

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA RECUPERACIÓN DEL TETRA PAK CON  
USO ESTRUCTURAL**

**CARLOS JAVIER GALVIS FUENTES  
JHONATAN CAMILO VILLABONA ARGUELLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA RECUPERACIÓN DEL TETRA PAK CON  
USO ESTRUCTURAL**

**CARLOS JAVIER GALVIS FUENTES  
JHONATAN CAMILO VILLABONA ARGUELLO**

**Trabajo de grado para optar al  
TITULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**Director**

**ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS  
Ingeniero Mecánico PhD.**

**Codirector**

**DAVID ALFREDO FUENTES DÍAS  
Ingeniero Mecánico PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*A Dios y a la virgen por permitirme llegar a este punto de mi vida, por brindarme salud y guiarme en los momentos de duda, por darme la oportunidad de conocer personas que han aportado tantas cosas buenas en mi vida.*

*A mis padres Carlos y Paulina, por brindarme el apoyo que necesite en todo momento con su presencia y espíritu, a mi abuelita Ascensión, mis hermanas Mónica y Yuly, mi sobrino Nicolas y toda mi familia por estar siempre pendientes de mí.*

*A Ludy por ser un apoyo y un pilar en mi vida.*

CARLOS JAVIER GALVIS FUENTES

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su apoyo incondicional, consejos cuando fueron requeridos y ayuda cuando fue solicitada.

A María Claudia por su paciencia y ayuda cuando fue necesario.

**JHONATAN VILLABONA ARGUELLO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este proyecto de grado agradecen de corazón a:

Dios, por llevarnos por un camino donde tuvimos la oportunidad de ser parte de esta comunidad. Por permitirnos culminar este proceso que emprendimos años atrás con la esperanza de poder labrar un futuro mejor.

Universidad Industrial de Santander y la escuela de ingeniería Mecánica por brindarnos todas las herramientas necesarias para forjarnos como unos buenos profesionales capaces de afrontar todas las dificultades que el mundo de la industria pueda tener.

ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS, PhD. en ingeniería mecánica. Por ayudarnos y brindarnos sus conocimientos, por guiarnos a lo largo de toda la secuencia del proyecto y apoyarnos en las decisiones pertinentes.

DAVID ALFREDO FUENTES DIAZ, PhD. en tecnología energética. Por brindarnos un apoyo en la consecución de un tema digno de un trabajo de grado, por guiarnos con su experiencia y su coordinación.

Profesor ALDRYN VELOSA y Las Unidades Tecnológicas, por facilitarnos sus instalaciones para realizar los ensayos mecánicos.

A ADIPACK LTDA y DESING LTDA por prestarnos sus instalaciones para realizar labores propias del proyecto.

A la profesora CLAUDIA ROCIO, por su valiosa colaboración en la recolección de las cajas.

A todas personas, amigos y conocidos que hicieron parte de alguna manera de este proyecto y su culminación.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA.....	18
1.1 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	18
1.1.1 Objetivo general .....	18
1.1.2 Objetivos específicos .....	18
2. MARCO TEÓRICO .....	20
2.1 TETRA PACK.....	20
2.1.1 Polietileno.....	22
2.1.2 Cartón .....	22
2.1.3 Aluminio .....	22
2.2 RECICLAJE .....	23
2.3 ENSAYOS.....	23
2.3.1 Ensayo de tracción.....	24
2.3.1.1 Esfuerzo y deformación .....	24
2.3.1.2 Propiedades mecánicas a partir del ensayo de tensión .....	25
2.3.2 Ensayo de compresión.....	25
2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS .....	26
2.5 MATERIALES ESTRUCTURALES .....	27
2.5.1 Madera.....	27
2.5.2 Acero.....	27
2.5.3 Concreto.....	27
2.5.4 Plásticos.....	28
3. ESTADO DEL ARTE .....	29
3.1 TETRA PAK EN SUR AMERICA .....	29
3.2 MÉXICO.....	34
3.3 AUSTRALIA .....	35

4.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO .....	36
4.1	RECOLECCIÓN .....	36
4.2	LAVADO Y SECADO .....	36
4.3	CORTADO O TRITURADO.....	36
4.4	PREPARACIÓN DEL MATERIAL PARA EL PRENSADO .....	38
4.5	PRENSADO DEL TETRA PAK .....	39
4.5.1	Presión.....	39
4.5.2	Temperatura.....	39
4.5.3	Tamaño de triturado.....	40
4.5.4	Proceso de prensado.....	41
4.6	MUESTREO.....	42
4.7	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	43
4.8	EXPERIMENTACIÓN.....	45
4.8.1	ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	46
4.8.2	ANÁLISIS ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	49
4.8.2.1	Obtención de promedio.....	49
4.8.2.2	Selección de mejores condiciones.....	52
4.9	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	56
5.	OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.....	61
5.1	Ensayo de tracción.....	61
5.2	Ensayo de compresión.....	62
6.	Análisis de resultados.....	65
6.1	INFLUENCIA DE LAS DIFERENTES VARIABLES.....	69
7.	CONCLUSIONES .....	72
8.	RECOMENDACIONES .....	74
	BIBLIOGRAFÍA.....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Recipientes hechos de Tetra Pak.....	20
Figura 2. Conformación de Tetra Pak.....	21
Figura 3. Tejas y láminas.....	30
Figura 4. Maquina cortadora de Tetra Pak.....	37
Figura 5. Tetra Pak en tiras y cuadros.....	38
Figura 6. Prensa MEGA KPD-30 modificada con control de presión y temperatura. .....	41
Figura 7. Probetas para ensayo de compresión plástico rígido.....	44
Figura 8. Probeta para ensayos de tracción.....	44
Figura 9. Probetas ensayo de tracción.....	45
Figura 10. Maquina universal de ensayos.....	46
Figura 11. Placa de máquina universal de ensayos.....	47
Figura 12. Condiciones para la prueba a compresión.....	47
Figura 13. Montaje de la probeta en máquina universal de ensayo.....	48
Figura 14. Carga Vs Desplazamiento probeta 1-1 para ensayo de compresión....	48
Figura 15. Esfuerzo Vs Deformación unitaria probeta 1-1 para ensayo de compresión.....	49
Figura 16. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria A-T1 para ensayo de compresión..	51
Figura 17. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria a Presión 1 Constante para ensayo de compresión.....	53
Figura 18. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria a Presión 2 Constante para ensayo de compresión.....	54
Figura 19. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación a Presión 3 Constante para ensayo de compresión.....	55
Figura 20. Montaje de la probeta en maquina universal de ensayos.....	56
Figura 21. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación Unitaria, espécimen 14 para ensayo de tracción.....	57
Figura 22. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria, espécimen 15 para ensayo de tracción.....	58
Figura 23. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria, espécimen 21 para ensayo de tracción.....	59
Figura 24. Linealización gráfica Esfuerzo Vs Deformación.....	62
Figura 25. Análisis grafico resultados prueba de compresión.....	63
Figura 26. Deslizamiento de fibras a tracción.....	65
Figura 27. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación corregido para polietileno de baja densidad ensayo de tracción.....	67
Figura 28. Falla de material compuesto en ensayo de compresión.....	68
Figura 29. Deslizamiento capas cartón y aluminio en vista lateral ensayo de tracción .....	68

Figura 30. Corte de fibras de aluminio y cartón, vista al microscopio a 10x .....	69
Figura 31. Gráfica Esfuerzo Vs. Temperatura y tamaño a presión 1 constante para ensayo de compresión.....	70
Figura 32. Gráfica Esfuerzo Vs. Temperatura y tamaño a presión 2 constante para ensayo de compresión.....	70
Figura 33. Gráfica Esfuerzo Vs. Temperatura y tamaño a presión 3 constante para ensayo de compresión.....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos técnicos de tejas y láminas de Proplanet.....	30
Tabla 2. Especificaciones técnicas del tectan.....	33
Tabla 3. Codificación de las muestras de tetra pak conformado.....	42
Tabla 4. Tamaño del triturado. ....	42
Tabla 5. Temperaturas propuestas. ....	43
Tabla 6. Presiones propuestas. ....	43
Tabla 7. Posibles parámetros de influencia óptimos.....	52

## RESUMEN

### TÍTULO:

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA RECUPERACIÓN DEL TETRA PAK CON USO ESTRUCTURAL.\*

### AUTORES:

CARLOS JAVIER GALVIS FUENTES, JHONATAN CAMILO VILLABONA ARGUELLO.\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Compuestos laminados, Reciclaje de Tetra Pak, Propiedades mecánicas, Compresión, Tracción.

### DESCRIPCIÓN.

El objetivo de este proyecto fue encontrar cuales son las condiciones de conformado del Tetra Pak reciclado que presentan mejores propiedades mecánicas. Se variaron tres parámetros en el proceso de conformado de Tetra Pak: la temperatura, la presión y el tamaño de corte del Tetra Pak.

Se realizaron pruebas de compresión según la norma D695-15, se encontraron las mejores propiedades mecánicas en el espécimen que corresponde a la presión de 25 kg/cm<sup>2</sup>, temperatura de 170°C y tamaño de corte medio entre 4-6mm. Se encontró un esfuerzo a compresión de 82 [Mpa], a este espécimen se le realizaron pruebas de tracción según la norma D638-14 que arrojaron un módulo de elasticidad aparente de 126 [Mpa] y una resistencia a la tracción de 1,93 [Mpa], se hizo necesario corregir el área que soportaba la carga y se encontró una resistencia a la tracción corregida de 9,63 [Mpa].

Se encontró viable técnicamente la recuperación del Tetra Pak cuando la sollicitación sea principalmente de compresión y a la tracción no sea muy alta debido a la baja resistencia encontrada para el material. Mediante el diseño del experimento se logró variar los parámetros y encontrar cuáles de ellos son los más adecuados para el conformado del Tetra Pak.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS Ing. Mecánico. Co-Director: DAVID ALFREDO FUENTES DIAZ Ing. Mecánico.

## ABSTRACT

### TITLE:

STUDY OF FACTIBILITY FOR RECOVERY TETRA PAK FOR STRUCTURAL USE. \*

### AUTHORS:

CARLOS JAVIER GALVIS FUENTES, JHONATAN CAMILO VILLABONA ARGUELLO.\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Laminar compounds, Tetra Pak recycling, Mechanical Properties, Compression, Traction.

### DESCRIPCION.

The objective of this project was to find out what are the forming conditions for recycled Tetra Pak that shows the best mechanical properties. Three parameters were varied in the Tetra Pak forming process: temperature, pressure and Tetra Pak's cutting size.

Compression tests were made according to the standard D695-15, the best mechanical properties were found in the specimen corresponding to pressure of 25 kg/cm<sup>2</sup>, temperature of 170°C and medium cutting size between 4-6 mm. A compressive stress was found of 82 [Mpa], tensile test was made on this specimen, according to the standard D638-14 that show an apparent elastic modulus of 126 [Mpa] and tensile strength of 1,93[Mpa], it was necessary to correct the area that support the load, once it was done a tensile strength of 9,63 [Mpa] was found.

It was found technically feasible the Tetra Pak recovery when the solicitation is mainly compressive and tensile strain do not be too high because of the low tensile strength found for the material. Through the experiment design was possible to vary the parameters y found out wish ones were more appropriate for the Tetra Pak forming.

Se encontró viable técnicamente la recuperación del Tetra Pak cuando la sollicitación sea principalmente de compresión y a la tracción no sea muy alta debido a la baja resistencia encontrada para el material. Mediante el diseño del experimento se logró variar los parámetros y encontrar cuáles de ellos son los más adecuados para el conformado del Tetra Pak.

---

\* Degree work.

\*\* Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physicsmechanical engineering. Mechanical engineering School. Director: ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS Mechanical Engineering. Co-Director: DAVID ALFREDO FUENTES DIAS Mechanical Engineering.

## INTRODUCCIÓN

Gran variedad de productos son empacados en envases de Tetra Pak (jugos, lácteos, vino, alimentos para mascotas, etc.), en Colombia cerca del 77% de estos envases son desechados<sup>1</sup> y en el mundo 75% aunque se debe reconocer que el porcentaje está disminuyendo aún no es suficiente, se puede hacer aún mayores esfuerzos por reciclar cada día más. La meta para el 2020 es 40% reciclaje.

La razón por la cual no hay políticas de reciclado de Tetra Pak es porque no se tiene información técnica, estudios que demuestren qué propiedades mecánicas, térmicas, químicas, entre otras, tiene el Tetra Pak como material compuesto, y al no tener claras las propiedades no se sabe en qué se puede usar posterior a su uso como contenedor. La gran mayoría del Tetra Pak que es reciclado actualmente se reutiliza como hojas de papel, que se recupera mediante una centrífuga que separa el cartón del polietileno y el aluminio, las fibras de cartón se pueden usar para hacer papel de impresión, bolsas, cajas, etc. El aluminio y el polímero, por otra parte, son recuperados de diferentes formas que dependen del uso final que vayan a tener, se puede llegar a tener ladrillos de aluminio, gases pirolíticos del polímero, y la combinación de los dos, polímero y aluminio, permiten la producción de tablas.

---

<sup>1</sup>TETRA PAK [en línea]. [consultado 18 abril 2015]. Disponible en internet: <<http://www.tetrapak.com/co/environment/recycling-and-recovery>>

# 1. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

La forma más efectiva de aumentar el porcentaje de Tetra Pak reciclado es, sabiendo para qué se puede usar y esto se logra caracterizando el material, en este caso mecánicamente. Conociendo sus propiedades mecánicas se podrá determinar cómo podemos utilizar el Tetra Pak conformado y contribuir a aumentar el porcentaje de material (Tetra Pak) reciclado.

No solo se contribuye a la ciencia, generando un material nuevo, también, puede ser un nuevo tipo de negocio que genere dividendos y puestos de trabajo para países cuyos índices de basura (en este caso tetra pak sin reciclar) sean altos, desde luego lo más importante es aportar un granito de arena para garantizar el futuro del planeta que habitamos.

## 1.1 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.1.1 Objetivo general

- Poner en práctica lo aprendido en el transcurso de la carrera ingeniería mecánica, estudiando la factibilidad de recuperar el Tetra Pack con uso estructural, cumpliendo así con el perfil del ingeniero mecánico propuesto por la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, enaltecendo la escuela y generando una alternativa de uso de este material que proporcione ganancias económicas e intelectuales.

### 1.1.2 Objetivos específicos

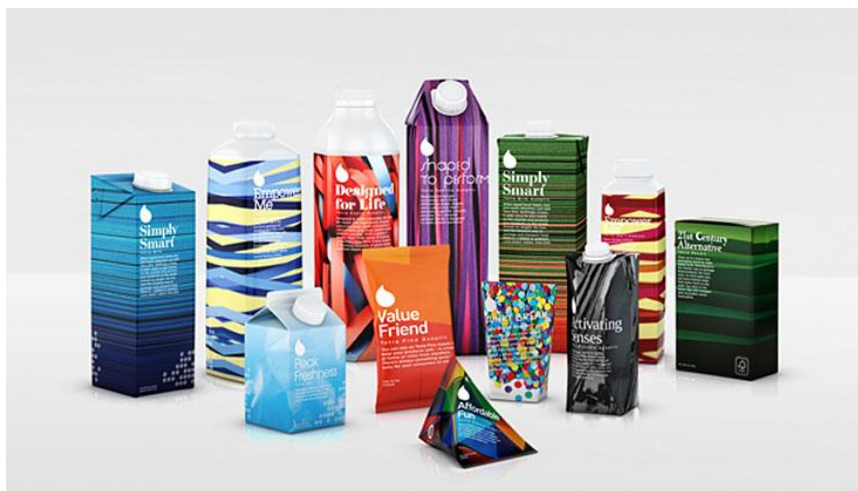
- Realizar una revisión del estado del arte con el fin de determinar las propiedades y parámetros de influencia en el re-uso del Tetra Pack conformado como elemento estructural.
- Realizar un diseño de experimento que permita identificar los parámetros de influencia y su relación con las propiedades mecánicas del tetra pak conformado.

- Realizar pruebas de caracterización mecánica tracción y compresión a las probetas de acuerdo a la norma ASTM D638-14 y D695-15 respectivamente establecida para los ensayos de plástico rígido.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 TETRA PACK

Figura 1. Recipientes hechos de Tetra Pak.



