Perfil tubular cuadrado 80x80x8	2	Perfil tubular cuadrado estructural regido por la norma ASTM brindado por la empresa Mipsa (<i>expertos procesando metales</i>).	Acero inoxidable
Medio anillo radio(int)x177	2	Es necesario fabricar la curvatura.	Acero inoxidable.

(En caso de buscar más información acudir al plano adjunto en los anexo).

Una vez hecha la selección de materiales el resto del proceso depende del taller de trabajo el cual deberá seguir los planos anexos, para conseguir un buen resultado.

5.7.1 Condiciones de frontera para rediseño del soporte del colector solar.

El envase ahora está reposando sobre un perfil tubular cuadrado lo cual se espera que reduzca los efectos del esfuerzo de *Von Mises* para ello se realizará el mismo análisis transitorio teniendo en cuenta todas las cargas tanto térmicas, hidrostáticas y de posición son las mismas que en los análisis numéricos anteriores, ahora bien, dicho lo anterior no se mostrará tales condiciones, pero en la Figura 85 se verán las condiciones de frontera para este nuevo arreglo.

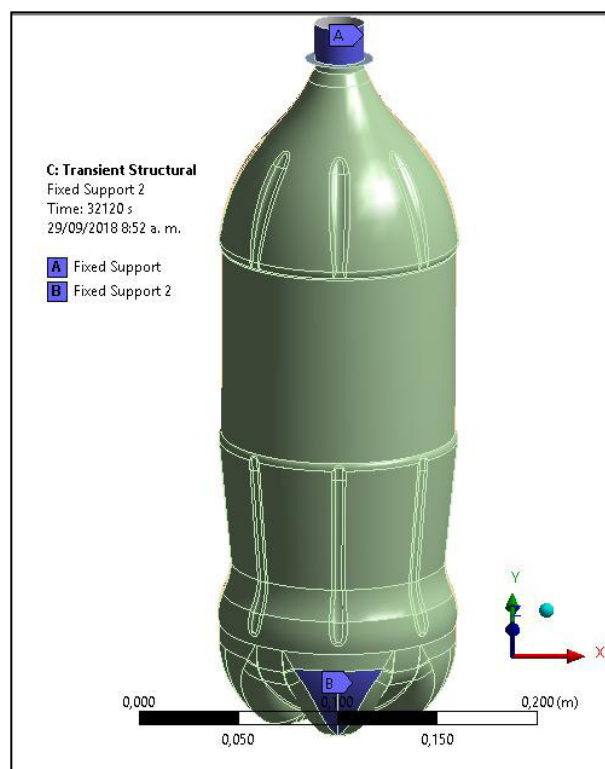


Fig. 85 Soporte fijo 2.

Como podemos apreciar en la Figura 85 se tiene la misma condición de agarre en la boquilla del envase pero en la parte inferior del envase se impuso una restricción de movimiento en Y ya que esta representaría el perfil que está impidiendo este movimiento del envase, ahora bien para el material que modela el plástico (tereftalato de polietileno) se utilizará los datos correspondientes al lote 3 (véase sección 5.4) ya que son los datos que modelan el material con mayor duración bajo las condiciones térmicas, hidrostáticas, etc.

5.7.2 Análisis de resultados para el rediseño del colector solar.

Una vez terminada la simulación se obtienen los siguientes resultados para el esfuerzo de *Von mises* de 16.278 MPa como se podrá apreciar en la Figura 86.

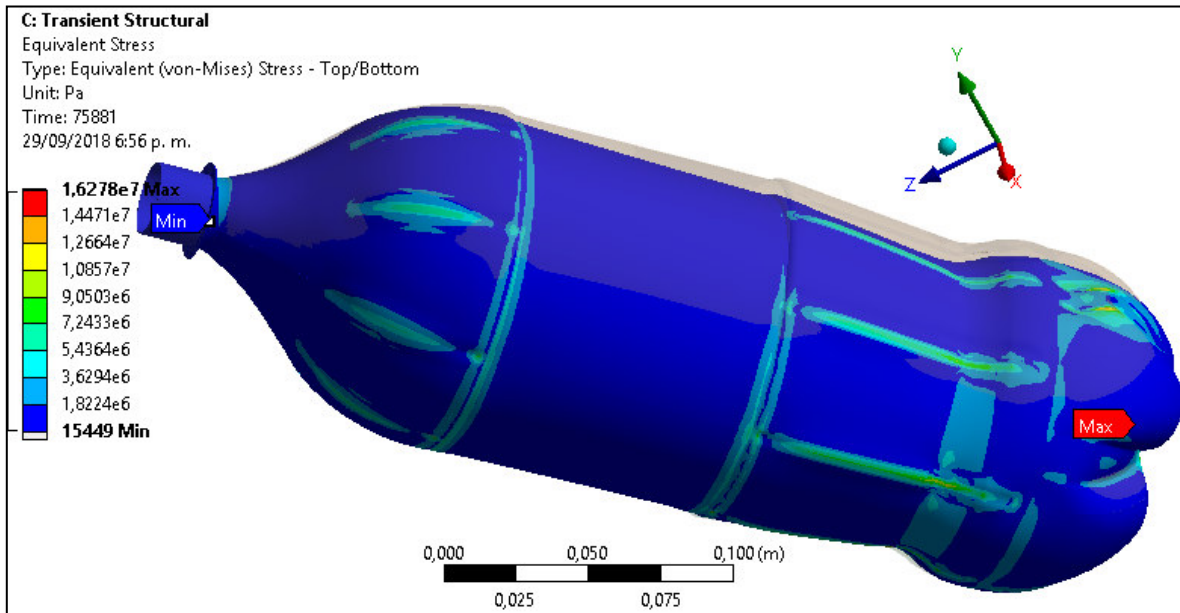


Fig. 86 Esfuerzo de Von Mises para botella con soporte. [Pa].

