

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---



FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES  
DE TARIMAS DE POLIETILENO RECICLADO”**

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA

ALFONSO TONATIU GONZÁLEZ SALAS

DIRECTOR DE TESIS:

M. en C. UBALDO EDUARDO MÁRQUEZ AMADOR



**Ciudad Universitaria, octubre 2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## Tabla de Contenidos

### RESUMEN

### 1. INTRODUCCIÓN

### 2. OBJETIVOS

#### 2.1 Objetivo General

##### 2.1.1 Objetivos Particulares

#### 2.2. Hipótesis de Trabajo

### 3. REVISION DE LA LITERATURA

#### 3.1. Introducción a los materiales

##### 3.1.1 Clasificación de los materiales

##### 3.1.2 Polímeros

##### 3.1.3 Clasificación de los Plásticos

##### 3.1.4 Polietileno

##### 3.1.5 Procesos de Conformado

#### 3.2 Impacto Ambiental

##### 3.2.1 Procesos de Reciclado

#### 3.3 Uniones Mecánicas

##### 3.3.1 Clasificación de las uniones

##### 3.3.2 Resistencia de remaches, pernos y pasadores

##### 3.3.3 Tipos de fallas en uniones con remaches, pernos y pasadores

##### 3.3.4 Uniones en la Madera

##### 3.3.5 Extracción de clavos en madera

##### 3.3.6 Unión de dos o más Planos

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Objeto de estudio

#### 4.1.1 Clasificación de muestras

#### 4.1.2 Control de muestras

#### 4.1.3 Método de Prueba

#### 4.1.4 Procedimiento para la toma de Datos

##### 4.1.4.1 Datos Obtenidos de las Pruebas de esfuerzo de tracción

##### 4.1.4.2 Datos Obtenidos de las Pruebas de esfuerzo cortante

#### 4.1.5 Manejo Estadístico

### 4.2 Presentación de Resultados

## 5. CONCLUSIONES

## 6. RECOMENDACIONES

## 7. BIBLIOGRAFÍA

## 1. INTRODUCCIÓN.

Las Tarimas de Carga son elementos indispensables en diferentes ámbitos dentro de la industria; Ya sean para labores de almacenaje o como medios para realizar maniobras de carga y descarga en centros de distribución, las tarimas de carga están presentes en todo momento.

Tradicionalmente, las tarimas de carga son fabricadas con madera, debido a varios factores, de entre los cuales podemos citar el bajo costo de obtención de la materia prima, su durabilidad, sus propiedades mecánicas, facilidad de manufactura, etc.

Sin embargo, con el avance tecnológico, los diferentes materiales a disposición del hombre para satisfacer sus necesidades han ido en aumento, lo que ha originado que materiales que se usaban de forma regular, sean sustituidos por nuevos compuestos que presentan ventajas en cuanto a propiedades mecánicas, costos económicos, ambientales o estéticos.

Tal es el caso de la madera, que ha sido sustituida en muchas aplicaciones, por materiales como aleaciones metálicas, compuestos cerámicos y plásticos.

Así pues, las tarimas de plástico han iniciado su incursión en el medio, probando que su naturaleza, les permite competir de frente con las clásicas tarimas de madera, e incluso brindar ventajas sobre estas últimas, por ejemplo la conservación del medio ambiente, sí es que hablamos de tarimas fabricadas con plástico reciclado.

Más aún, alrededor del mundo se han implementado una determinada serie de restricciones a la importación de productos que puedan ir embalados sobre una tarima o paleta de madera natural.

El motivo por el cual tienen lugar estas restricciones es impedir la propagación de plagas a través de organismos que puedan ir adheridos a la madera del interior o exterior de embalajes.

La F.A.O. (Food and Agriculture Organization of the United Nations) ha creado una normatividad denominada ISPM 15 ó NIMF, a la cual se acogen estos países, que regula el tratamiento y marcado de embalaje de madera necesario para evitar en daño a la flora que estos organismos pudieran causar.

Así pues, como toda industria que se encuentra en desarrollo, el campo de la fabricación de tarimas de plástico, tiene temas que profundizar y perfeccionar (diseño, manufactura, mercadotecnia) y que deben ser la base para un crecimiento continuo y sustentable.

Al carecer de un antecedente directo que pueda usarse de base tanto para el diseño como para la manufactura de tarimas fabricadas con base en plástico como materia prima, este documento pudiera tomarse como primer antecedente del tema en general.

Finalmente este trabajo está orientado a establecer el comportamiento mecánico que guardan las uniones de los elementos constitutivos más básicos de una tarima de Polietileno de Alta Densidad Reciclado: perfiles unidos mediante clavos.

## 2. OBJETIVOS.

### 2.1 Objetivo General.

Desarrollar las actividades necesarias para poder caracterizar las propiedades mecánicas de tarimas de Polietileno de alta densidad reciclado, buscando tener un mayor entendimiento del comportamiento que pudiera tener bajo un cierto estado de esfuerzos.