Fuente <<http://www.tetrapak.com/cl/packaging>>

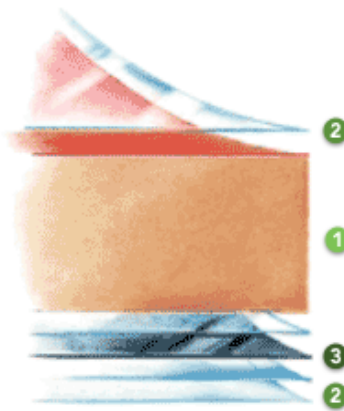
El Tetra Pak, figura 1, es un envase creado por la necesidad de transportar y mantener en buen estado líquidos de fácil descomposición o perecederos, sin refrigeración, como son la leche, los jugos etc. El primer envase de este tipo salió a la luz con cuatro caras, en forma de tetraedro, de ahí viene el nombre de TETRA con que él es conocido, que además en griego significa 4.

Está conformado por seis capas de materiales, que además son muy fáciles de producir, estos son (ver figura 2):

- **Polietileno**, impermeabiliza el envase protegiendo a los alimentos de la humedad atmosférica externa (2).
- **Cartón**, quien le da la forma, estabilidad, y rigidez al envase. Es además, donde se realiza la impresión del diseño (1).
- **Polietileno**, que permite la adhesión del cartón y la capa de aluminio (2).

- **Aluminio**, que actúa como barrera de la luz, el oxígeno, y olores externos, siendo esta la capa más importante, la cual mantiene el alimento lleno de vitaminas y nutrientes (3).
- **Polietileno**, que optimiza la adhesión al aluminio (2).
- **Polietileno**, previene el contacto entre el producto y las demás capas al producto fresco y en su estado natural (2).<sup>2</sup>

Figura 2. Conformación de Tetra Pak.



Fuente: <<http://campaign.tetrapak.com/lifeofapackage/ar/what-its-made-of/>>

Este envase posee varios puntos a su favor, como ya se enunció anteriormente, ayuda a preservar los alimentos perecederos, son eficientes y de fácil transporte, son fáciles de producir, pero esto tal vez también es su principal desventaja, pues al ser fácil de fabricar su producción se ha llevado al exceso, a tal punto de inundar la mayoría de los mercados del mundo, volviéndose un problema de basura y creando así la necesidad de técnicas de re-uso o reciclaje.

---

<sup>2</sup> HISTORIA DEL TETRA PAK. [en línea]. [consultado el 6 de junio de 2015] Disponible en internet <<https://licdisgra.wordpress.com/2011/05/15/historia-del-tetra-pak/>>

### **2.1.1 Polietileno**

Es el plástico más común, fue sintetizado por primera vez en 1898 por Hans von Pechmann por accidente, pertenece a la familia de los polímeros, se puede clasificar principalmente en polietileno de baja, media y alta densidad, su punto de fusión puede estar por el rango de 120°C a 130°C para los de media y alta densidad y en 105°C a 115°C para los de baja<sup>3</sup>.

El polietileno tiene una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo el de alta densidad es utilizado en la industria de las tuberías de alta presión, los de baja densidad en productos que no tengan que soportar tantos esfuerzos como bolsas de basura, botellas, vasos etc. Es muy utilizado debido a la facilidad de producción y de conformado, pues puede tomar casi cualquier forma y además es fácilmente aplicable a varios procesos de conformación como la inyección, termo-formado, extrusión, soplado etc.

### **2.1.2 Cartón**

El cartón es un material formado a base de papel, de tipo virgen o reciclado, es utilizado en la industria para empacar otros elementos y por lo general tiene forma de cubo y se le llama comúnmente cajas. Existen cartones de varias densidades y calibres, el calibre es la medida que dice qué tantos metros cuadrados hay por cada 10 kg de peso. Los tipos más comunes de cartón son: cartón de fibras recicladas, cartón solido no blanqueado, cartón folding y el cartón solido blanqueado o cartulina.

### **2.1.3 Aluminio**

Es un metal no ferromagnético, de los más comunes en la corteza terrestre, alrededor del 8%. Es un metal muy apetecido en la industria mecánica por su baja densidad y su gran resistencia a la corrosión, además permite alearse con otros materiales mejorando así su resistencia mecánica. Es un material maleable,

---

<sup>3</sup> TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. [en línea]. [consultado el 6 de junio de 2015]. Disponible en internet < <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/07/polietileno-pe.html>>

propiedad que lo hace idóneo para la producción de láminas y cables, pero no como elemento estructural. En el campo de los alimentos, este metal es muy utilizado en las cajas de tetra pak que comúnmente se ven en el supermercado, también es muy utilizado en la parte de almacenamiento de líquidos como gaseosas y cervezas dado que con un ligero proceso de extrusión puede formar envases muy resistentes, además su capacidad de reciclaje lo hace un metal bastante funcional.

## **2.2 RECICLAJE**

El reciclaje es un proceso que se creó a raíz del desencadenado consumismo presente en el mundo tras el último siglo y que sigue dejando miles de toneladas de basura que al final se convierten en un problema de salubridad para todos los habitantes. El proceso consiste en la separación de materiales que pueden ser reutilizables o mediante otros procesos pueden convertirse en artefactos a los cuales se le pueden dar otros usos, de esta manera se reduce el consumo de nuevas materias primas, a su vez, también se reduce la energía utilizada para producir las nuevas materias primas. Uno de los materiales más reciclados es el plástico y del cual se sabe, tarda siglos en descomponerse y puede causar daños muy grandes en ecosistemas terrestres y marinos.

## **2.3 ENSAYOS**

Se utilizan ampliamente para determinar el comportamiento de un material a diferentes grados de fuerza aplicada. Los resultados finales de dichos ensayos serán las propiedades mecánicas que caracterizan el material, pero además, estos ensayos dicta un veredicto de calidad que se busca en ciertas ocasiones. Se puede encontrar en el mercado diferentes tipos de materiales, en cada caso se busca que el material cumpla con lo que dice la etiqueta o su nombre, los ensayos demuestran la confiabilidad de dichos materiales.

En la actualidad existen varios ensayos que se pueden aplicar a los materiales como lo es el ensayo de tracción, compresión, dureza, flexión, rotura, doblado etc.

### 2.3.1 Ensayo de tracción

Es uno de los ensayos utilizados para obtener el valor de las propiedades mecánicas de los materiales. Mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada.<sup>4</sup> Se emplean probetas de sección circular o rectangular, en orden de hacer los resultados comparables se han establecido ciertos estándares para las dimensiones de las probetas. Estos estándares se pueden consultar en las normas hechas por ASTM (American Society For Testing and Materials) que en español sería Sociedad Americana Para Pruebas y Materiales. Esta sociedad es la encargada de dictar los procedimientos para verificar la calidad de un material, así como sus propiedades mecánicas, desarrollada en 1902 para verificar la estandarización de los rieles en estados unidos y más tarde abarcaría muchos más materiales.

“Las normas de ASTM International se usan en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos y transacciones comerciales por todo el mundo. Son unos de los componentes integrales de las estrategias comerciales competitivas de hoy en día.”<sup>5</sup>

#### 2.3.1.1 Esfuerzo y deformación<sup>6</sup>

Una muestra específica de un material puede caracterizar el material a cualquier tamaño y forma si se llevan los resultados del ensayo (Fuerza y distancia) a esfuerzo y deformación de la siguiente forma:

$$Esfuerzo [Pa] = \frac{Fuerza [N]}{Area [m^2]}$$

$$Deformacion\ unitaria = \frac{Desplazamiento [mm]}{Espesor [mm]}$$

---

<sup>4</sup> ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3ª ed. México distrito federal: International Thomson Editores, 1998. p. 130.

<sup>5</sup> NORMAS ASTM. [en línea]. [consultado el 19 de agosto de 2015]. Disponible en internet <<http://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/normas-astm>>

<sup>6</sup> ASKELAND, op. cit, p. 130.

Para este caso en particular la formula se modificó un poco:

$$Esfuerzo[MPa] = \frac{Fuerza [kN]}{Area [mm^2]} \times 1000$$

$$Deformacion unitaria = \frac{Desplazamiento [mm]}{Espesor [mm]}$$

### 2.3.1.2 Propiedades mecánicas a partir del ensayo de tensión<sup>7</sup>

- Esfuerzo de cedencia o límite elástico: divide el comportamiento elástico del plástico. Con este esfuerzo se diseñan los elementos cuando se desea que fallen plásticamente. Para cargas altas se deben seleccionar secciones lo suficientemente grandes para que no lleguen al esfuerzo de cedencia.
- Resistencia a la tensión: obtenido a partir de la fuerza más alta aplicada. Es el punto en el cual la gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento empieza a decaer.
- Módulo de elasticidad: Es la pendiente de la curva Esfuerzo Vs. Deformación en su zona elástica. El modulo es una medida de la rigidez de un material. A mayor módulo de elasticidad se requerirá más fuerza para que el material se deforme.

$$E = \frac{Esfuerzo, \sigma}{Deformacion unitaria, \varepsilon}$$

- Módulo de resistencia ( $E_r$ )= área bajo la curva Esfuerzo Vs. Deformación en la zona elástica, es la energía elástica que un material absorbe o libera durante la aplicación y liberación de la carga aplicada.

$$E_r = \frac{1}{2} \times Esfuerzo de cedencia \times deformación de cedencia$$

### 2.3.2 Ensayo de compresión.

El ensayo de compresión, es similar al ensayo de tracción, pero tiene una dificultad que es la de aplicar una carga axial o concéntrica, dependiendo de la probeta que

---

<sup>7</sup> ASKELAND, op. cit, p. 133-135.

se vaya a utilizar. Es posible que cuando se apliquen fuerzas de compresión, se produzcan esfuerzos de flexión.

Estos esfuerzos pueden aparecer debido a la fricción que generan las caras de la probeta y las superficies de las placas de apoyo de la máquina para ensayos, por eso, para este tipo de ensayo se recomiendan lubricar las probetas de manera que se pueda evitar la fricción.

Mediante este ensayo se puede determinar el límite de elasticidad del material, el límite de fluencia y el límite de resistencia, solo en caso de ocurrir fractura de la probeta.

## 2.4 PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas son las características que tiene cada material, que lo diferencia de otro y que define para qué tipo de aplicación puede ser usado. Existen varias propiedades algunas de las cuales son:

- **Elasticidad:** es la capacidad de algunas materias a sufrir deformaciones reversibles, por la acción de una fuerza externa, y de recuperar su forma una vez la fuerza ha cesado.
- **Plasticidad:** es la propiedad que tiene un material a deformarse definitivamente.
- **Resistencia a la torsión:** es la máxima fuerza de torsión que resiste un material antes de romperse.
- **Resistencia a la tracción:** es la fuerza última que se le aplica a un material antes que se rompa.
- **Resistencia a la fluencia:** es la fuerza que se necesita para deformar el material sin que recupere su forma original luego de quitar la carga.
- **Resistencia a la fatiga:** deformación de un material que puede llegar a la rotura.
- **Ductilidad:** es la propiedad que permite a un material deformarse para obtener hilos o alambres.

- **Maleabilidad:** es la propiedad que permite a un material convertirse en láminas muy delgadas sin que se rompa.
- **Maquinabilidad:** es la capacidad de un material para ser mecanizados por arranque de viruta.

## **2.5 MATERIALES ESTRUCTURALES<sup>8</sup>**

### **2.5.1 Madera**

Se han mejorado las técnicas de ensamble y preparación de la madera. La mejora en técnicas de sujeción, retardo de combustión, podredumbre e infestación de insectos ha permitido a la madera permanecer vigente entre los materiales estructurales.

### **2.5.2 Acero**

Es el más versátil de los materiales estructurales, el más fuerte, resistente al envejecimiento y el más confiable. Sus puntos débiles más importantes son la transferencia de calor, pérdida de resistencia cuando está expuesto al fuego y oxidación.

### **2.5.3 Concreto**

Está conformado por tres elementos básicos: agua, cemento, arena y grava. Entre sus propiedades más destacadas está su bajo costo, resistencia a la humedad, oxidación, los insectos, el fuego y los desgastes. Su principal desventaja es la baja resistencia a esfuerzos de tracción por lo que se hace imperativo el uso de acero como refuerzo.

---

<sup>8</sup> MATERIALES ESTRUCTURALES. [en línea]. [consultado 20 de enero de 2016]. Disponible en internet < <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com.co/2014/04/materiales-estructurales.html>>

#### **2.5.4 Plásticos**

Tienen unos usos muy variados en la construcción. Su capacidad de tomar casi cualquier forma lo convierte en un material muy apetecido. Sus principales desventajas son la baja resistencia al fuego, expansión térmica, entre otras.

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1 TETRA PAK EN SUR AMERICA

En países como Chile, Ecuador, México y Colombia, entre otros, se vienen haciendo diferentes procesos para reciclar o re-utilizar el envase de tetra pak, una de estas prácticas corresponde al conformado de techos para un programa que se llama un “techo para chile”. Este programa nació el 18 de julio de 1997 con la esperanza de brindar un techo para varias familias chilenas.

El proceso que utilizan es el de separar los componentes del tetra pak. Ya separados se utiliza el plástico y el aluminio para formar un material llamado polialuminio, este material se prensa y se somete a una temperatura elevada para lograr una mejor adhesión de sus partículas, al material aglomerado (polialuminio prensado) se le da una forma específica y se deja secar, en este caso tejas para techos.

Pero no solo tejas son los objetos que se fabrican de este tipo de aglomerado, muchos otros también, como vasos, portavasos, vasijas, materas, elementos para las escuelas como pupitres, borradores etc.<sup>9</sup>

En Colombia el proceso es similar y se le ha dado el término hidropulpeo, con ayuda de agua y una máquina agitadora o licuadora gigante separan la pulpa (cartón) del plástico y el aluminio. Con la pulpa hacen un gran número de objetos como protectores para electrodomésticos, rellenos para calzado y bandejas para comida entre otros. Con el resto de material (aluminio y plástico) se hacen muebles, paredes y tejas que según Proplanet<sup>10</sup> son resistentes al calor, los ruidos y el fuego.

Proplanet es una empresa creada por colombianos y tiene como centro de operación el departamento de Antioquia, más exactamente en el municipio de La Estrella a unos 40 minutos de Medellín.

---

<sup>9</sup>LOS INTERESANTES USOS DEL TETRA PAK RECICLABLE. [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet < <http://prohumana.cl/2010/11/los-usos-del-tetra-pack-reciclado/>>

<sup>10</sup> PROPLANET. [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet < <http://www.proplanet.com.co/index.php/productos/9-linea-industrial2>>

Esta empresa fue creada en 2012 pero fue hasta el 2013 que abrió sus puertas, se especializa en la utilización de materiales reciclados para realizar sus productos, entre los que se encuentra el tetra pak.

Las tejas y las placas que se producen en esta empresa con el material aglomerado tienen dimensiones y pesos definidos, en la tabla 1 se muestran estos datos más a detalle y en la figura 3 el producto terminado.

Tabla 1. Datos técnicos de tejas y láminas de Proplanet

	Dimensiones	Área útil	Calibre	Peso
Teja	2.44 x 0.92 m	2.33 x 0.88 m	4-5 mm	10-13 kg
lamina	2.44 x 1.22 m	2.44 x 1.22 m	4-9-12-15 mm	

Fuente: <<http://www.proplanet.com.co/index.php/productos/9-linea-industrial2>>

Figura 3. Tejas y láminas.



Fuente: <<http://www.proplanet.com.co/index.php/productos/9-linea-industrial2>>

En Cali existe un grupo de investigación llamado GITEM, encabezado por el profesor Miguel Ángel Hidalgo, ingeniero mecánico, Magister en ingeniería mecánica, con un doctorado en énfasis en ingeniería de materiales.

Este grupo de investigación ha publicado varios artículos donde destaca las propiedades de diferentes materiales compuestos, en especial han trabajado con el tetra pak libre de pulpa de cartón al que llaman o identifican con las siglas LDPE/AL. Varios de los trabajos de este grupo los han llevado a cabo adicionando algunos

otros materiales, como por ejemplo las fibras de origen natural, con el título de COMPUESTOS LAMINADOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES: COMPORTAMIENTO MECÁNICO.<sup>11</sup>, MANUFACTURING RIGID BOARD BY PACKAGING WASTE CONTAINING ALUMINUM AND POLYETHYLENE<sup>12</sup>. En este paper el autor expone algunas propiedades mecánicas del material denominado LDPE/AL, al que previamente le hace un proceso de conformado con dos variables las cuales fueron la presión y tamaño de triturado, aunque la temperatura también estuvo presente, esta fue siempre la misma. Con este trabajo se consiguieron resultados muy buenos, esfuerzo a tensión paralelo a las fibras de 12.691 [Mpa] y un módulo de elasticidad de 1717.124 [Mpa], paralelos a las fibras de 10.372 [Mpa] y un módulo de elasticidad de 1372.37 [Mpa]. Esfuerzo de flexión también paralelos y perpendiculares a las fibras de 17.48 y 16.20 [Mpa] respectivamente.