Como se puede observar en la Figura 86 el efecto del esfuerzo sobre el modelo disminuyó considerablemente alrededor de un 71.6% un porcentaje sumamente considerable.

Para la deformación unitaria se tiene un valor de $0.002 \frac{mm}{mm}$ (véase Figura 87) este valor se redujo alrededor de un 74.53 %, su máximo valor se encuentra en la base del envase, y finalmente se tiene la deformación total donde se obtiene un valor de $0.269 mm$ (véase Figura 88) un valor que no representa ninguna preocupación para la estructura del envase, en el desplazamiento total se obtuvo un porcentaje de disminución del 93.32 %.

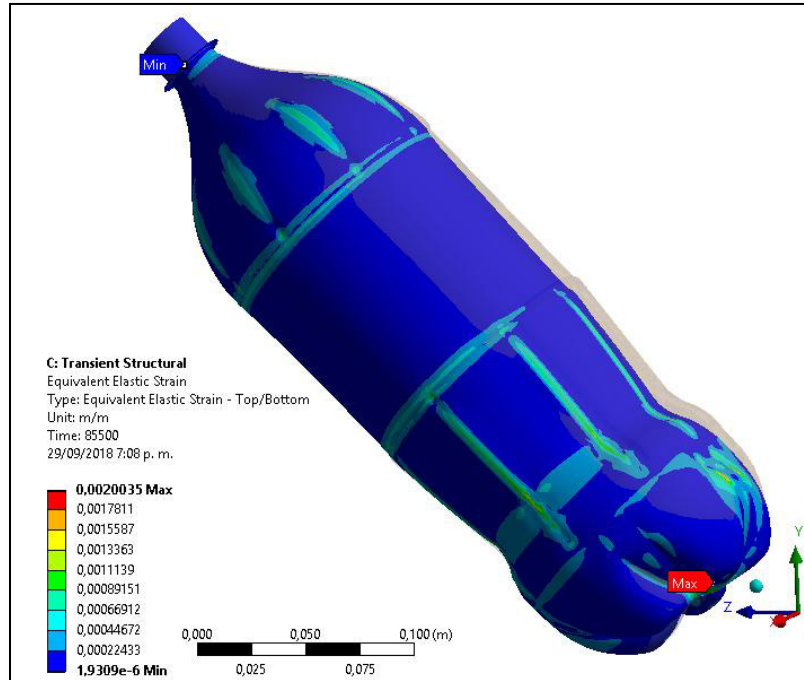


Fig. 87 Deformación unitaria para envase con soporte. [m/m].

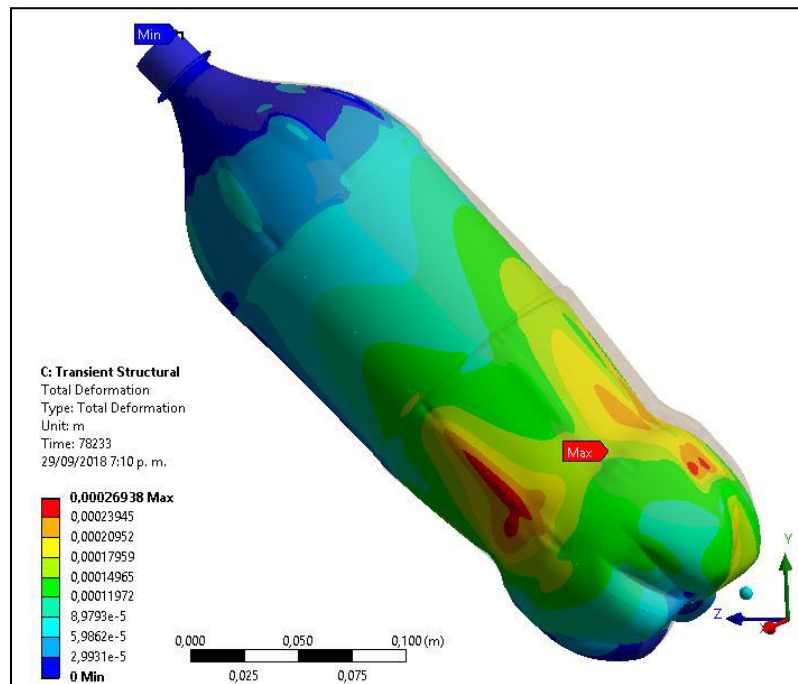


Fig. 88 Deformación total para envase con soporte. [m].

Ahora veremos los resultados consolidados para cada uno de los lotes, donde se mostrarán los porcentajes de disminución del lote 3 y del lote 3 con soporte (rediseño), esto con el fin de evidenciar la notable mejora utilizando el rediseño propuesto.

Tabla 5 Porcentaje de disminución de efectos.