#### 2.1.1. Objetivo Particular.

Determinar el comportamiento mecánico de la unión, mediante clavos estriados, de perfiles de Polietileno de alta densidad reciclado sometidos a cargas de extracción normales y cortantes.

### 2.2. Hipótesis de trabajo.

- La falla mecánica resultante en ensayos de extracción normal y cortante en uniones de perfiles de PEAD reciclado, está asociada al número y características de los elementos de unión.
- La resistencia a la extracción normal y cortante de ensambles de perfiles de polietileno de alta densidad reciclado empleando clavos estriados se puede aproximar mediante un modelo matemático experimental probado en madera.

### 3. REVISION DE LA LITERATURA.

#### 3.1 Introducción a los materiales.

Todos tenemos alguna vaga idea de lo que es o lo que representa un material. Un concepto intuitivo e inmediato es la aceptación de que un material es la sustancia o elemento utilizado para fabricar un objeto. Otra alternativa es admitir que es la sustancia de la que está hecho un objeto.

Cualquiera de ambas ideas resulta lógica y aceptable, sin embargo, para fines prácticos definiremos que un material es la porción de materia a la que se le da un uso particular para desarrollar una actividad específica.

En nuestros días, existe una marcada y a la vez compleja interrelación entre la actividad del diseño, la manufactura y el material que se va a utilizar. Esto es debido a que se deben cumplir una serie de condiciones necesarias, tales como funcionalidad, resistencia, bajo peso, considerando también que el artículo deberá obtenerse al menor costo posible. Además, se requiere que sea fabricado en la cantidad y con las características de acabado y precisión que el producto amerite.

Existe un muy amplio espectro de materiales disponibles para resolver o atender las distintas necesidades que se presentan en todo momento en nuestra sociedad, y el conocimiento de las propiedades de estos materiales, son la base para poder elegir el material adecuado según las necesidades requeridas; para poder entender estas propiedades los distintos materiales se han clasificado y agrupado en ciertos grupos.

##### 3.1.1 Clasificación de los materiales

Los materiales sólidos han sido clasificados en tres grandes grupos: Metales, Cerámicos y Polímeros. Esta clasificación está hecha con base en la composición química y la estructura atómica, y es de esta forma como la mayoría de los materiales caen dentro de una específica clasificación, aunque, a veces se presentan excepciones.

Dentro del campo de la Ingeniería además de los tres grupos ya citados, existen otros tres grupos de gran importancia, estos son los materiales compuestos, los semiconductores, y los biomateriales.

Los materiales compuestos son el resultado de la combinación de dos o más materiales de diferente clase; los semiconductores presentan propiedades eléctricas distintas al resto de los materiales que los ubican en un campo de aplicación muy



específico: la electrónica. Los biomateriales pertenecen a un grupo de materiales cuyas propiedades encuentran su mayor aplicación en el campo de la medicina, debido a su capacidad de interactuar positivamente con los seres vivos.

Volviendo a la clasificación básica de los materiales (Metales, Cerámicos y Polímeros) , a continuación se presenta una breve descripción del grupo denominado de los polímeros, así como de sus propiedades más representativas.

### 3.1.2 Polímeros.

En la actualidad, los diseñadores e ingenieros se inclinan hacia el uso de polímeros debido a que estos presentan una serie de propiedades que son difíciles de encontrar con cualquier otro material. Los polímeros ofrecen ventajas tales como, ligereza, elasticidad, resistencia a la corrosión, transparencia, facilidad para ser procesado, y especialmente por el tema del bajo costo económico, teniendo de igual forma ciertas desventajas.

En general, se piensa que los polímeros son de reciente invención, sin embargo, estos han estado presentes desde hace miles de años como un ingrediente básico en la composición de animales y plantas.

#### Estructura Atómica.

La estructura de los polímeros está compuesta por largas cadenas de moléculas; la mayoría de los polímeros son de origen orgánico, y sus componentes básicos son el carbono y el hidrógeno.

El enlace químico de estos elementos, es decir, la fuerza de atracción que mantiene unidos a los átomos, es del tipo covalente.

El enlace covalente se debe a la compartición de electrones, que experimentan simultáneamente atracciones de aproximadamente la misma magnitud, por dos o más átomos, lo cual rebaja la energía y hace, por consiguiente, que el sistema resultante sea más estable que los átomos por separado.

Los enlaces covalentes presentes en estas moléculas son muy fuertes, sin embargo, las fuerzas de Van Der Waals y las fuerzas de atracción entre los átomos de hidrógeno que unen moléculas entre sí son débiles y es por esto que estos hidrocarburos presentan puntos de fusión y ebullición relativamente bajos.

Por ejemplo, en el caso del Carbono y del Hidrógeno, cada átomo de carbono tiene cuatro electrones con la capacidad de participar en un enlace covalente, mientras que el hidrógeno solamente uno. En el Etileno, cuya fórmula química es  $C_2H_4$ , los dos átomos de carbono están unidos por un enlace doble entre ellos,

además de que cada uno de ellos está unido a dos átomos de hidrógeno, véase la fig1.