Los procesos de conformado o reciclaje de tetra pak en Latinoamérica son muy parecidos, la mayoría separa el cartón del aluminio y el plástico y con cada componente hacen diferentes objetos o los hacen parte de objetos, mesas, portavasos, materas, borradores etc. No solo en Latinoamérica se atreven a utilizar este tipo de material, en Suecia una empresa de gran renombre como es BAHCO<sup>13</sup>, ha utilizado este material aglomerado para fabricar los mangos de sus destornilladores.<sup>14</sup>

Sin embargo cualquier persona puede decir, ¿Por qué, si se tienen los componentes separados, cartón, aluminio y plástico, no son destinados a volver a ser tetra pak?, la respuesta está en que una vez separado el cartón, el aluminio y el plástico están

---

<sup>11</sup> BARRERA, Mauricio. Hidalgo, Miguel. MINA, José. [en línea]. [consultado el 16 de enero de 2016]. Disponible en internet <<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7817/4639>>

<sup>12</sup> Hidalgo, Miguel. [en línea]. [consultado el 16 de enero de 2016]. Disponible en internet <<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/11092/1/JSIR%2070%283%29%20232-234.pdf>>

<sup>13</sup> BAHCO. [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet <[http://www.bahco.com/es/Herramientas\\_profesionales/destornilladores\\_ergo.html](http://www.bahco.com/es/Herramientas_profesionales/destornilladores_ergo.html)>

<sup>14</sup> NUEVOS USOS PARA LOS ENVASES DE CARTÓN DE TETRA PAK [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet <<http://www.noticiasambientales.com.ar/index.php?modulo=4&id=4528>>

aún pegados, y el aluminio, por la acción del ambiente se encuentra deteriorado o con óxido, la única forma de eliminar ese óxido es con un calor extremo lo que ocasionaría que el plástico se quemara contaminando el aluminio. Es por esto que se utiliza el aglomerado de plástico y aluminio para el prensado.

Aunque este proceso era el único que se podía hacer, el ingenio no tiene límites y es así como en Brasil, más concretamente en la ciudad de San Pablo encontraron la forma de volver el proceso de hacer tetra pak en un ciclo, pudiendo separar el plástico del aluminio.

Lo que hacen en la planta de reciclado de Clavijo, donde trabajan con tetra pak es lo mismo que hacen en los otros países, una licuadora gigante, agua y separan el cartón del plástico y el aluminio, posteriormente, el aglomerado es sometido a otro proceso para separar el aluminio del plástico y que el óxido se elimine por completo. El aglomerado es introducido en un reactor de plasma, el plasma es un gas calentado con energía eléctrica en la forma de un arco eléctrico; el chorro de plasma está sobrecalentado a 15000 °C y hace que se disuelva la adherencia del plástico y el aluminio, quemando los residuos de papel y eliminando el óxido. El plástico se convierte en gas y luego es convertido en cera de parafina, el aluminio surge como un metal fundido con un 99% de pureza de esta manera puede ser reutilizado para nuevos envases de tetra pak, junto al cartón previamente tratado<sup>15</sup>.

Existe un modo diferente de aprovechar todo el tetra pak, sin separar sus componentes, en algunos países se está trabajando con un material llamado Tectan<sup>16</sup>, que no es otra cosa que el tetra pak triturado y prensado con una elevada temperatura.

---

<sup>15</sup> VASCONCELOS, Yuri. Aprovechamiento total. En: Pesquisa FAPESP. Ed. 114 (Agosto, 2005).

<sup>16</sup> EL TECTAN, UN MATERIAL PARA LA SOSTENIBILIDAD. [en línea]. [consultado el 5 de enero de 2016]. Disponible en internet < <http://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/24369/noticias-medio-ambiente-medioambiente-medioambiental-ambiental-definicion-contaminacion-cambio-climatico-calentamiento-global-ecologia-ecosistema-impacto-politica-gestion-legislacion-educacion-responsabilidad-tecnico-sostenible-obama-greenpeace-co2-naciones-unidas-ingenieria-salud-Kioto-Copenhague-Mexico>>

El Tectan es un material de fácil elaboración, tiene tres procesos, el primero consiste en el lavado del material, el segundo es el triturado y el tercero es el prensado, luego de esto se le puede dar la forma que más se adecue a las necesidades particulares. En algunos artículos como “*PROYECTO TECHOS TETRA PAK (TECTAN)*”<sup>17</sup>, mencionan que el tamaño del material ronda los 3 mm, la presión debe ser de 180 a 200 toneladas y la temperatura a la cual se debe prensar es de 170 °C. Aunque el artículo describe el proceso de conformación de una empresa especializada en la elaboración de láminas de Tectan, también muestran algunos datos técnicos de este material, en la tabla 2 se pueden ver estos datos que ayudan a observar diferencias entre algunos otros material que ya se conocen mejor.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del tectan

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PRODUCTO	
Densidad	800-900 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de rotura	14.95 [N/mm <sup>2</sup> ]
Módulo de elasticidad	1050 [N/mm <sup>2</sup> ]
Absorción de agua a 24 horas	< 1.0%
Hinchazón de agua a 24 horas	< 0.8%
Comportamiento frente a ambientes marinos	Sin deterioro
Resistencia química	Detergente, lejía, hcl; muy buena
Estabilidad longitudinal frente a cambios de temperatura	24 h a 70°C 0.05 %
Resistencia al arranque de tornillos	< 1.625 [N]
Resistencia al impacto	Muy buena
Mecanizado	Cortar, clavar ... muy bueno

<sup>17</sup> PROYECTO TECHOS TETRA PAK (TECTAN). [en línea]. [consultado el 6 de enero de 2016]. Disponible en internet < [http://www.academia.edu/9220955/Proyecto\\_Techos\\_Tetrapack\\_Tectan\\_](http://www.academia.edu/9220955/Proyecto_Techos_Tetrapack_Tectan_)>

Estabilidad dimensiona frente a cambios de humedad	En longitud < 0.5 %
--	---------------------

Fuente:

<[http://www.academia.edu/9220955/Proyecto\\_Techos\\_Tetrapack\\_Tectan\\_](http://www.academia.edu/9220955/Proyecto_Techos_Tetrapack_Tectan_)>

Además de los anteriores datos, el artículo expone algunas otras propiedades como que el material es resistente al fuego, la abrasión y tiene buena absorción acústica. Estos datos fueron abalados de acuerdo a la norma NTC 2261<sup>18</sup>, para madera, tableros de partículas aglomeradas para aplicaciones exteriores no estructurales.

Este material es muy conocido en países europeos en especial en Alemania, China, una de las potencias mundiales hoy en día, utiliza este material para diferentes usos, allí el nombre que recibe es “*chiptec*”.

### 3.2 MÉXICO

Actualmente se está haciendo un concreto a base de polímeros ya que presentan unas mejores prestaciones que el concreto convencional, en lo que se refiere a aspereza, porosidad, resistencia a sustancias agresivas, alta resistencia a las altas temperaturas. El concreto polimérico es un material compuesto producido en base a agregados inorgánicos como arena y grava que se mantienen juntos mediante un aglutinador de polímero y no con agua como el concreto tradicional. Mientras pasa el tiempo las regulaciones gubernamentales van incrementando y obligan a idearse nuevas formas de combinar materiales para hacerlos más “verdes”, este es el caso del concreto polimérico, se están realizando estudios para poner materiales reciclables en el concreto polimérico como por ejemplo: PET, HDPE, agregados de plástico. Sin embrago, el Tetra pak se ha convertido en una real alternativa para sustituir una serie de agregados que se requieren para la elaboración del concreto polimérico y se considera que es tan viable la alternativa del Tetra Pak que ya se

---

<sup>18</sup> NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2261 [en línea]. [consultado el 6 de enero de 2016]. Disponible en internet < <http://tienda.icontec.org/brief/NTC2261.pdf> >

están llevando a cabo estudios para determinar las propiedades del concreto polimérico con agregados de Tetra Pak. En el experimento variaron la concentración de desechos de Tetra Pak del 0 al 6%.

Los resultados fueron más que buenos, evidenciaron un incremento en el esfuerzo de flexión, compresión y módulo de elasticidad<sup>19</sup>.

### **3.3 AUSTRALIA**

Hay tablas de cemento que se han reforzado con fibras de madera, se estudia la posibilidad de usar fibras de Tetra Pak en vez de usar madera. Los investigadores evaluaron las propiedades mecánicas de las tablas de cemento hechas con residuos de Tetra Pak, variando 2 parámetros (densidad: 800, 1000 y 1200 [kg/m<sup>3</sup>] y relación cemento/fibra: 60:40, 70:30 y 80:20). Fueron evaluados el módulo de ruptura, módulo de elasticidad, absorción de agua e hinchamiento.

El módulo de ruptura y elasticidad decrecieron con respecto a las tablas de control, aunque los resultados mostraron que las tablas hechas con material reciclado de Tetra Pak muestran buenas características<sup>20</sup>.

---

<sup>19</sup> MARTÍNEZ LÓPEZ, Miguel, MARTÍNEZ BARRERA, Gonzalo y otros. Waste materials from Tetra Pak packages as reinforcement of polymer concrete. En: International Journal of Polymer Science. Vol. 2015, Article ID 763917. Disponible en internet <<http://dx.doi.org/10.1155/2015/763917>>.

<sup>20</sup> PARICHATPRECHA R., PAOLENG P., PHENRAT T., JITSANGIAM P. Mechanical properties of cement-bonded composite board produced from aseptic carton waste. Third international conference on sustainable construction materials and technologies.

## **4. DISEÑO DEL EXPERIMENTO**

### **4.1 RECOLECCIÓN**

La recolección del tetra pak se realizó mediante una fuerte estrategia de reciclaje en diferentes colegios de la ciudad de Bucaramanga y Floridablanca. Se identificó que era más sencillo y económico recoger el material donde el consumidor primario y no en los puntos de disposición final de residuos.

### **4.2 LAVADO Y SECADO**

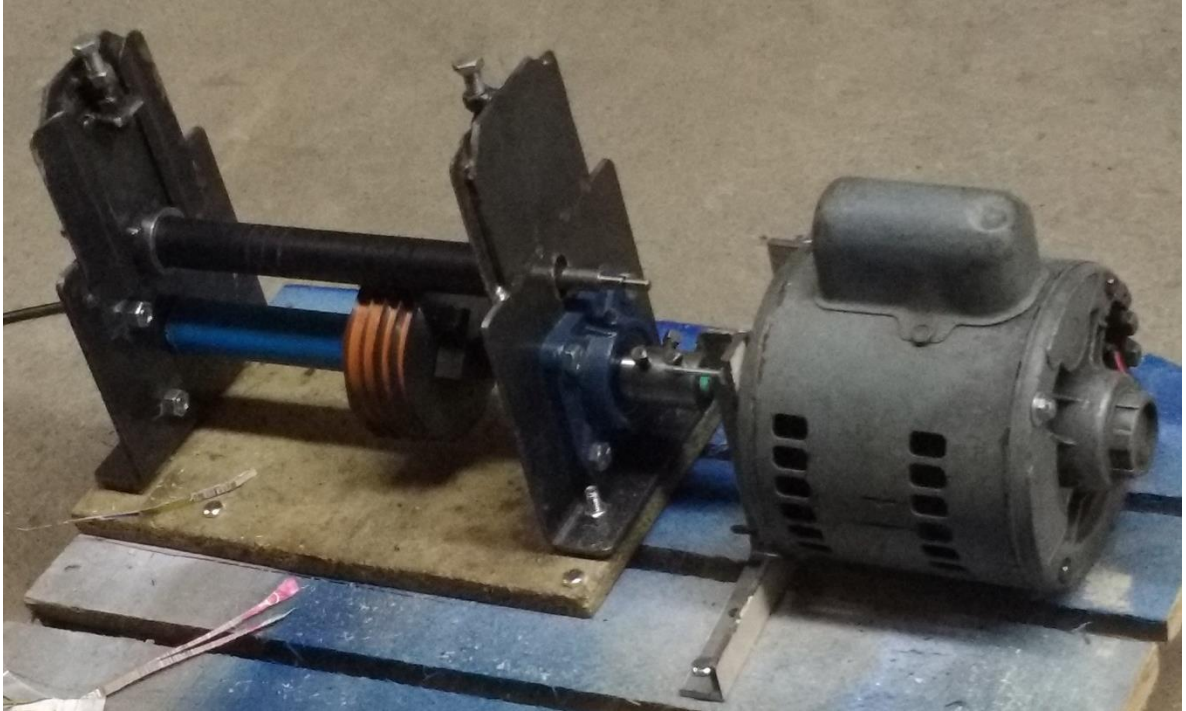
El lavado del tetra pak se llevó a cabo de forma manual y el secado se realizó a la intemperie. Una limpieza adecuada del tetra pak permitió tener un tiempo de almacenamiento más prolongado, lo cual fue necesario debido al gran número de cajas que se debían recolectar para llevar a cabo las pruebas.

### **4.3 CORTADO O TRITURADO**

El corte por ser uno de los parámetros que se desean comprobar, se llevó a cabo muy cuidadosamente. Se evidenció que el corte manual (como se pensó realizar en un primer momento) iba a ser demasiado demorado por lo que se tomó la decisión de idear algún otro método para realizar el corte.

El corte se llevó a cabo mediante una máquina, ver figura 4, que fue desarrollada especialmente para este trabajo. La máquina consta de 10 cuchillas de acero rápido insertadas en un eje de goma dura lo que permitía que todas las cuchillas giraran a una misma velocidad y en un mismo sentido. Para tener las dimensiones del tetra pak triturado deseadas fue necesario poner arandelas metálicas entre las cuchillas (cada una de 3 mm de espesor) y mediante dos prisioneros hacer un solo conjunto de las cuchillas y los espaciadores (arandelas).

Figura 4. Maquina cortadora de Tetra Pak.



Fuente: autores

Un rodillo en la parte superior de las cuchillas fue el encargado de “aprisionar” la caja y que las cuchillas pudieran realizar el corte. Un motor eléctrico ( $\frac{1}{4}$  hp, 1800 rpm y 110 Vac) fue el encargado del giro del eje.

En un primer momento se introdujo la caja para que salieran tiras de longitud igual al largo original de la caja y anchas como el espaciado que tengan las cuchillas. Este proceso se realizó hasta que se sacaron tiras de la totalidad de las cajas que se estimaron para cada una de las tres medidas de triturado. A continuación se introdujeron las tiras en sentido perpendicular a las cuchillas para que de este modo quedaran cuadros con medida de sección de la puesta en los espaciadores.

Este proceso se llevó a cabo para las tres medidas, ver figura 5, de triturado que se desean comprobar. Para la primera medida de triturado (1 a 3mm) se puso una arandela entre las cuchillas lo que daba una distancia entre las mismas de 3mm.

Para el segundo tamaño de triturado (4 a 6mm) se pusieron 2 arandelas y para el tercer tamaño (7 a 10 mm) se pusieron 3 arandelas.

Figura 5. Tetra Pak en tiras y cuadros.



Fuente: autores

#### **4.4 PREPARACIÓN DEL MATERIAL PARA EL PRENSADO**

La preparación del material para prensarlo se hizo de forma que el material se mantenga en una posición y no se escape, para garantizar esto se optó por introducir el tetra pak en bolsas que sirvieron de molde y no lo dejaron escapar así se obtuvieron láminas de tetra pak al final del proceso con un espesor determinado por la norma aplicada. A cada bolsa, y para cada tamaño de triturado, se le asignó un peso específico, de esta manera se garantiza que la cantidad de material en cada probeta fuera la misma y así tener más control del experimento.

## **4.5 PRENSADO DEL TETRA PAK**

Hay 3 parámetros de vital importancia en el prensado del Tetra Pak para obtener las placas correctamente, que se consultaron a lo largo de la recolección de datos existentes en la literatura.