Parámetro	Lote 1	Lote2	Lote3
Esfuerzo Von Mises [%]	71,04	71,08	71,61
Deformación unitaria [%]	76,33	75,21	74,53
Deformación total [%]	93,80	93,37	93,32

Ya que los porcentajes son notablemente altos, es claro que el rediseño es una opción claramente viable, con eso se asegura que los envases duren casi en doble de su vida útil calculada según el modelo de predicción encontrado en este proyecto, ahora bien hay que recordar que las variables tenidas en cuenta son el esfuerzo de *von Mises* el cual reúne todos los efectos sobre el envase y el tiempo, y lo anteriormente dicho solo aplica para esto pero se juegan factores como la cristalización del material lo cual implica cierta opacidad sobre el material ya que este es transparente pero tiene a hacerse opaco y afecta la capacidad de absorción solar de envase, esta aclaración se hace con el fin de guiar al lector a contribuir a sumar esos efectos al modelo de predicción y así hacer más exacto la ecuación de predicción.

5.7.3 Modelo de predicción para el modelo de rediseño con soporte.

Es necesario generar un nuevo modelo de predicción esto con el fin de hacer la comparación de los resultados de las ecuaciones de predicción para el primer modelo y para el modelo del rediseño, la ecuación del primer modelo se encuentra en la sección 5.6, en este apartado mostraremos la curva del modelo de predicción para el nuevo caso de rediseño.

La ecuación de predicción para este nuevo modelo es la siguiente (*Ecuación, 17*) la cual está compuesta de 3 constantes que fueron remplazadas y halladas por medio del mismo software utilizado en la sección 5.6, esta ecuación tiene una constante de ajuste de 0.9716 un valor que nos asegura la precisión de la misma.

$$\sigma = \frac{15.483125 + 0.270056 * d}{1 + 0.01626891 * d} \quad (17)$$

Donde σ es el esfuerzo de von mises y d son los días, con el fin de que la gráfica tenga una mayor comprensibilidad la variable de tiempo se muestra en años y el esfuerzo de Von mises en *Mpa* esta ecuación gráficamente se vera de la siguiente manera:

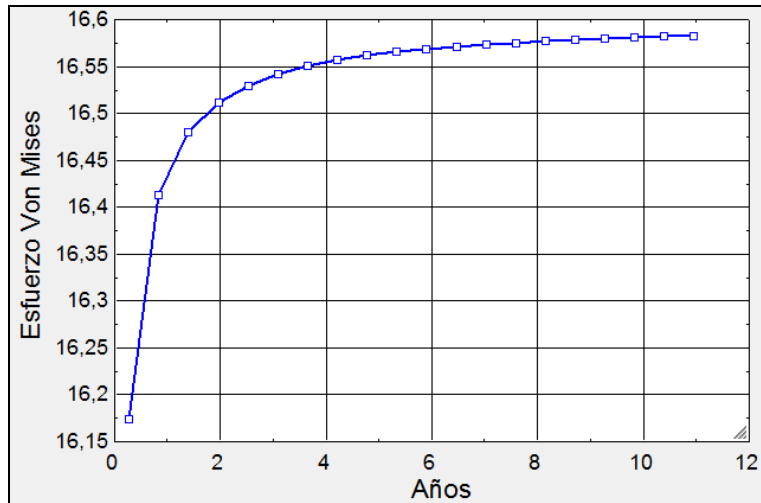
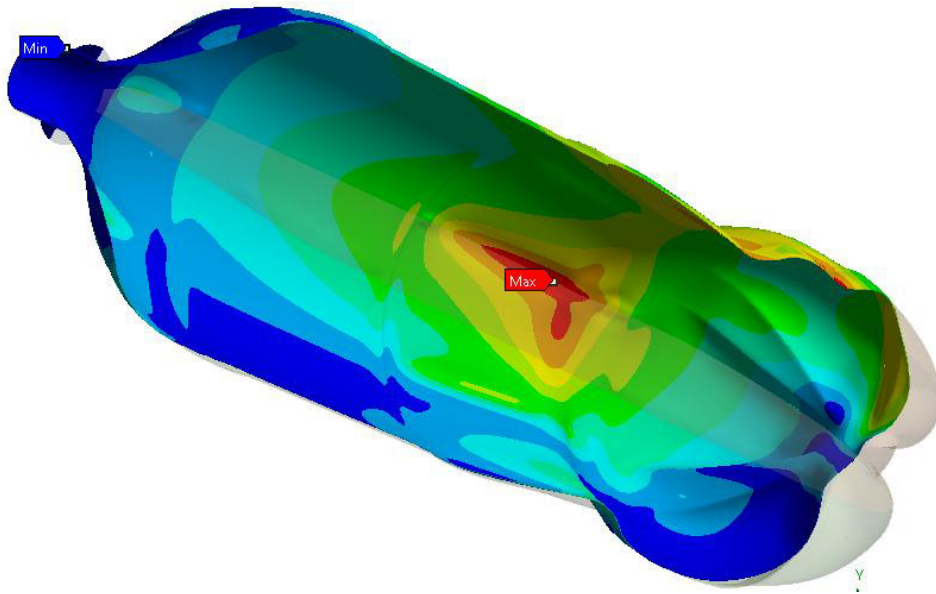


Fig. 89 Gráfica de predicción para el rediseño.

Como podemos observar gracias al rediseño se evita la condición de cantiléver la cual es altamente crítica para la estructura del envase, ahora bien la disminución de la magnitud del esfuerzo de *Von Mises* es considerablemente alta (véase tabla 5) por lo cual es de esperarse que el material alcance un valor de vida alta más duradero, el esfuerzo después de los 4 años empieza a buscar un estado de estabilidad lo cual es claro ya que los efectos de peso casi han sido solucionados gracias al rediseño, esto quiere decir que el factor que más afectaría estructuralmente el envase será el efecto térmico.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones y recomendaciones.