### **4.5.1 Presión**

De gran importancia en el proceso de conformado, depende de esta la homogeneidad que va a tener el bloque de Tetra Pak conformado. Una presión muy alta deformaría el panel, una presión muy baja no compactará los elementos de la forma adecuada. En la bibliografía consultada se encuentran valores de prensado desde 150 [Kg/cm<sup>2</sup>] (2175 psi aproximadamente)<sup>21</sup> hasta 25 [Kg/cm<sup>2</sup>] (362 psi aproximadamente)<sup>22</sup>. Teniendo en cuenta que se trata de un proceso en el cual se trata de reutilizar un producto de desecho y que se quiere ser lo más “verde” posible, el proceso de prensado se hará con la menor presión necesaria, debido a que a mayor presión el sistema de prensado deberá ser más grande y por ende más costoso.

De acuerdo a ensayos realizados a materiales de similar proceso de manufactura (bambú prensado)<sup>23</sup> se podría esperar que al aumentar la presión del proceso se generen menos espacios intersticiales en el material compactado, lo que genera una mayor resistencia a la fluencia y de igual forma módulo de elasticidad.

### **4.5.2 Temperatura**

El polietileno, presente en las cajas de Tetra Pak, es el encargado de aglutinar el producto, sirve de unión entre el cartón y el aluminio. Para que cumpla este

---

<sup>21</sup> HIDALGO, Miguel, MUÑOZ, Mario, QUINTANA, Karen. Análisis del compuesto polietileno aluminio reforzado con fibras cortas de fique en disposición bidimensional. En: Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. Vol. 32. No 1 (2012); p 89-95.

<sup>22</sup> DOMÍNGUEZ LEPE, J.A. y GUEMEZ PACHECO, D. Fabricación y evaluación de paneles aplicables a la industria de la construcción a partir del reciclaje de envases multicapa (Tetra brik). En: Revista académica de la FI-UADY. Vol. 14. No 03(ene, 2011); p. 193.

<sup>23</sup> MORA RODRÍGUEZ, Lena, HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jorge y otros. El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica. En: Revista ingeniería de construcción. Vol. 23. No 3 (Dic, 2008); p. 170-186.

propósito debe llevarse a alta temperatura, que fundirá el polietileno y al ser compactados todos los elementos pueden unirse en una sola masa. Temperaturas demasiado altas pueden hacer que el polietileno se queme y desaparezca, quedando así la masa sin material aglutinante, lo que ocasionaría un módulo de elasticidad muy bajo, obteniendo un material muy frágil. La temperatura a la que el proceso de conformado se ha llevado a cabo en estudios previos, oscila entre los 160°C<sup>24</sup> y 170°C<sup>25</sup>.

En un estudio realizado en 2008 sobre la incidencia de la presión y la temperatura en placas de bambú (Rodríguez, Hernández, Martinera, Jiménez)<sup>26</sup> resultó que a medida que aumenta la presión, también debe hacerlo la temperatura para obtener mejores propiedades mecánicas, se espera que los resultados sean similares debido a la semejanza de los materiales analizados y deberán ser corroborados con el análisis posterior a los ensayos propuestos.

#### **4.5.3 Tamaño de triturado**

Teniendo tamaño de triturados grandes se pueden llegar a presentar vacancias en el material que no son deseables, por lo que se van a manejar tres tamaños de triturado:

- Triturado pequeño (1 a 3 mm).
- Triturado mediano (4 a 6 mm).
- Triturado grande (7 a 10 mm).

---

<sup>24</sup> DOMÍNGUEZ LEPE, J.A. y GUEMEZ PACHECO, D, op. cit, p. 192.

<sup>25</sup> HIDALGO, Miguel, MUÑOZ, Mario, QUINTANA, Karen. Análisis del compuesto polietileno aluminio reforzado con fibras cortas de fique en disposición bidimensional. En: Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. Vol. 32. No 1 (2012); p 89-95.

<sup>26</sup> MORA RODRÍGUEZ, Lena, HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jorge y otros. El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica. En: Revista ingeniería de construcción. Vol. 23. No 3 (Dic, 2008); p. 170-186.

#### 4.5.4 Proceso de prensado.

Para prensar este material se utilizó una prensa MEGA KPD-30, ver figura 6, cuyo valor máximo de presión fue 700 [kg/cm<sup>2</sup>], valor que no fue utilizado; la prensa se modificó para cumplir las especificaciones de las probetas que se propusieron. Se adaptaron dos planchas o placas de 30 x 30 x 3 cm, cada una con 1 resistencia eléctrica para calentarlas. Ya que la temperatura se tiene que mantener constante en tres valores diferentes para prensar se hace necesario tener un control de temperatura, se determinó que la mejor opción era tener un control PID, para esto se usó el control REX C-100, uno para cada placa.

Figura 6. Prensa MEGA KPD-30 modificada con control de presión y temperatura.



Fuente: autores

Entre placa y material se colocó un papel mantequilla para evitar la adherencia del material a las placas; el material tuvo un tiempo de prensado constante de 10 minutos independiente de todas las variables contempladas. Cada placa fue codificada para su reconocimiento y seguimiento.

#### 4.6 MUESTREO

Para este experimento se requirió tener 27 muestras diferentes, tabla 3, que se codificaron de acuerdo al tamaño de triturado, tabla 4, la temperatura, tabla 5, y la presión, tabla 6, a la cual fueron prensadas como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Codificación de las muestras de tetra pak conformado.

			NÚMERO DE EXPERIMENTOS
A	AT1	AT1P1	1
		AT1P2	2
		AT1P3	3
	AT2	AT2P1	4
		AT2P2	5
		AT2P3	6
	AT3	AT3P1	7
		AT3P2	8
		AT3P3	9
B	BT1	BT1P1	10
		BT1P2	11
		BT1P3	12
	BT2	BT2P1	13
		BT2P2	14
		BT2P3	15
	BT3	BT3P1	16
		BT3P2	17
		BT3P3	18
C	CT1	CT1P1	19
		CT1P2	20
		CT1P3	21
	CT2	CT2P1	22
		CT2P2	23
		CT2P3	24
	CT3	CT3P1	25
		CT3P2	26
		CT3P3	27

Fuente: autores.

Tabla 4. Tamaño del triturado.

NOMBRE	TAMAÑO
A	1-3 mm
B	4-6 mm
C	7-10 mm

Fuente: autores.

Tabla 5. Temperaturas propuestas.

NOMBRE	TEMPERATURA
T1	155°C
T2	170°C
T3	185°C

Fuente: autores.

Tabla 6. Presiones propuestas.

NOMBRE	PRESIÓN
P1	5 kg/cm <sup>2</sup>
P2	15 kg/cm <sup>2</sup>
P3	25 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: autores.

#### 4.7 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

Luego de tener las muestras se prepararon las probetas de acuerdo a dos normas para los ensayos de tracción y compresión, la norma ASTM D638-14<sup>27</sup> (MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA PROPIEDADES DE TRACCIÓN DE PLÁSTICOS) para los ensayos de tracción y la norma ASTM 695-15<sup>28</sup> (MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA PROPIEDADES DE COMPRESIÓN DE PLÁSTICO RÍGIDO) para los ensayos de compresión.

La norma para ensayos de compresión dice que para especímenes entre 3.2 y 6.4 mm de espesor, se debe preparar probetas de 12.7 x 12.7 mm, ver figura 7 y si el espesor es diferente, las probetas deben ser de una longitud igual al doble de su anchura o su diámetro en caso que la probeta sea cilíndrica<sup>29</sup>.

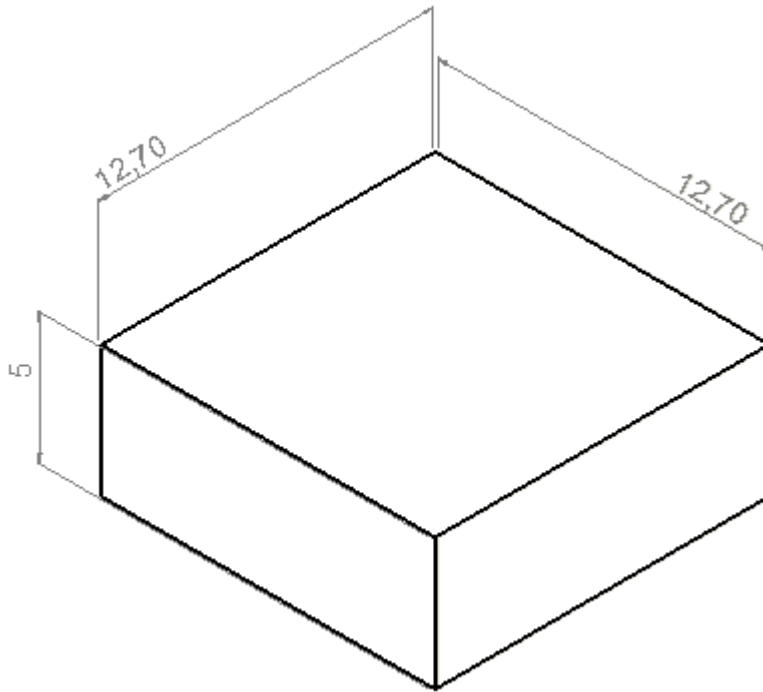
---

<sup>27</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D638-14. West Conshohocken. ASTM. 2015.

<sup>28</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D695-15. West Conshohocken. ASTM. 2015.

<sup>29</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D695-15. West Conshohocken. ASTM. 2015. p. 2, 3.

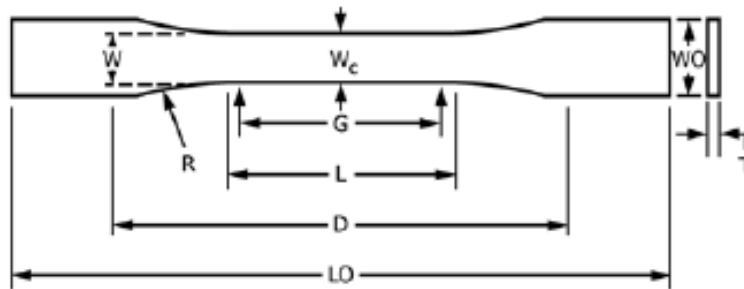
Figura 7. Probetas para ensayo de compresión plástico rígido.



Fuente: autores

La ASTM D638-14 para ensayos de tensión muestra 5 tipos de probetas, cada una hecha para diferentes opciones de espesor o de muestra, según las muestras recogidas el tipo de probeta tuvo que ser la de tipo I<sup>30</sup>, en la figura 8 y 9 se muestra como debe ser la probeta y sus dimensiones.

Figura 8. Probeta para ensayos de tracción.



Fuente: ASTM D638-14 MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA PROPIEDADES DE TRACCIÓN DE PLÁSTICOS.

<sup>30</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D638-14. West Conshohocken. ASTM. 2015. p. 3,4

Wc= 13 mm    G= -----    L= 57 mm    D= 115 mm    LO= 165 mm  
T= Espesor    WO= 19 mm    R= 76 mm    W= 13 mm

Figura 9. Probetas ensayo de tracción



Fuente: autores

#### **4.8 EXPERIMENTACIÓN**

Habiendo obtenido las muestras correspondientes a cada una de las condiciones a evaluar y teniendo en cuenta las dimensiones de la norma ASTM 695-15 se procedió al corte de las probetas que fue realizado de forma manual. Fueron cortadas 3 probetas de cada muestra para que cada una de ellas fuera llevada a su respectivo ensayo. Para la condición 1 (Tamaño A, Presión 1 y Temperatura 1) se tuvieron 3 probetas codificadas como 1-1, 1-2 y 1-3 respectivamente, este proceso se repitió para las 27 condiciones a analizar para un total de 81 probetas a ensayar (ver tabla 3).

#### 4.8.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN.

La prueba se realizó en una máquina universal de ensayos, ver figura 10 y 11, que se acomoda a la perfección al tipo de ensayo que se necesitaba realizar. La máquina cuenta con un software, ver figura 12, que debe ser alimentado con la sección y el espesor de la probeta a la que se le estuviera haciendo el ensayo. La figura 13 muestra como fue el montaje de la probeta en la máquina. Cada una de las pruebas se llevó a cabo a una velocidad de 100 mm/min y una carga de 20 kN. La prueba se llevó a cabo hasta que la gráfica (Esfuerzo Vs Deformación, figura 14) mostraba ruptura en la probeta, en ese momento la prueba se detenía y se hacía el montaje de la siguiente probeta.

Figura 10. Máquina universal de ensayos.



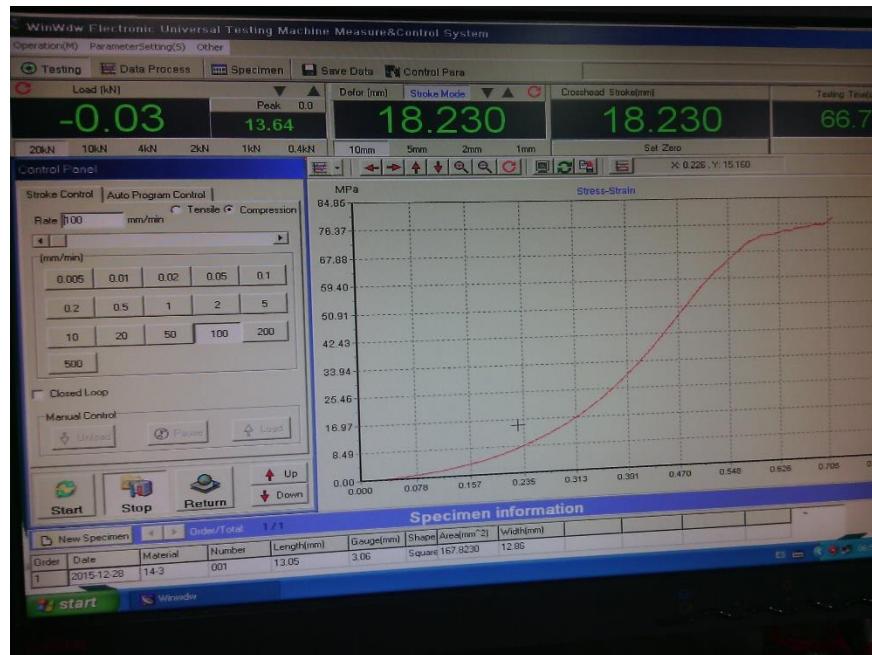
Fuente: autores

Figura 11. Placa de máquina universal de ensayos.



Fuente: autores

Figura 12. Condiciones para la prueba a compresión.



Fuente: autores.

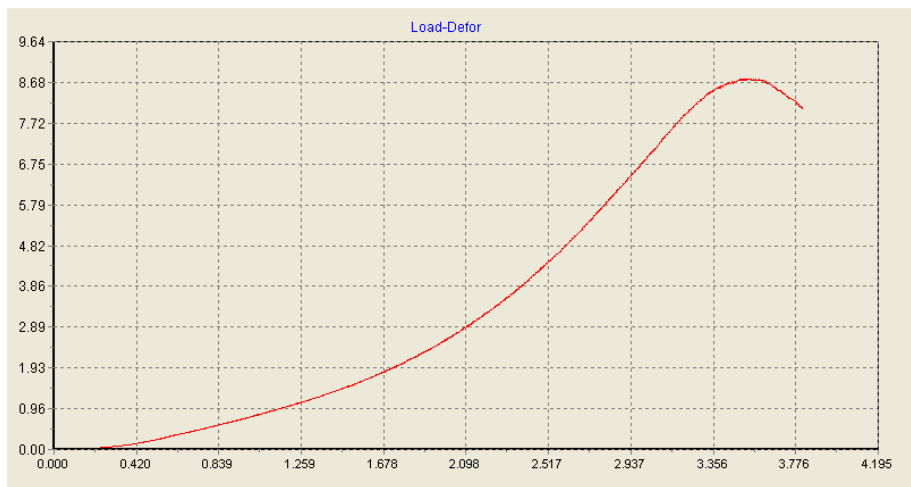
Figura 13. Montaje de la probeta en máquina universal de ensayo.



Fuente: autores.