- Este proyecto cumplió con todos los objetivos generales y específicos. Se logró crear un modelo virtual que simula un proceso transitorio bajo condiciones hidrostáticas, térmicas y condiciones de posición, incluyendo la geometría del envase modelo y su material, adicionalmente mediante el análisis de diferentes factores se logró generar un modelo de predicción para la situación en cantiléver y para el rediseño, donde se evidenció claramente los efectos de las variables tenidas en cuenta, finalmente, con la participación del artículo en el congreso IMECE 2018, se logró el objetivo de difundir los resultados de la presente investigación.

El desarrollo de la presente investigación ha generado diferentes conclusiones, las cuales serán útiles para trabajos futuros en el área, sin embargo a continuación se mencionará las más relevantes generadas a partir del desarrollo de este trabajo.

- En el modelo virtual del envase en cantiléver, con exposición solar de 6 meses se obtuvo un esfuerzo máximo de von mises de 57.35 Mpa , el cual está por debajo del rango de daño ($UTS 60 - 140 \text{ Mpa}$ [36]), sin embargo como es un rango podría llegar a creerse que está a punto de fallar pero en la realidad encontrada en las pruebas de tensión uniaxial para el tereftalato de polietileno, puntualmente el de los envases de Coca-Cola®, llegaban hasta un valor de $90 - 110 \text{ Mpa}$ lo cual implica que aún resta más desgaste por parte del material para llegar al fallo.
- La comparación de los resultados obtenidos del material en su estado sin exposición solar con los resultados expuestos en la literatura, no variaban de manera significativa, sin embargo hay que tener en cuenta factores como la exposición solar del envase desde su transporte hasta la entrega al usuario, de igual forma el material utilizado en los envases de Coca-cola® muestra tener cierto número de capas (información privada por parte de la empresa), esto más otros factores hacen que el caso en cuestión de esta investigación se puntualice de cierta manera y no sea comparable con más investigaciones, por otro lado esto es un punto extra para la investigación ya que abrirá puertas al estudio de materiales como el tereftalato de polietileno reciclado bajo condiciones térmicas.
- El análisis de los dos casos (envase en cantiléver y envase soportado) demostró de manera numérica que el rediseño propuesto en esta investigación reducía más del 70% en el esfuerzo de *Von Mises* y la deformación unitaria, mientras que la deformación total redujo sus efectos sobre el envase con casi un 93%, esto asegura una vida más útil para el envase utilizado en el colector solar.

- En los resultados de las pruebas de tensión uniaxial se aseguró un correcto resultado al evidenciar el comportamiento de las variables, del lote 1 al lote 3 el esfuerzo de *Von Mises* aumentó esto debido a que el material estaba sometido a un esfuerzo térmico más severo, mientras que las condiciones de hidrostática y de posición se mantenía constantes, por otro lado la deformación unitaria al igual que la deformación total se vieron afectadas (disminuyeron) por el efecto de cristalización sobre el material, esta cristalización hace que el material se haga más frágil lo cual impide la capacidad de mayor deformaciones en su estructura interna, lo anteriormente dicho va respaldado del hecho que el módulo de elasticidad aumentaba según el tiempo de exposición, esto refleja que la fragilización del material era un hecho en la estructura del tereftalato de polietileno.
- Luego de concluir que bajo las condiciones térmicas, hidrostáticas y de cantiléver el envase solo duraría 1.22 años en alcanzar la falla del material, por lo cual se realizó el rediseño con el cual el tiempo de vida se prolongó a más de 10 años, esta gran diferencia se produce a partir de que la reducción de los efectos estructurales (posición) fueron transmitidos al perfil tubular cuadrado, ahora bien ya que la vida útil se prolongó bastante se piensa que para el cambio del envase habrá que tener en cuenta el nivel de opacidad del plástico debido a las condiciones climatológicas ya que esta opacidad afecta de manera directa la capacidad de absorción del tereftalato de polietileno.
- En las figuras resultantes de los modelos de predicción se observa como antes del rediseño el esfuerzo se incrementa rápidamente y la curva de esfuerzo Vs tiempo parece no estabilizarse esto debido a que la posición de la botella sin apoyo varía constantemente hasta que pierde el ángulo óptimo de 45° , mientras que en la ecuación de predicción del rediseño esta curva se estabiliza rápidamente debido al soporte que tiene y así su esfuerzo pasa a ser una variable con una magnitud más baja y prolongando la vida útil del envase.
- Al momento de realizar la experimentación hay que tener suma cuidado con las muestras ya que su corte debe ser impecable, ya que en varias ocasiones se cortó de manera no continua y esto generaba concentradores de esfuerzos los cuales alteraban de manera drástica los resultados, como recomendación para proyectos futuros se sugiere trabajar con máquinas de tensión uniaxial que tengan pasos de carga más pequeños esto con el fin de estilizar las curvas y obtener mejores resultados.



FUTUROS TRABAJOS

Futuros trabajos.

En el desarrollo de esta investigación, como se ha observado a través de los diferentes capítulos, trabajó el análisis y simulación de un envase (PET) bajo condiciones de posición, hidrostática y térmicas (transientes), donde se buscó analizar el comportamiento mecánico del tereftalato de polietileno bajo las condiciones previamente mencionadas, pero hay que pensar este comportamiento encontrado se ajusta a la realidad pero hay ciertas variables que teniéndolas en cuenta reajustaran aún más los resultados. Ahora bien a través del libro se mencionaron variables como por ejemplo el espesor del envase el cual iba a ser constante a través de toda su estructura, pero esto en la realidad no es un dato verídico ya que el envase ha sido conformado con el fin de poseer la menor cantidad de plástico en su estructura, pero si se hace un correcto análisis sobre éste se aprecia que en la base del envase se tiene un espesor mayor ya que el envase necesita ser más resistente en su base, esta apreciación en los resultados aún que se piensa que no varíen demasiado valdría tenerla en cuenta. Por otro lado en el modelo de predicción podría ser mejorado ya que podrían tener en cuenta un intervalo de tiempo de exposición solar más largos de los escogidos en esta investigación, ahora bien hay equipos especializados en acelerar estas condiciones, lo cual reduciría mucho los tiempos de experimentación y se podría generar más datos para el modelo de predicción. Este modelo también podría contemplar una variable que mejoraría los resultados de predicción esta sería el nivel de opacidad en el plástico ya que como se vio en el rediseño el envase estructuralmente resistirá tiempos muy largos antes de entrar en la zona de falla, pero antes de que se llegue a ese punto el plástico puede llegar a ser tan opaco que su capacidad de absorción de energía solar se reduzca como para afectar la eficiencia del colector solar, así entonces este envase sería descartado y remplazado al instante.

Finalmente lo único que resta mencionar sería en cuanto a la simulación, puntualmente en el apartado de mallado, como recomendación para futuros trabajos se sugiere trabajar un mallado especial, ya que el realizado aunque tiene buenas estadísticas en el acople entre módulos y calidad de los elementos, sería interesante modelar esta parte con un mallado especial para las zonas más complicadas como es la base, por su curvatura, en esta tesis no se pudo realizar por las restricciones de tiempos de cómputo y capacidad de la máquina misma.

Todo esto una vez realizado mejorará y aproximará más los resultados del proyecto mismo, y de igual forma la contribución al análisis de los plásticos (film) será más acertada.

REFERENCIAS

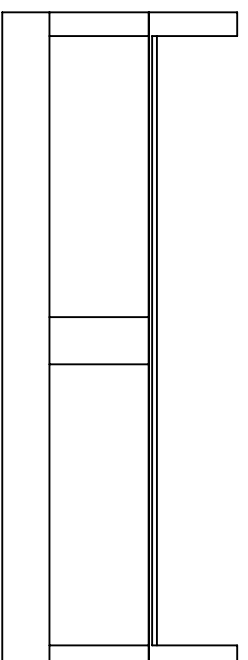
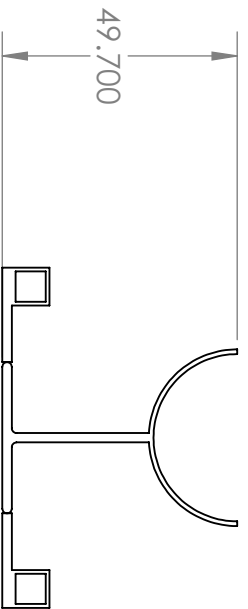
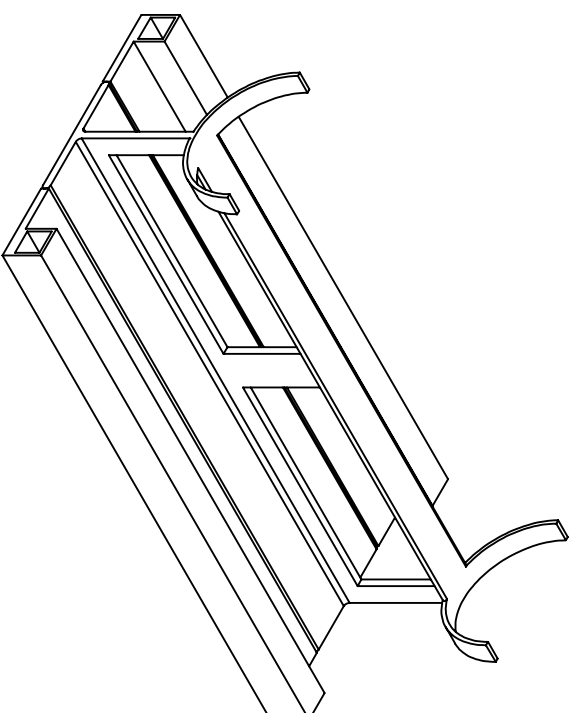
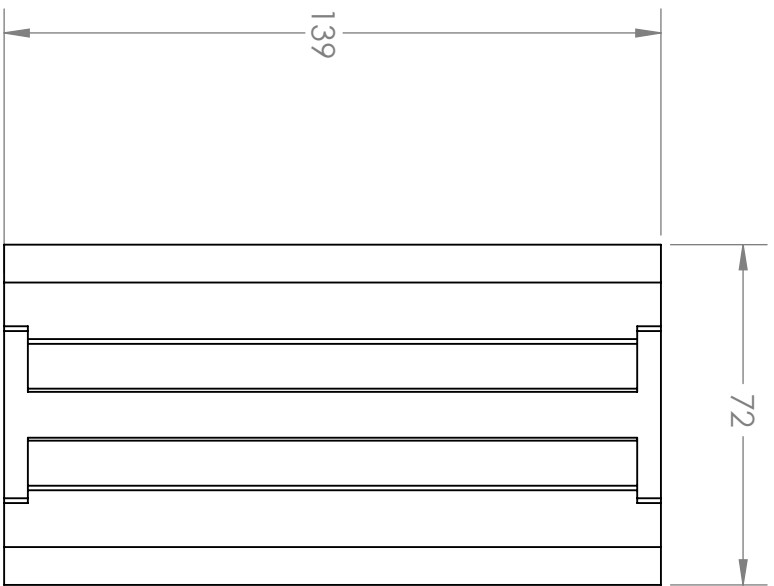
REFERENCIAS