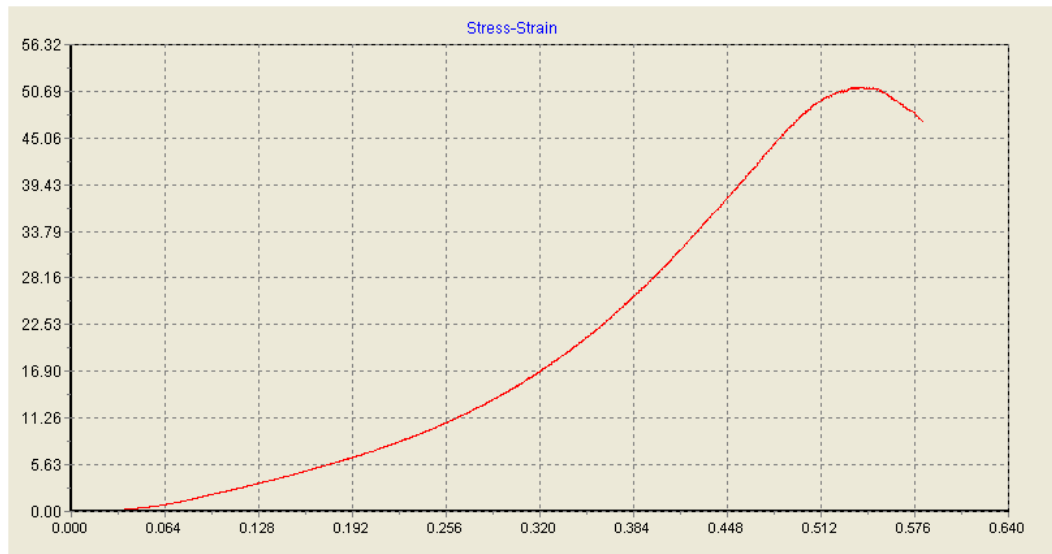
El software de la máquina da como resultados una tabla que trae la fuerza y el desplazamiento de las mordazas, además de la gráfica de Fuerza [kN] Vs Desplazamiento [mm] y Esfuerzo [Mpa] Vs Deformación unitaria [mm/mm].

Figura 14. Carga Vs Desplazamiento probeta 1-1 para ensayo de compresión



Fuente: autores

Figura 15. Esfuerzo Vs Deformación unitaria probeta 1-1 para ensayo de compresión.



Fuente: autores

## 4.8.2 ANÁLISIS ENSAYO DE COMPRESIÓN

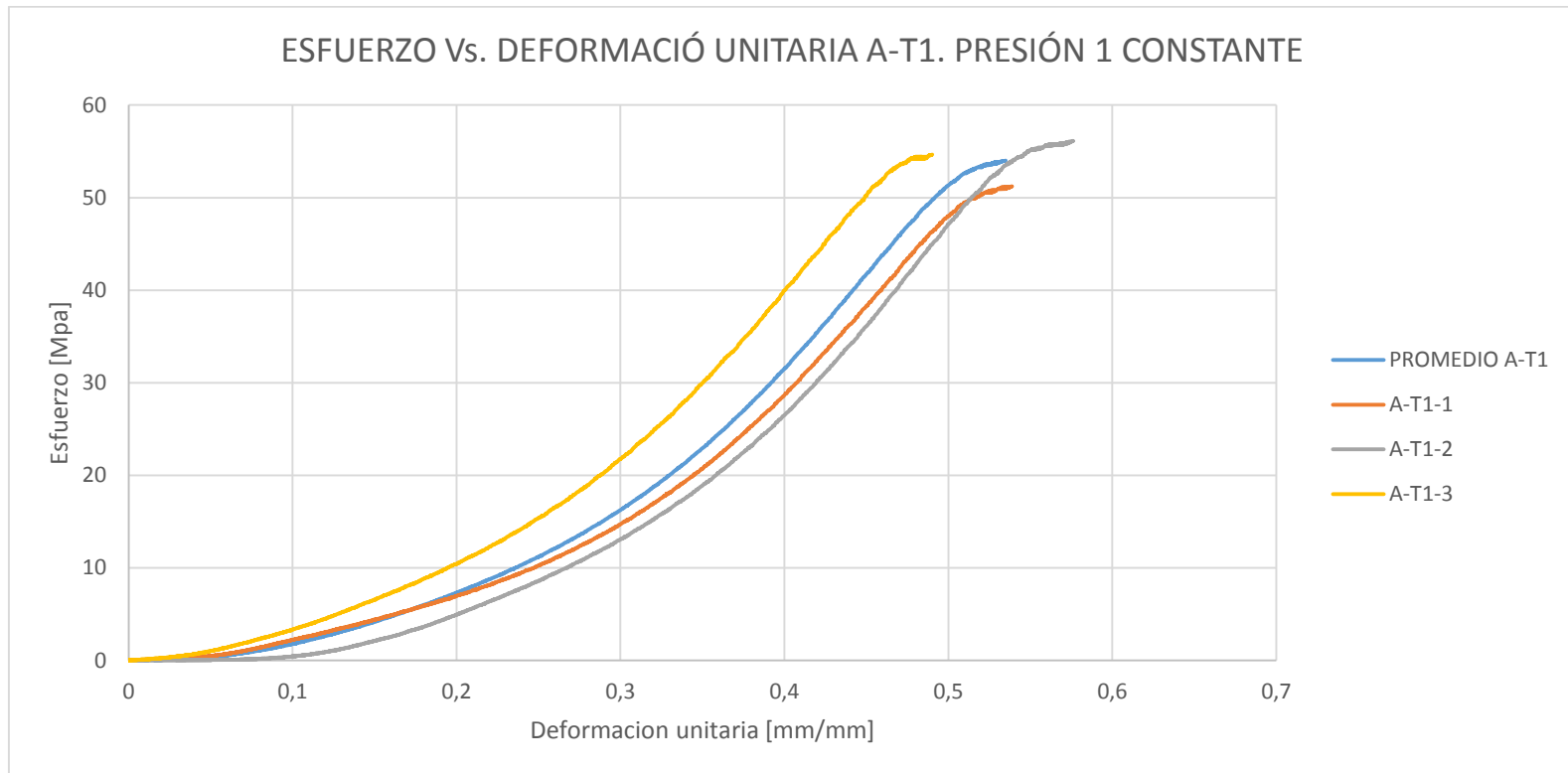
Tras realizar las pruebas de compresión se debió escoger cuáles eran las mejores condiciones para luego llevarlas a las pruebas de tracción. El criterio que se utilizó para hacer la escogencia es el del esfuerzo máximo, lo que quiere decir que las 3 probetas que tengan el esfuerzo máximo promedio más alto pasarían a la siguiente etapa del proceso. Dicho esfuerzo se obtuvo promediando los resultados de las tres pruebas que se llevaron a cabo para cada espécimen.

### 4.8.2.1 Obtención de promedio

- 1) En tabla de resultados que da el software de la máquina universal de ensayos se muestra la carga, el desplazamiento, carrera y tiempo de muestreo ( para nuestro caso es relevante solo la carga y el desplazamiento) por lo que se hace necesario calcular el esfuerzo y la deformación unitaria:
- 2) Usando Excel se tabularon los datos de Carga, Desplazamiento, Esfuerzo y Deformación unitaria.

- 3) Para el análisis se tuvieron en cuenta solo los datos anteriores al esfuerzo máximo, los posteriores se desecharon ya que en ese punto se tiene deformación plástica que no es deseada en materiales estructurales.
- 4) Se realizó el promedio sumando uno a uno los puntos de la tabla Esfuerzo Vs Deformación empezando por el esfuerzo máximo de cada probeta y continuando así con cada uno de los puntos y dividiendo en 3 el resultado de cada suma (ver figura 16). Este proceso se realizó tanto para el Esfuerzo como para la deformación.
- 5) Se graficaron los resultados de Esfuerzo Vs Deformación unitaria obtenidos para cada probeta, el Esfuerzo y la Deformación unitaria promedio.

Figura 16. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria A-T1 para ensayo de compresión



Fuente: autores

- 6) Los pasos del 1 al 5 se llevaron a cabo para cada una de las probetas ensayadas.

#### **4.8.2.2 Selección de mejores condiciones**

Teniendo las 3 gráficas (ver gráfica 17, 18 y 19) se procedió a seleccionar las 3 mejores condiciones, teniendo en cuenta que las 3 que tengan un esfuerzo promedio más alto serán las seleccionadas.

Las figuras 17, 18 y 19 muestran que el material se comportó de similar forma a diferentes variables de conformado, afirmación que se puede comprobar observando las pendientes de la zona elástica de cada curva, lo que confirma el criterio de selección (Esfuerzo Máximo) de los especímenes a los que se les hizo el ensayo de tracción.

Mediante el método observación de las figuras 17, 18 y 19 se pudo determinar cuáles son los especímenes que tuvieron un mayor Esfuerzo máximo y para determinar su valor exacto fue necesario remitirse a los datos arrojados por el software de la máquina de ensayos universales.

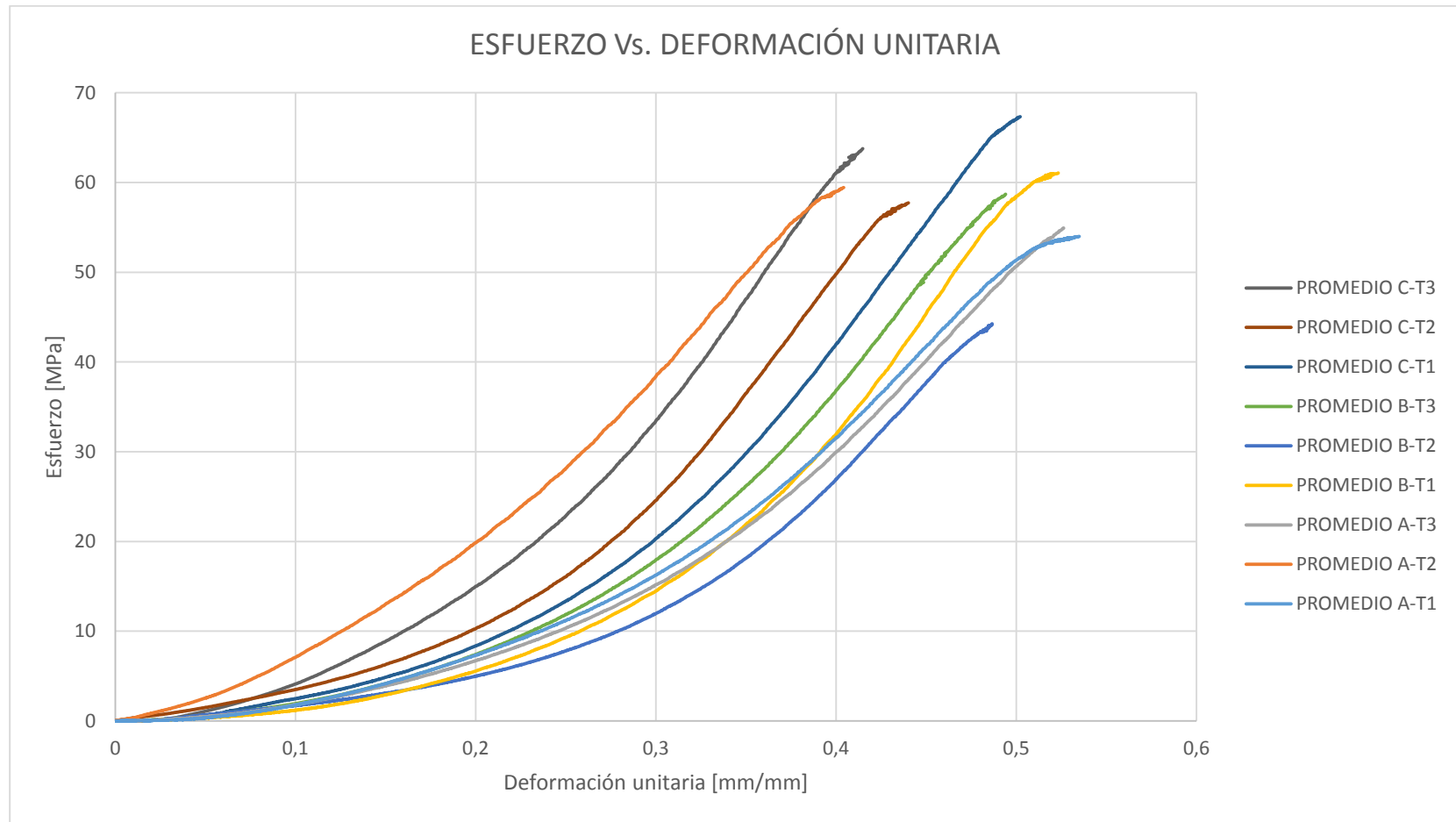
Tabla 7. Posibles parámetros de influencia óptimos.

<b>Especímen</b>	<b>Esfuerzo Máximo</b>	<b>Deformación Unitaria</b>
B-T2-P2 (14)	85,33	0,6460
B-T2-P3 (15)	85,62	0,5972
C-T1-P3 (21)	81,21	0,5285

Fuente: autores

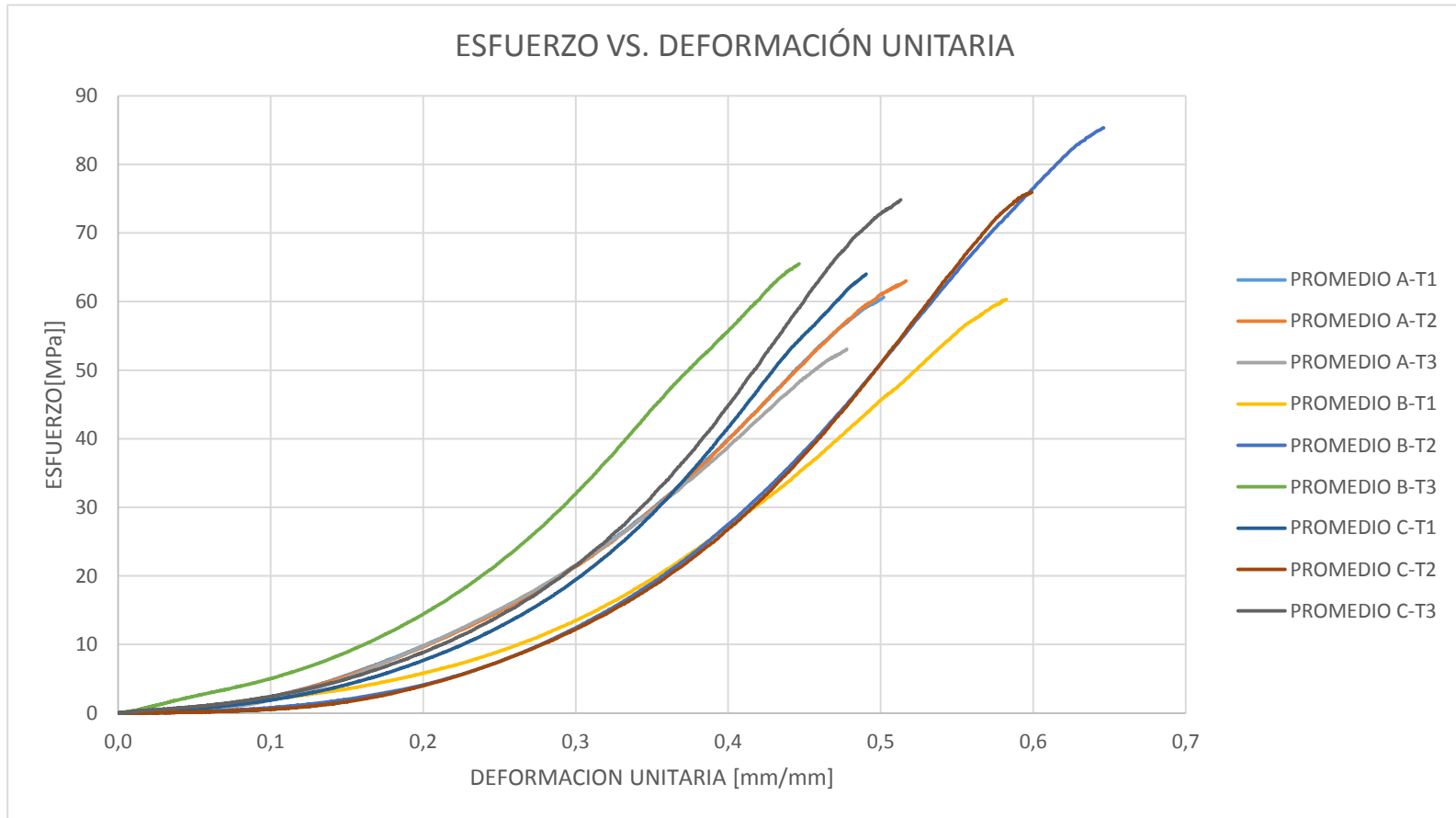
Se procedió a realizar el ensayo de tracción a las tres condiciones que sobresalieron respecto de las otras (Tabla 7).