- [1] BP Statistical Review of World Energy 2016, “BP Statistical Review of World Energy,” 2016. [Online]. Available: https://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2016/bp-statistical-review-world-energy-2016.html. [Accessed: 07-Feb-2018].
- [2] I. pilatowsky figueroa and R. martinez strevel, *Sistema de calentamiento solar de agua una guía para el consumidor. Una guía para el consumidor*. Mexico, 1997.
- [3] Wikipedia, “Colector solar.” [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Colector_solar.
- [4] BiodiSol, “¿Qué es un Colector Solar o Captador Solar? Tipos de colectores solares - BiodiSol,” 2009. [Online]. Available: <http://www.biodisol.com/destacado/que-es-un-colector-solar-o-captador-solar-tipos-de-colectores-solares-energia-solar-termica/>. [Accessed: 07-Feb-2018].
- [5] J. A. Crespo Quintanilla, “Estudio Térmico-Fluido Dinámico De Un Prototipo Nivel Laboratorio De Un Calentador Solar Que Reutiliza Botellas De Plástico,” Universidad de Guanajuato, 2014.
- [6] É. Antonio and L. López, “Dignidad humana, diversidad cultural y calidad de vida.,” vol. 9, p. 39, 2009.
- [7] D. E. A. D. E. Tipo *et al.*, “Diseño, Construcción Y Primeros Ensayos De Un Colector Solar Calentador De Aire De Tipo Loop Convectivo Para El Calentamiento De Edificios,” vol. 11, pp. 75–82, 2007.
- [8] J. Arturo, F. Arturo, and G. Figueredo, “Colector Solar Plano Construido Con Elementos Plásticos De Descarte: Viabilidad Técnica Y Construcción.,” *Dpto Termodinámica y Maquinas Térmicas*, p. 3.
- [9] G. N. Tapia, “Tecnologías Emergentes Y A Considerar,” 2011.
- [10] D. F. S. Flores, “Degradación de materiales plásticos ‘PET’ (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión.,” Pontificia universidad católica del ecuador, 2017.
- [11] D. Foti, “Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1906–1915, 2011.
- [12] R. K. (Rakesh K. Gupta, E. Kennel, and K.-J. Kim, *Polymer nanocomposites handbook*. CRC Press, 2010.
- [13] D. Bashford, *Thermoplastics : Directory and Databook*. Springer Netherlands, 1996.
- [14] K. Pepliński and A. Mozer, “Comparison Of Bottle Wall Thickness Distribution Obtain In Real Manufacturing Conditions And In Ansys Polyflow Simulation Environment.”
- [15] K. Pepliński and A. Mozer, “Ansys-Polyflow Software Use To Select The Parison Diameter And Its Thicknes Distribution In Blowing Extrusion,” vol. 1, p. 6, 2016.

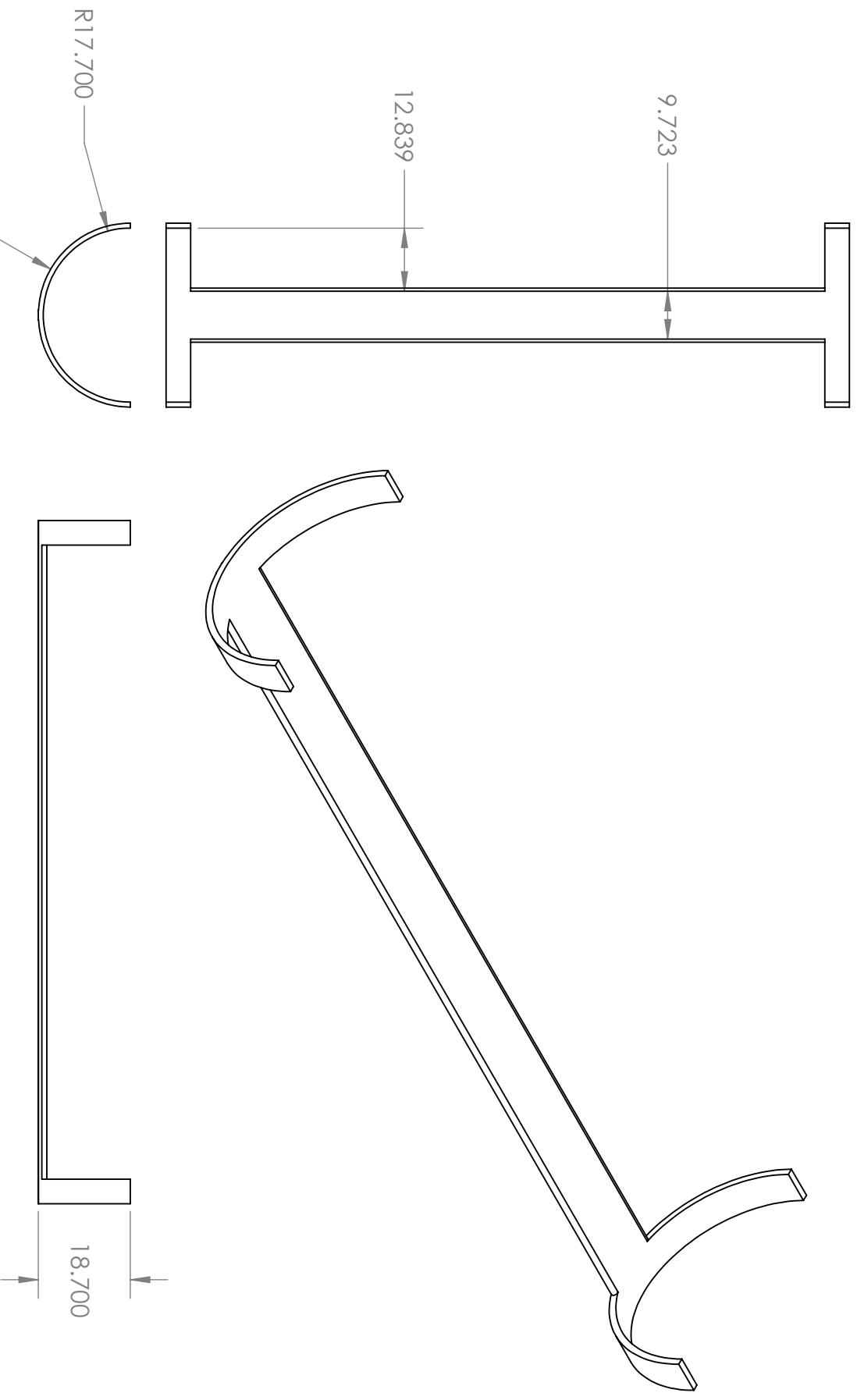
-
- [16] F. Daver and B. Demirel, "A simulation study of the effect of preform cooling time in injection stretch blow molding," vol. 212, p. 2405, 2012.
- [17] J. L. Alunni, "Fundamentos de Ingeniería Tema 3 : Definición de Ingeniería," vol. 1 Ed., p. 221, 2002.
- [18] C. de Wikipedia, "Ingeniería mecánica," *Wikipedia, La enciclopedia libre*, 2015. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ingeniería_mecánica&oldid=105534564.
- [19] Humberto Rodríguez Murcia, "Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects," *Consult. Indep. Bogotá, Drrernat DC*, vol. 1 ed, p. 7, 2009.
- [20] E.S.O, "TEMA 1: PLÁSTICOS," 2010. [Online]. Available: <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2011/09/plasticos-tejina.pdf>.
- [21] A. Esteves, "UD 5.:Materiales Plásticos," vol. 1 ED, p. 23, 2016.
- [22] colaboradores de Wikipedia, "Tereftalato de polietileno," *Wikipedia, La enciclopedia libre.*, 2018. .
- [23] J. . contreras Trejo, "Diseño e implementación de un calentador solar elaborado a base de material recaldo para la casa UV en Coyoplan, Veracruz.," 2012.
- [24] A. M. Careaga Muñoz, "Evaluación de la viabilidad de un calentador solar de agua hecho con polietileno tereftalato para uso domiciliario en base a las condiciones ambientales prevalecientes en la ciudad de Xalapa, Veracruz.," universidad de veracruz, 2015.
- [25] G. A. L. Martínez, J. A. M. López, and B. H. P. Suarez, "Evaluación de un calentador solar de agua fabricado con tubería PVC en serie y envases pet translucidos.," 2012.
- [26] A. Esteves and Virginia Miranda Gassull, *Agua sanitaria solar*. 2011.
- [27] A. F. Luján, A. F. Isaza, E. A. Duque, and S. Chica, "Solar heater ecologic automated based in PET bottles," 2013.
- [28] A Harukara, "Solar water heater," JP2004264009, 2004.
- [29] T. Oshima, "Vessel used in solar water heater," JP2008175515, 2008.
- [30] A. Naemura, "Water heater," 2005.
- [31] I. pilatowsky figueroa, "Breve historia del metodo de elemento finito.," 2015. [Online]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/6519/Capitulo1.pdf>. [Accessed: 17-Apr-2018].
- [32] A. V. Lesso, "“ Análisis , Simulación Y Predicción De Desgaste De Cartilago Articular De Rodilla ,”" instituto tecnologico de celaya, 2007.
- [33] Agency analysis & simulation expertise., "Carbon Dioxide Diffusion Loss from PET Bottle."
-

- [34] R. Canceco, A.; Camarillo, A.; Silva, A.; Lesso, “Experimentación y Análisis por MEF del Comportamiento Hiperelástico en Materiales usados en Calzado Deportivo,” ... *Mecánica, Technol. Y ...*, vol. 4, no. 1, pp. 23–31, 2011.
- [35] Ansys®, “Ansys help,” 2018. [Online]. Available: <https://ansyshelp.ansys.com/>.
- [36] MakeItFrom.com, “Polyethylene Terephthalate (PET, PETE).,” *IE*, 2018. [Online]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polyethylene-Terephthalate-PET-PETE>. [Accessed: 22-Jun-2018].
- [37] C. U. E. Departament., “Materials Data Book.,” vol. 1V, p. 41, 2003.

ANEXOS



Material: Acero inoxidable		Fecha		Nombre		 		 UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO	
Material: Acero inoxidable SOLIDWORKS Educational Edition. Asignador y mecanizar Escala 1:16		3/Oct/2018		Diego Fernando Mesa Vargas				Plano N°: 001	
Solo para uso en la enseñanza.		Denominacion: ensamblaje general: base colector solar						Revisado: Agustín Vidal Lesso	



Material: Acero inoxidable

Acabado: Anodizado

SOLIDWORKS Educational Edition.

Solo para uso en la enseñanza.