Figura 17. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria a Presión 1 Constante para ensayo de compresión



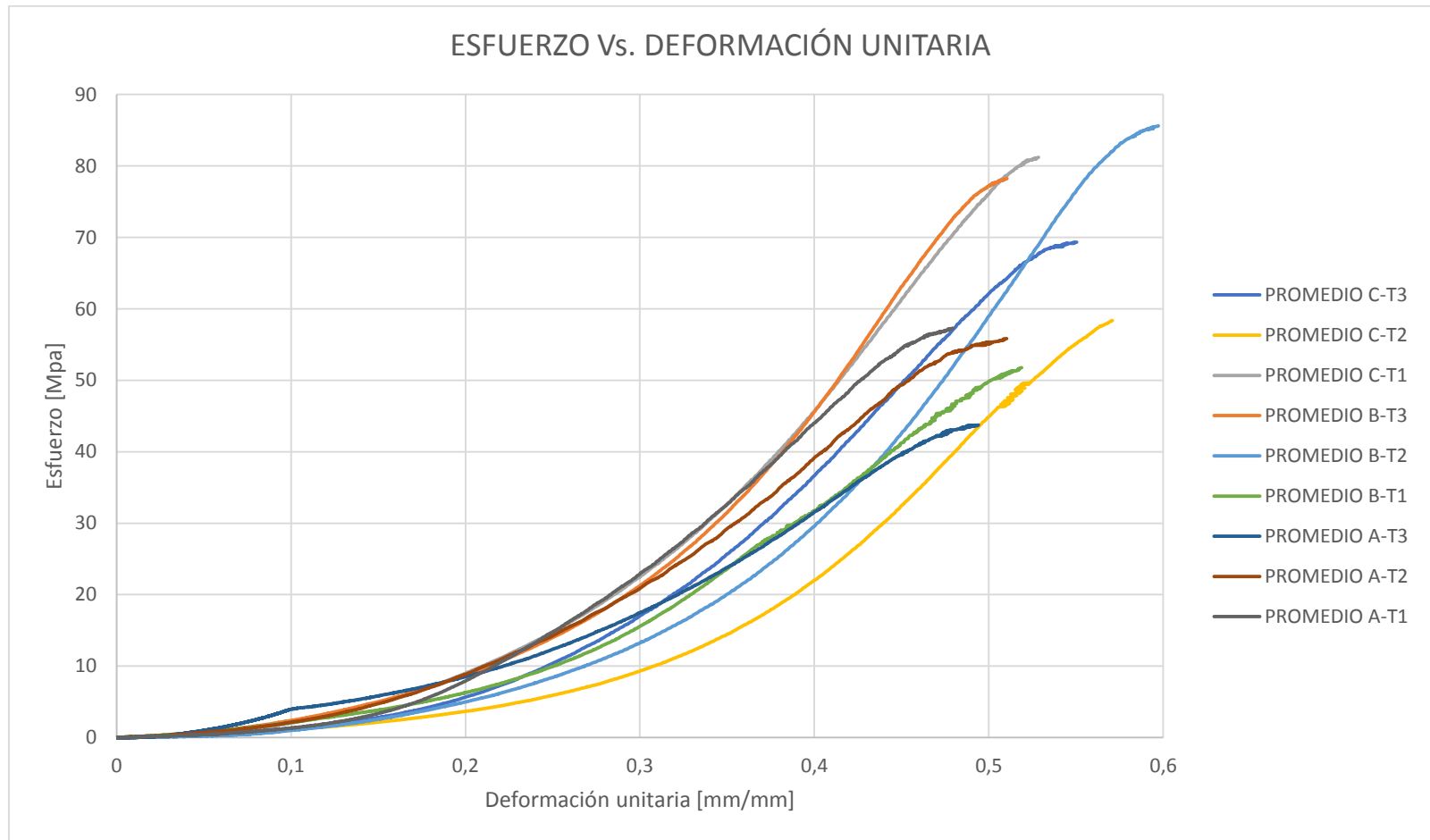
Fuente: autores

Figura 18. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria a Presión 2 Constante para ensayo de compresión



Fuente: autores

Figura 19. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación a Presión 3 Constante para ensayo de compresión



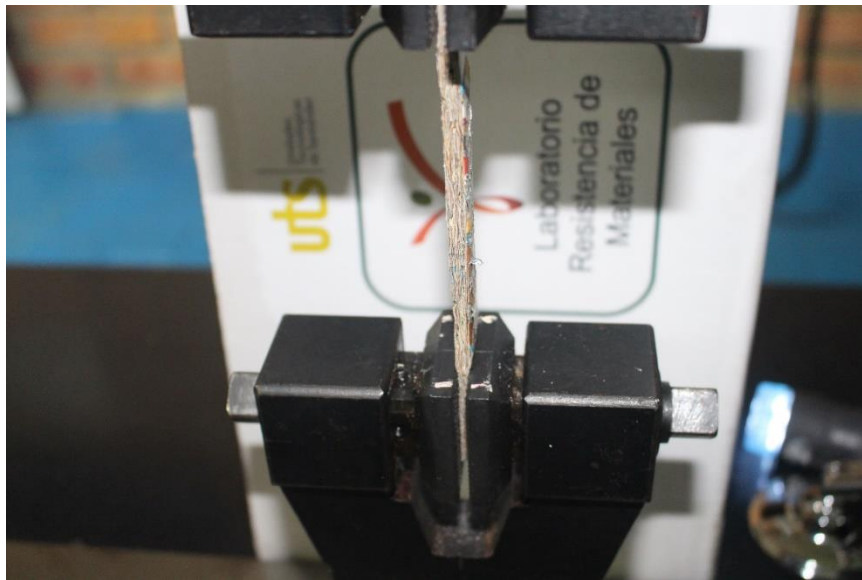
Fuente: autores

#### 4.9 ENSAYO DE TRACCIÓN.

El ensayo de tracción se hizo en la misma máquina que se utilizó para el de compresión, cada prueba se realizó con una velocidad de 0,5 mm/min, la prueba se realizó hasta que las probetas llegaron a la rotura.

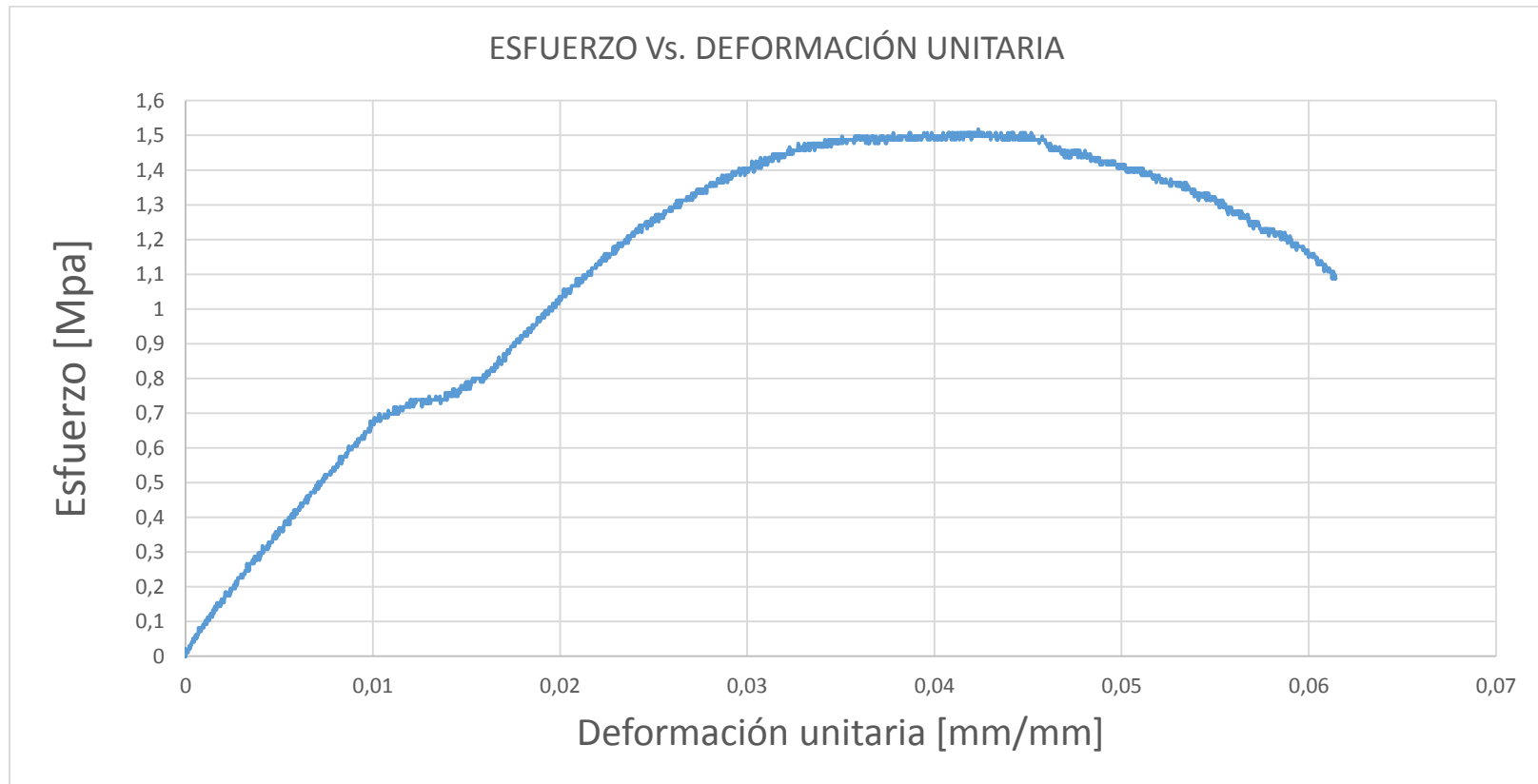
La máquina mostró los siguientes datos representados las gráficas 21, 22 y 23.

Figura 20. Montaje de la probeta en maquina universal de ensayos



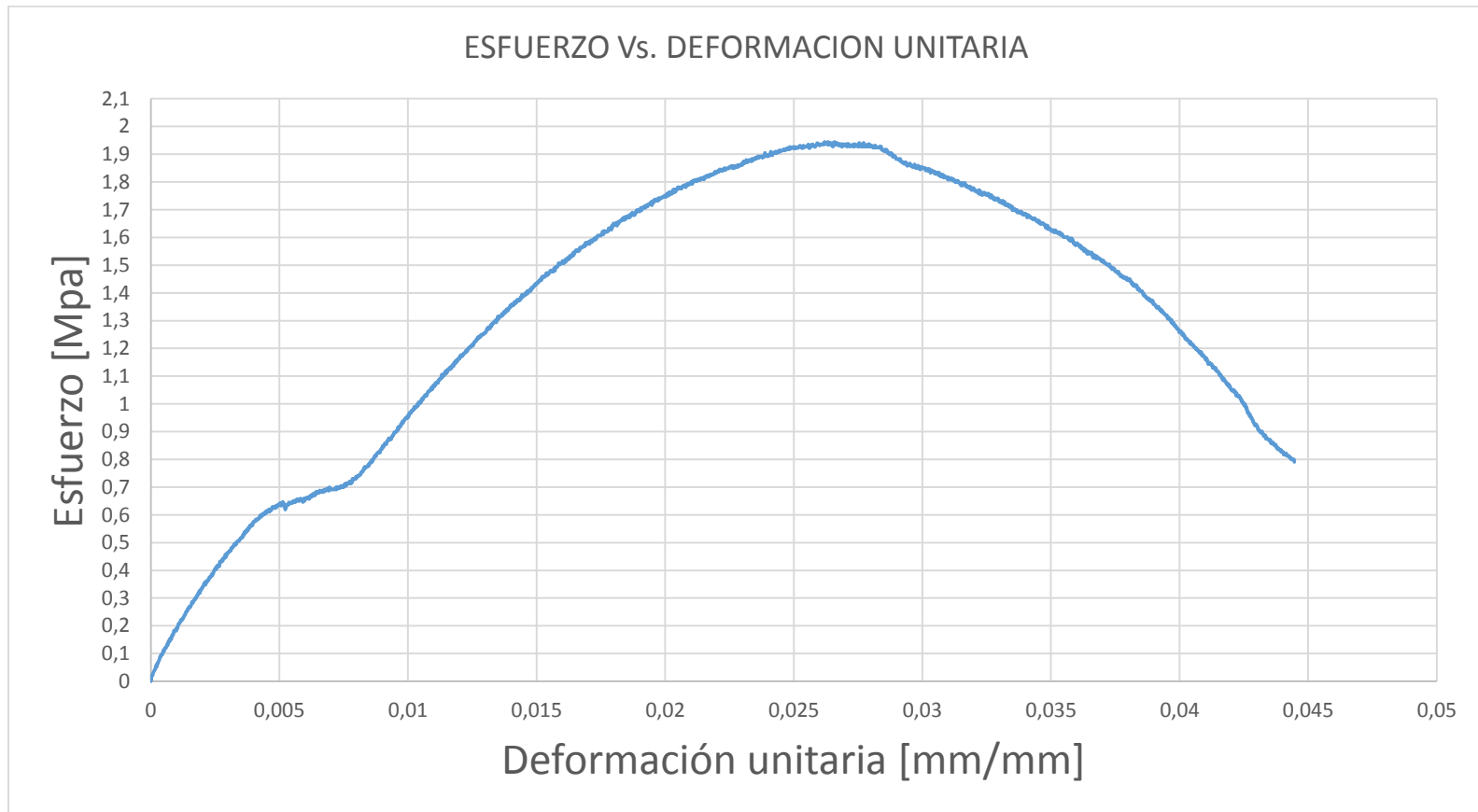
Fuente: autores

Figura 21. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación Unitaria, espécimen 14 para ensayo de tracción



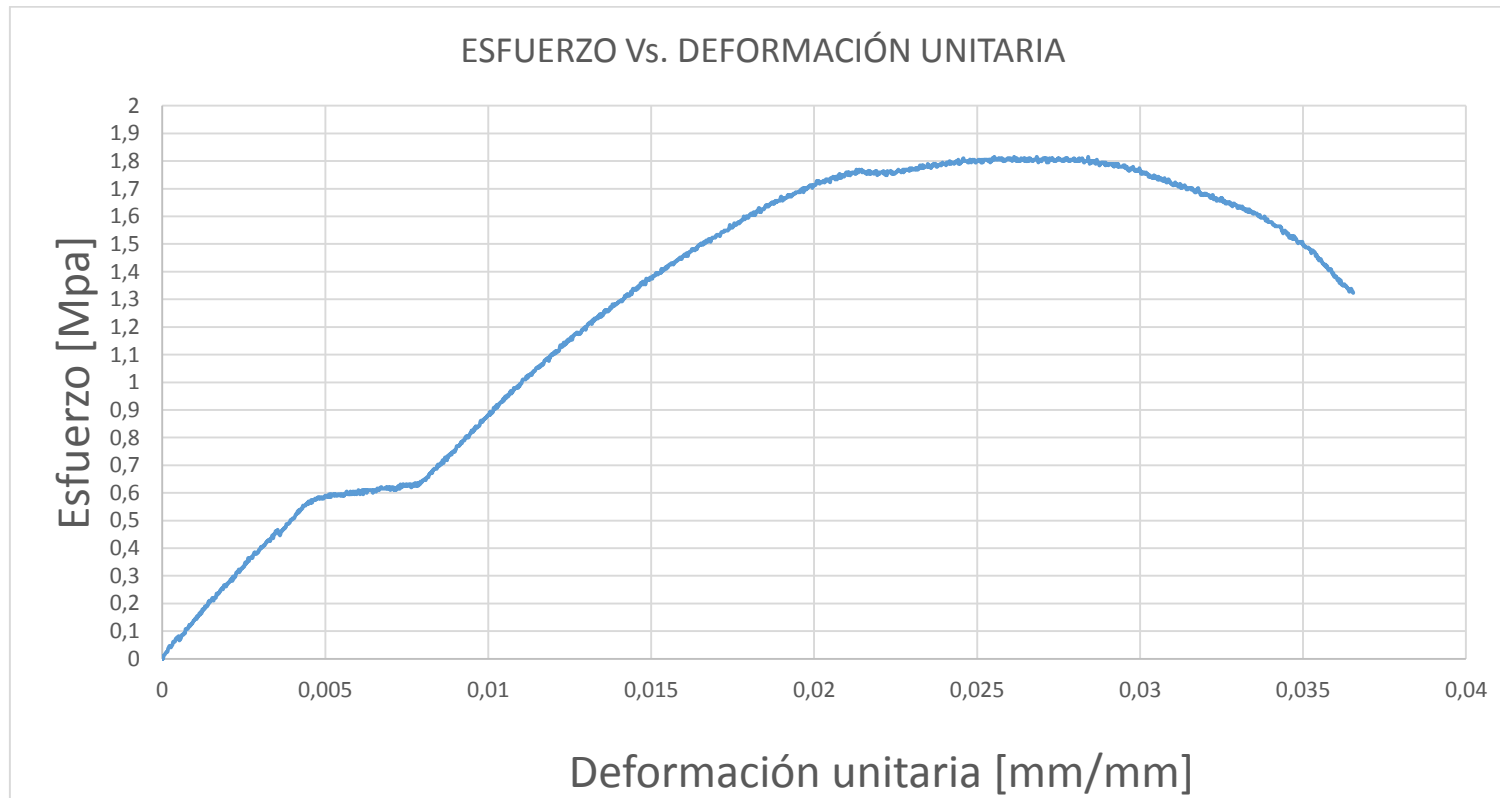
Fuente: autores

Figura 22. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria, espécimen 15 para ensayo de tracción



Fuente: autores

Figura 23. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación unitaria, espécimen 21 para ensayo de tracción



Fuente: autores

Ya con todos los datos y las curvas de cada ensayo, tanto a tensión como a compresión, se procedió a escoger el mejor valor de todas las variables involucradas en el proceso.

En los materiales estructurales se quiere siempre, que el esfuerzo al cual es sometido un material nunca supere la zona elástica para que pueda regresar a su estado original, esto da un referente o punto crítico que hay que tener en cuenta para escoger la mejor combinación de variables (temperatura, presión y tamaño).

Dicho lo anterior se puede determinar con total claridad que la muestra identificada con el código B-T2-P3 (15) es la mejor, es decir, con un tamaño de triturado de 3 a 7 mm, una temperatura de 170° C y una presión de 25 Kg/cm<sup>2</sup> se obtiene los mejores resultados.

## 5. OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.

### 5.1 Ensayo de tracción.

- Esfuerzo de cedencia.

Es el esfuerzo en el cual se pasa de un comportamiento elástico a plástico. Si se torna difícil su obtención a simple vista se puede tomar el punto en eje x de la gráfica (deformación unitaria) igual al 0.2% desde el origen, allí se traza un línea paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo Vs. deformación<sup>31</sup>. El esfuerzo que se busca es el punto donde la línea corta la curva.

En este caso, obtener este esfuerzo no es complicado ya que la gráfica muestra perfectamente el cambio de comportamiento.

$$\sigma_{cedencia} = 0.63 \text{ [Mpa]}$$

- Resistencia a la tensión.

Es el esfuerzo que se obtiene a la mayor fuerza aplicada dividida entre la geometría.

$$resistencia \text{ gráfica a la tensión} = 1.93 \text{ [Mpa]}$$

- Módulo de elasticidad.

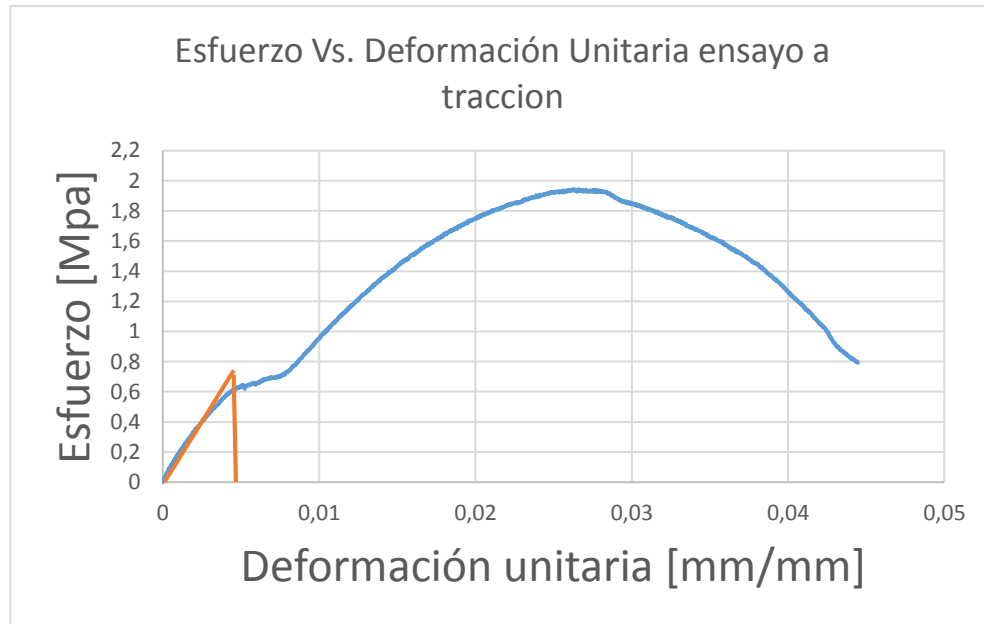
Es la pendiente de la parte plástica de la curva. Las gráficas que se evidencian del ensayo no muestran un comportamiento lineal de la curva en la parte elástica lo que hace difícil obtener de modo seguro el módulo de elasticidad, por esta razón se hablará de un módulo de elasticidad aparente cuyo valor se halló linealizando la porción plástica de la curva (ver figura 24). Se trazó una recta desde el origen hasta el punto de cedencia, con el valor de esfuerzo y el valor de la deformación de obtuvo el módulo de elasticidad:

---

<sup>31</sup> ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3ª ed. México distrito federal: International Thomson Editores, 1998. p. 134.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{0.63}{0.005} = 126 \text{ [Mpa]}$$

Figura 24. Linealización gráfica Esfuerzo Vs Deformación



Fuente: autores

- Módulo de resistencia (resiliencia)

Es el área que aparece bajo la porción elástica de la curva esfuerzo Vs. deformación<sup>32</sup>.

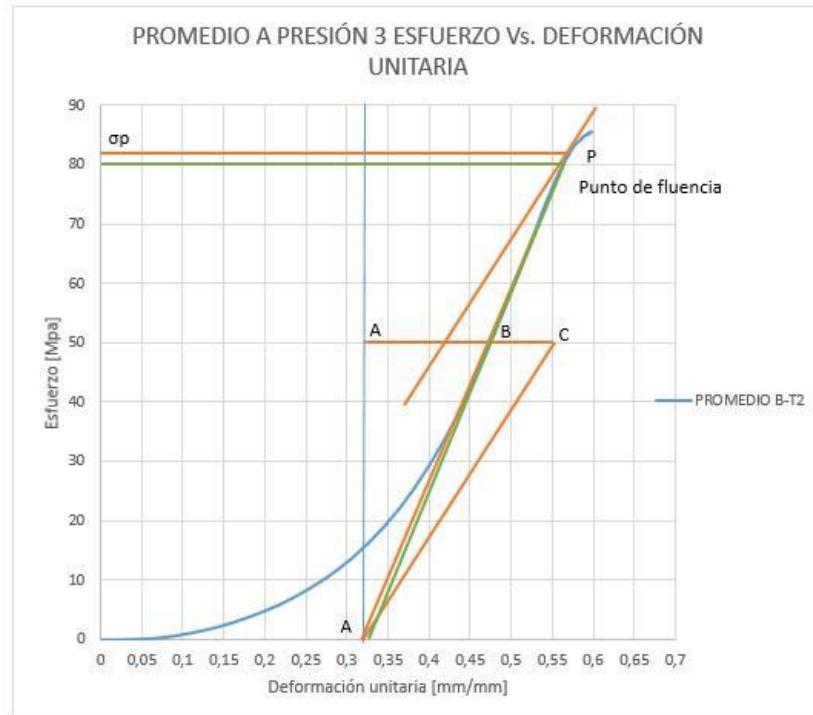
$$E_r = \frac{1}{2}(\sigma_{cedencia})(deformacion\ a\ la\ cedencia) = \frac{1}{2}(0.68)(0.01035) = 3.5 \times 10^{-3}$$

## 5.2 Ensayo de compresión.

- Límite de proporcionalidad elástica

<sup>32</sup> ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3ª ed. México distrito federal: International Thomson Editores, 1998. p. 135.

Figura 25. Análisis gráfico resultados prueba de compresión.



Fuente: autores

Mediante el método gráfico se halló este esfuerzo en la curva; en la parte rectilínea se trazó una línea que cortará el eje de las x (deformación unitaria), punto O, luego, a una altura arbitraria se escoge el punto B y se traza una horizontal perpendicular al nuevo eje de los esfuerzos hasta el punto A, luego se traza  $BC = \frac{1}{2} AB$ . Se unen los puntos C y O, paralela a esta línea se traza otra línea tangente a la curva de compresión encontrando el punto P, al igual que el esfuerzo máximo que puede permitirse el material antes de deformarse permanentemente.

$$\text{Limite de proporcionalidad elastica} = 82 \text{ [Mpa]}$$

- Límite de fluencia.

El límite de fluencia se calculó, al igual que el ítem anterior, de forma gráfica. Lo primero que se obtuvo fue la distancia al punto K por el método de offset.

$$OK = 0.2 \frac{l_0}{100}$$

Donde  $l_0$  es igual a al espesor inicial de la probeta.

$$OK = 0.2 \frac{3.19}{100} = 0.00638 \text{ mm}$$

Trazando una paralela a la curva de compresión, como se puede ver en la figura 25, se encontró el valor del punto donde el material empieza a fluir.

$$\text{limite de fluencia} = 80 \text{ [Mpa]}$$

## 6. Análisis de resultados.

Siguiendo con lo planteado, se analizó primero el esfuerzo de cedencia.

El valor numérico de este esfuerzo es de 0.63 [Mpa], un valor pequeño para materiales estructurales, esto se debe a la disposición de las fibras del material como se muestra en la figura 26, en este caso se presume que el componente que soporta la carga es la resina o el polietileno de baja densidad (PDBD), fundida y dispersada en la matriz. Los cuadrados de tetra pak conformado se adhirieron entre sí, como consecuencia de las condiciones de presión y la temperatura que fundieron y comprimieron para formar el material compuesto, al ser el plástico el material de menor sollicitación mecánica, se observan esfuerzos pequeños en la gráfica, que reflejan que el esfuerzo encontrado sea mucho menor que el esfuerzo reflejado por la literatura para este tipo de materiales. Se presume que el esfuerzo solo pudo ser soportado por la resina, tal vez, la presencia de cartón y el aluminio en el material compuesto evitan la adherencia total de todas las partículas de manera definitiva, repercutiendo en la separación de sus fibras al someter el material a cargas de tensión.

Figura 26. Deslizamiento de fibras a tracción.



Fuente: autores

El esfuerzo a la tracción para este material da un valor de 1.93 [Mpa], si se compara con el valor encontrado en la literatura para el polietileno de baja densidad cuyo valor está en un rango entre 5 y 25 [Mpa]<sup>33,34</sup>, dependiendo de la temperatura, se observa que el valor que arroja las gráficas de esfuerzo Vs. deformación no concuerdan, esto se debe, como se dijo anteriormente por la cantidad de plástico de la muestra, el valor de 5 a 25 [Mpa] representa una probeta hecha completamente de PDBD, con un área A determinada. Las probetas de este experimento están hechas de un material compuesto por lo que el área de la probeta debe ser reformada para el cálculo del esfuerzo a tensión. El tetra pak está constituido por un 75 % de cartón, 20% de polietileno y 5 % de aluminio, se puede asumir que toda muestra por pequeña que sea posee este mismo porcentaje de material, de igual manera se puede asumir que el porcentaje de área de PDBD corresponde al mismo porcentaje de composición en la caja de tetra pack.

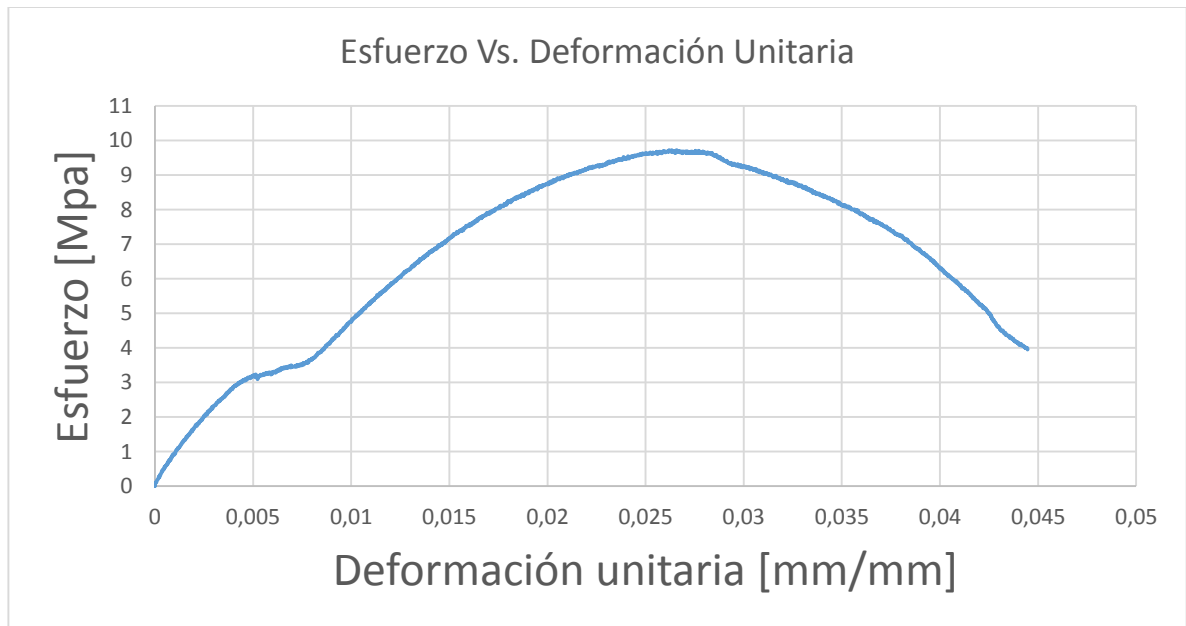
El área con la cual se obtuvo el esfuerzo de 1.93 [Mpa] fue de 61.44 [mm<sup>2</sup>], esta área se multiplicó por el 20% de contenido de plástico, la nueva área de interés fue de 12.28 [mm<sup>2</sup>] y con la misma carga se obtiene el verdadero esfuerzo a tensión que está soportando el PDBD igual a 9.63 [Mpa]. En la figura 27 se puede ver la nueva gráfica de Esfuerzo Vs. Deformación.

---

<sup>33</sup> MATBASE. [en línea]. [consultado 30 de enero de 2016]. disponible en internet <<http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/commodity-polymers/material-properties-of-low-density-polyethylene-ldpe.html#properties>>

<sup>34</sup> GOODFELLOW. [en línea]. [consultado el 30 de enero de 2016]. Disponible en internet <<http://www.goodfellow.com/E/Polyethylene-Low-Density.html>>

Figura 27. Gráfica Esfuerzo Vs. Deformación corregido para polietileno de baja densidad ensayo de tracción

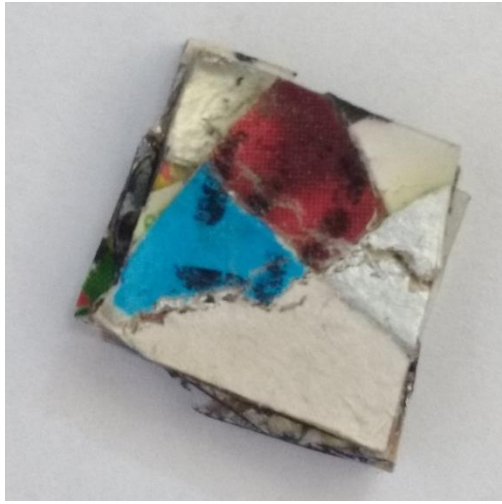


Fuente: autores

El límite de elasticidad, como se dijo anteriormente, es difícil de calcular con precisión por la trayectoria de la curva Esfuerzo vs Deformación unitaria, y por el comportamiento de la resina cuando se somete a cargas de tracción. Al linealizar la gráfica tomando el origen y el punto de cedencia se puede aportar un valor al límite de elasticidad aparente, con el propósito de dar un estimado para efectos de otros cálculos.

El esfuerzo de compresión refleja un valor aceptable para materiales compuestos de uso estructural. En tal sentido, el material es susceptible de usarse en condiciones de sollicitación a compresión, dado que los esfuerzos cortantes no se ven favorecidos ya que el efecto de las capas de cartón, aluminio, impiden el deslizamiento del polietileno en la dirección a 45° (ver figura 28,29).

Figura 28. Falla de material compuesto en ensayo de compresión.