Escala
1:12

Fecha

3/Oct/2018

Nombre

Diego Fernando
Mesa Vargas



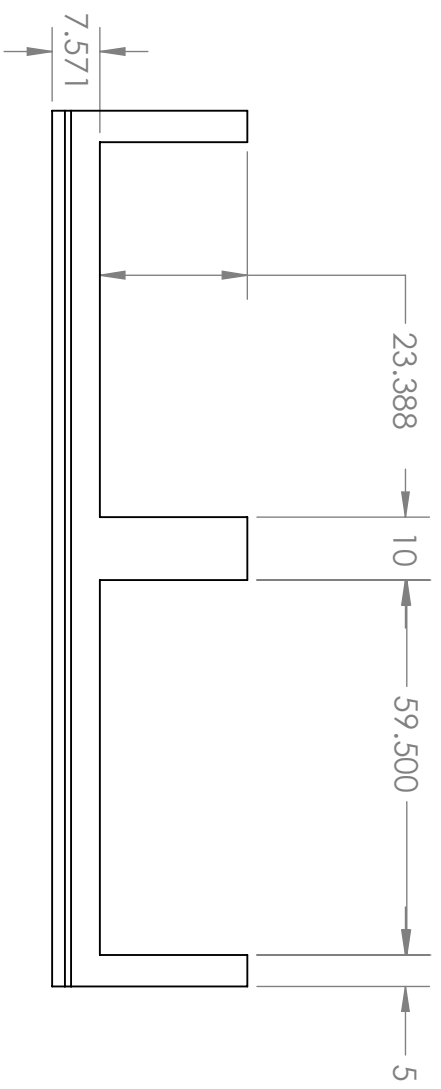
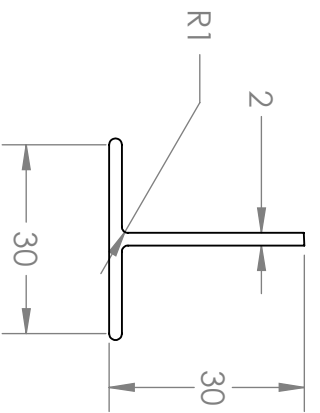
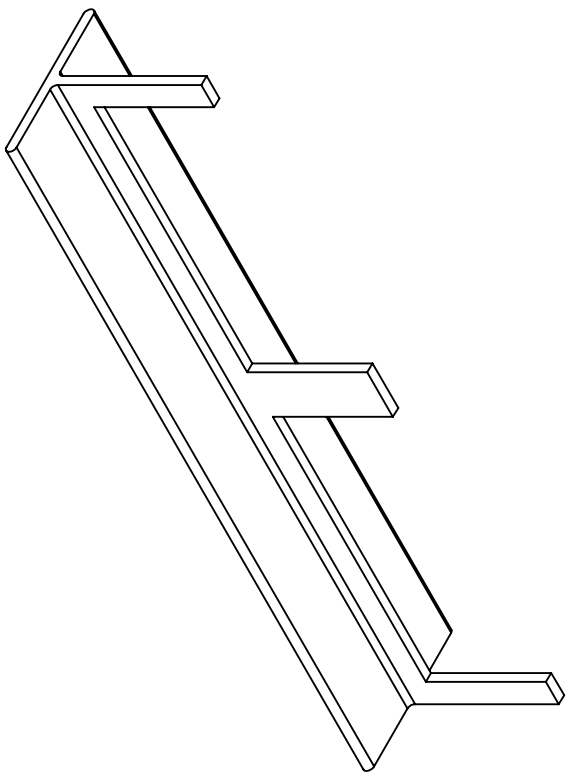
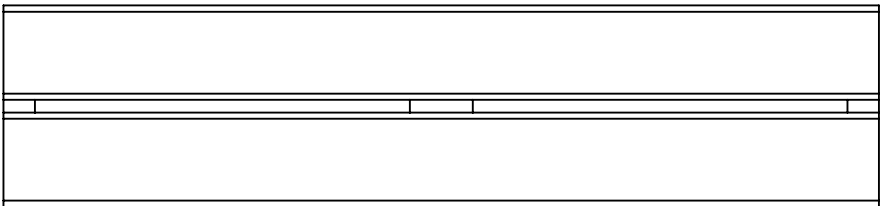
UNIVERSIDAD
DE GUANAJUATO

Plano Nº: 002

Unid: cm

Denominacion:
Medio anillo base colector solar

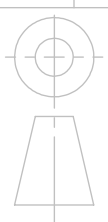
Revisado: Agustín Vidal Iesso.



Material: Acero inoxidable

Fecha

Nombre



Acabado: Pulido
Equiere

3/Oct/2018

Diego Fernando
Mesa Vargas

SOLIDWORKS Educational Edition.
Solo para uso en la enseñanza.

Escala
1:12

Denominacion:
perfil 300x300x20 con cortes

Plano N°: 003 Unid: cm

Revisado: Agustín Vidal Iesso.

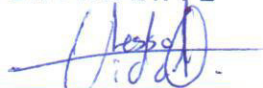
Salamanca, Gto. 16 de enero de 2019.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno Diego Fernando Mesa Vargas del **Programa de Maestría** en Ingeniería mecánica y cuyo número de **NUA** es 145784 del cual soy director. El título de la tesis es: ANÁLISIS TERMOESTRUCTURAL DEL PET RECICLADO APLICADO A UN CALENTADOR SOLAR ECOLÓGICO

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.


ATENTAMENTE



Dr. AGUSTÍN VIDAL LESSO
DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO



Dr. ELÍAS RIGOBERTO LEDESMA OROZCO
GARCÍA
PRESIDENTE



Dr. ANTONIO DE JESUS BALVANTIN
VOCAL