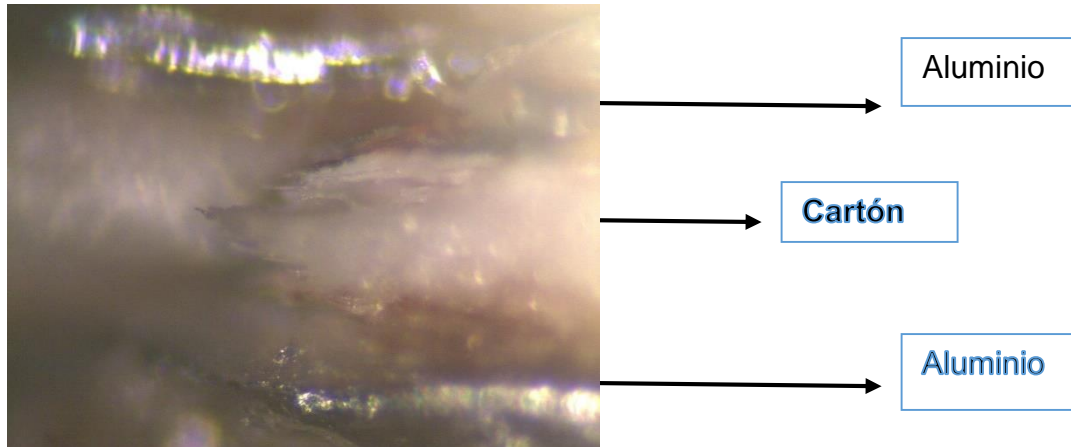
Fuente: autores

Figura 29. Deslizamiento capas cartón y aluminio en vista lateral ensayo de tracción



Fuente: autores

Figura 30. Corte de fibras de aluminio y cartón, vista al microscopio a 10x



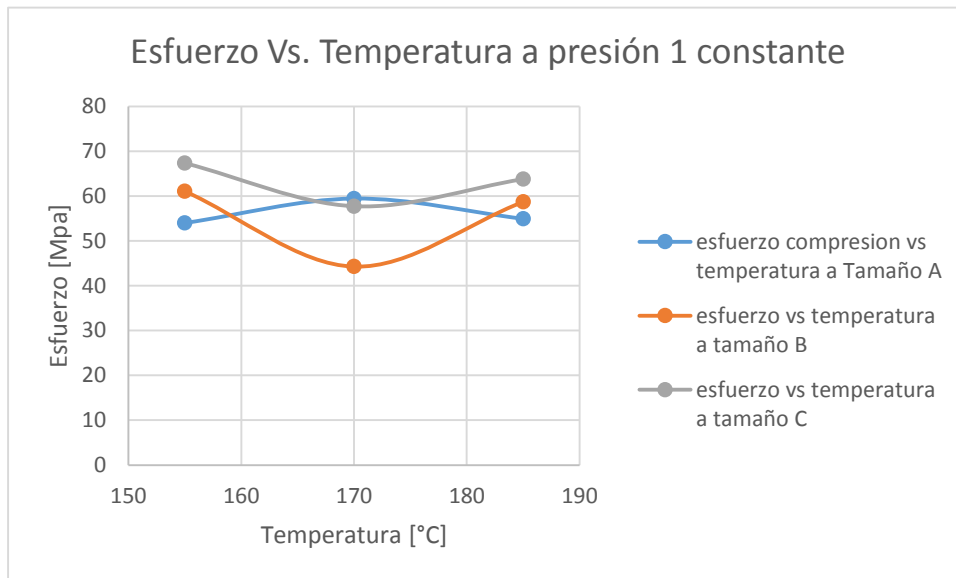
Fuente: autores

En la figura 30, se observa una muestra fracturada a compresión donde el corte aumentado 10X, se puede observar en la figura dos capas de aluminio y entre las dos capas de aluminio el respectivo cartón, confirmando que no sólo fractura la capa de polietileno, sino las otras dos capas. Con esta observación, se puede soportar lo dicho anteriormente que la carga es soportada por todo el material es decir por toda el área transversal de la probeta utilizada para el ensayo de compresión, lo que se traduce en un mayor valor de esfuerzo soportado.

### 6.1 INFLUENCIA DE LAS DIFERENTES VARIABLES

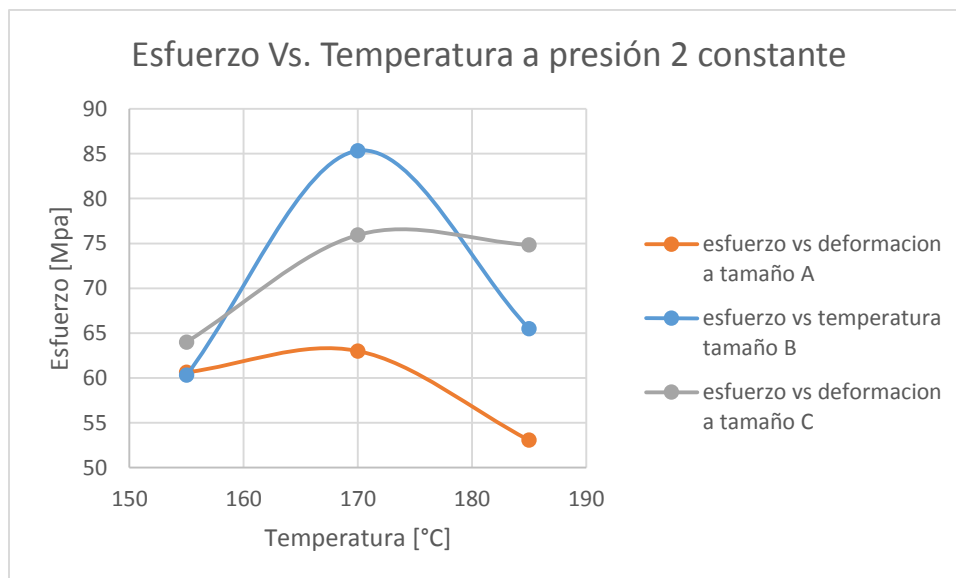
Se estudiaron tres diferentes variables en el proceso de conformado (presión, temperatura, y tamaño de corte) en la figura 31, 32 y 33 se puede observar el efecto que tuvo cada parámetro sobre el esfuerzo de compresión.

Figura 31. Gráfica Esfuerzo Vs. Temperatura y tamaño a presión 1 constante para ensayo de compresión.



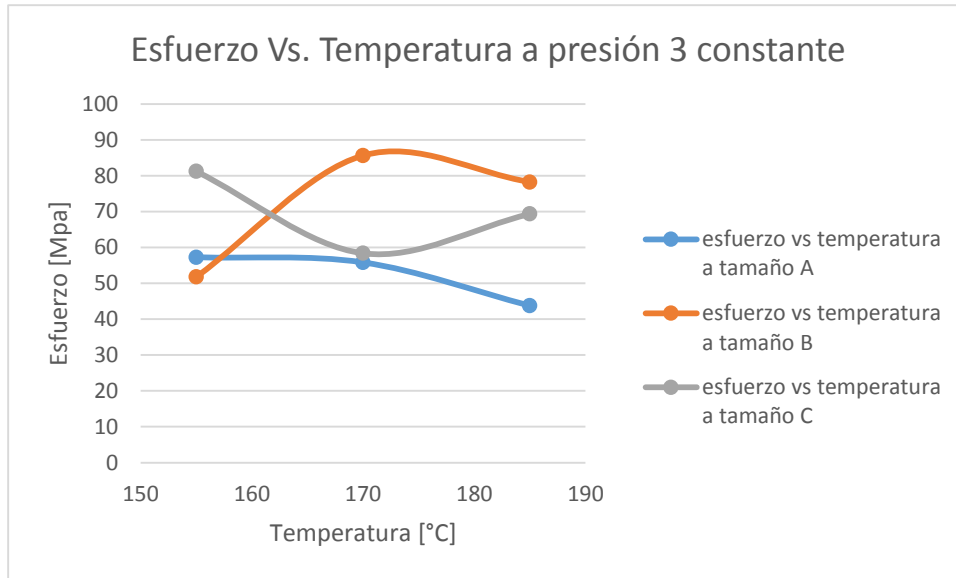
Fuente: autores.

Figura 32. Gráfica Esfuerzo Vs. Temperatura y tamaño a presión 2 constante para ensayo de compresión.



Fuente: autores

Figura 33. Gráfica Esfuerzo Vs. Temperatura y tamaño a presión 3 constante para ensayo de compresión.



Fuente: autores.

Los rangos de presión más adecuados para la compresión de las probetas están entre 15 y 25 [Kg/cm<sup>2</sup>], P<sub>2</sub> y P<sub>3</sub>, respectivamente; los valores de esfuerzo de compresión arrojados con P<sub>1</sub> son muy bajos. La temperatura de prensado debe estar alrededor de los 170 [°C] para que la adherencia entre el papel y el aluminio sea óptima, se presume que a una temperatura más alta el polietileno pierde propiedades adherentes. En cuanto al tamaño de corte no se aprecia una tendencia de incremento o decremento del esfuerzo de compresión, se considera que no tiene mucha influencia en el material conformado.

## 7. CONCLUSIONES

- Se encontró factible técnicamente la recuperación del tetra Pak conformado cuando la sollicitación a tracción no sea muy elevada.
- Se realizó un diseño de experimento, basado en la bibliografía encontrada, que permitiera identificar y variar los parámetros de influencia (presión, temperatura y tamaño de corte) lo que permitió determinar cuál de las 27 variaciones posibles presentó las mejores características mecánicas.
- Se realizaron pruebas de tracción de acuerdo a la norma D638-14. Se obtuvo un módulo de elasticidad aparente  $E=126$  [Mpa], resistencia a la tensión grafica= $1,93$  [Mpa]. Como el polietileno de baja densidad es el que se presume resiste la carga cuando se aplica a tracción se hizo necesario encontrar una resistencia a la tracción para el PDBD, resistencia a la tracción corregida para el polietileno= $9,63$  [Mpa].
- Se realizaron pruebas de compresión de acuerdo a la norma D695-15. Las gráficas resultado de los ensayos de compresión, evidencian que la gran mayoría de los especímenes ensayados muestran una pendiente similar mientras se encuentra en la zona elástica. Lo anterior indica que el material tiene un módulo de elasticidad homogéneo sin importar las condiciones a las cuales se conformó el material. El material presenta propiedades mecánicas aceptables, un esfuerzo a compresión igual a  $82$  [Mpa], debido a que las cargas aplicadas son soportadas por todo el material compuesto.
- El material puede situarse en la familia de los materiales ortótropicos pues sus esfuerzos o propiedades mecánicas dependen en gran medida de la distribución de sus fibras internas y de la dirección de la fuerza aplicada.

- El material compuesto es utilizable para la fabricación de soportes de sillas, escritorios, estantes y otras estructuras pequeñas en las cuales los esfuerzos que deben ser soportados sean en su gran mayoría de compresión.

## 8. RECOMENDACIONES

- Continuar el estudio de materiales compuestos que puedan ser conformados desde materiales reciclables en su totalidad como el Tetra Pak
- Modificar el corte del Tetra Pak de cuadros (como se realizó en esta ocasión) a tiras, esto con el propósito de analizar si el esfuerzo a tracción incrementa, ya que en este caso dio un valor bajo.
- Adicionar alguna fibra natural (bambú, cáñamo, fique, caña de azúcar) o fibras sintéticas (carbono, vidrio) o adicionar algún tipo de plástico termoplástico que permita incrementar el esfuerzo de tracción obtenido en este trabajo.
- Continuar buscando aplicaciones para el Tetra Pak conformado en diferentes áreas de la ingeniería como por ejemplo en el aislamiento térmico y acústico, transporte de líquidos, gases o granos, capacidad de soportar radiación, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D638-14. West Conshohocken. ASTM. 2015. p. 3, 4

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D695-15. West Conshohocken. ASTM. 2015. p. 2, 3.

ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3ª ed. México distrito federal: International Thomson Editores, 1998. p. 130.

BAHCO. [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet <URL:[http://www.bahco.com/es/Herramientas\\_profesionales/destornilladores\\_ergo.html](http://www.bahco.com/es/Herramientas_profesionales/destornilladores_ergo.html)>

BARRERA, Mauricio. Hidalgo, Miguel. MINA, José. [en línea]. [consultado el 16 de enero de 2016]. Disponible en internet <URL:<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7817/4639>>

DOMÍNGUEZ LEPE, J.A. y GUEMEZ PACHECO, D. Fabricación y evaluación de paneles aplicables a la industria de la construcción a partir del reciclaje de envases multicapa (Tetra brik). En: Revista académica de la FI-UADY. Vol. 14. No 03(ene, 2011); p. 193.

EL TECTAN, UN MATERIAL PARA LA SOSTENIBILIDAD. [en línea]. [consultado el 5 de enero de 2016]. Disponible en internet <URL:<http://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/24369/noticias-medio-ambiente-medioambiente-medioambiental-ambiental-definicion-contaminacion-cambio->

climatico-calentamiento-global-ecologia-ecosistema-impacto-politica-gestion-legislacion-educacion-responsabilidad-tecnico-sostenible-obama-greenpeace-co2-naciones-unidas-ingenieria-salud-Kioto-Copenhague-Mexico>

GOODFELLOW. [en línea]. [consultado el 30 de enero de 2016]. Disponible en internet < URL:<http://www.goodfellow.com/E/Polyethylene-Low-Density.html>>

HIDALGO, Miguel, MUÑOZ, Mario, QUINTANA, Karen. Análisis del compuesto polietileno aluminio reforzado con fibras cortas de fique en disposición bidimensional. En: Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. Vol. 32. No 1 (2012); p 89-95.

HIDALGO, Miguel. [en línea]. [consultado el 16 de enero de 2016]. Disponible en internet < URL:<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/11092/1/JSIR%2070%283%29%20232-234.pdf>>

HISTORIA DEL TETRA PAK. [en línea]. [consultado el 6 de junio de 2015] Disponible en internet <URL:<https://licdisgra.wordpress.com/2011/05/15/historia-del-tetra-pak/>>

LOS INTERESANTES USOS DEL TETRA PAK RECICLABLE. [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet < URL:<http://prohumana.cl/2010/11/los-usos-del-tetra-pack-reciclado/>>

MARTINEZ LOPEZ, Miguel, MARTÍNEZ BARRERA, Gonzalo y otros. Waste materials from Tetra Pak packages as reinforcement of polymer concrete. En:

International Journal of Polymer Science. Vol. 2015, Article ID 763917. Disponible en internet <URL:<http://dx.doi.org/10.1155/2015/763917>>.

MATBASE. [en línea]. [consultado 30 de enero de 2016]. Disponible en internet <URL:<http://www.matbase.com/material-categories/natural-and-synthetic-polymers/commodity-polymers/material-properties-of-low-density-polyethylene-ldpe.html#properties>>

MATERIALES ESTRUCTURALES. [en línea]. [consultado 20 de enero de 2016]. Disponible en internet <URL:<http://apuntesingenierocivil.blogspot.com.co/2014/04/materiales-estructurales.html>>

MORA RODRÍGUEZ, Lena, HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jorge y otros. El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta tecnológica. En: Revista ingeniería de construcción. Vol. 23. No 3 (Dic, 2008); p. 170-186.

NORMAS ASTM. [en línea]. [consultado el 19 de agosto de 2015]. Disponible en internet <URL:<http://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/normas-astm>>

NUEVOS USOS PARA LOS ENVASES DE CARTÓN DE TETRA PAK [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet <URL:<http://www.noticiasambientales.com.ar/index.php?modulo=4&id=4528>>

PARICHATPRECHA R., PAOLENG P., PHENRAT T., JITSANGIAM P. Mechanical properties of cement-bonded composite board produced from aseptic carton waste. Third international conference on sustainable construction materials and technologies

PROPLANET. [en línea]. [consultado el 4 de enero de 2016]. Disponible en internet < URL:<http://www.proplanet.com.co/index.php/productos/9-linea-industrial2>>

PROYECTO TECHOS TETRA PAK (TECTAN). [en línea]. [consultado el 6 de enero de 2016]. Disponible en internet < URL:[http://www.academia.edu/9220955/Proyecto\\_Techos\\_Tetrapack\\_Tectan\\_](http://www.academia.edu/9220955/Proyecto_Techos_Tetrapack_Tectan_)>

TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. [en línea]. [consultado el 6 de junio de 2015]. Disponible en internet < URL:<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/07/polietileno-pe.html>>

TETRA PAK [en línea]. [consultado 18 abril 2015]. Disponible en internet: <URL:<http://www.tetrapak.com/co/environment/recycling-and-recovery>>