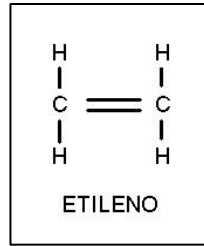


FIGURA 3-1 Representación esquemática de una molécula de Etileno.

Las moléculas que presentan enlaces covalentes dobles y/o triples son comúnmente llamadas *insaturadas*; esto significa que, la capacidad del átomo de carbono para enlazarse con otros elementos no ha alcanzado su máximo (o sea 4 enlaces simples o sencillos). Para una molécula insaturada, un enlace doble puede ser considerado como dos enlaces simples; Un cambio de posición alrededor del átomo de carbono por parte de uno de estos enlaces simples permite la unión de otro átomo o molécula a la molécula original. Gracias a esta acción es posible que se formen largas cadenas hasta llegar a formarse una macromolécula que comúnmente se conoce como polímero.

La estructura molecular de los compuestos hidrocarburos más comunes se muestran a continuación.

NOMBRE	COMPOSICION	ESTRUCTURA
METANO	CH <sub>4</sub>	<pre>       H         H — C — H               H                     </pre>
ETANO	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	<pre>       H       H                 H — C — C — H                       H       H                     </pre>
PROPANO	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	<pre>       H       H       H                         H — C — C — C — H                               H       H       H                     </pre>

Figura 3-2 Representación esquemática de las moléculas de Metano, Etano y Propano.

Las largas moléculas que conforman los polímeros son el resultado de la unión de miles de unidades moleculares básicas conocidas como Monómeros; El proceso mediante el cuál estas unidades se juntan para formar las largas cadenas es

conocido como proceso de polimerización y el número de uniones a lo largo de una cadena se conoce como grado de polimerización. Los nombres de muchos de los polímeros actuales reciben su nombre a partir del monómero que lo conforma y el sufijo *poli*, por ejemplo, el polipropileno y el poliestireno son producidos a partir de propileno y estireno respectivamente.

#### Definición de Plástico.

Las palabras Polímero y Plástico son comúnmente usadas como sinónimo, sin embargo, existe una diferencia básica entre ellas; Polímero se refiere al material puro que se obtiene como resultado directo del proceso de polimerización y que es comúnmente usado para nombrar a la familia que contiene estas largas cadenas de moléculas. Cuando a estos materiales puros se les agrega algún tipo de aditivo es entonces cuando nos referimos a un plástico.

El objetivo de emplear aditivos en los materiales poliméricos es modificar algún aspecto físico o parte del comportamiento del material; estas condiciones generalmente están sujetas a los requerimientos del diseño del producto final.

#### Aditivos para polímeros

Dentro de los aditivos más empleados junto con sus propósitos generales podemos citar a:

##### Agentes anti-estáticos .

Los polímeros son, por naturaleza, malos conductores de la electricidad, esto provoca que en ocasiones se generen cargas eléctricas estáticas en su superficie; los agentes anti – estáticos promueven la atracción de la humedad del aire hacia la superficie del polímero, mejorando considerablemente las capacidades conductivas en esta zona reduciendo las probabilidades de una descarga eléctrica.

##### Retardantes.

Las características químico – orgánicas de los polímeros los clasifican como materiales inflamables; los agentes retardantes son compuestos que contienen cloruros, bromuros, fosfatos o sales que reducen las capacidades de inflamabilidad de los polímeros.

#### Lubricantes.

Dentro de las agentes lubricantes se encuentran algunas sustancias tales como las ceras, las cuales tienen la finalidad de reducir la viscosidad de los polímeros fundidos mejorando así sus capacidades de conformado.

#### Colorantes.

Usados para dar características estéticas muy variadas, tales como color.

#### Estabilizadores.

Los estabilizadores previenen el deterioro del polímero ocasionado por factores ambientales.

### 3.1.3 Clasificación de los Plásticos

Partiendo de las propiedades Físico – Químicas de los plásticos, estos se pueden clasificar en dos grandes grupos: los Termoplásticos y los Termofijos.

#### Termoplásticos

Los materiales termoplásticos se caracterizan por cadenas moleculares que se encuentran unidas entre sí mediante enlaces covalentes; de manera secundaria por fuerzas de Van der Waals débiles, siendo estas, la fuerza atractiva o repulsiva entre moléculas, o partes de una misma molécula, distintas a aquellas debidas al enlace covalente o la interacción electrostática de iones con otros iones o con moléculas neutras.

Una forma de entender esta estructura es imaginar finos filamentos de madera distribuidos aleatoriamente. Cuando el material es calentado las fuerzas intermoleculares se debilitan y es por eso que el material se vuelve suave y flexible y así eventualmente a mayor temperatura, se convierte en un fluido viscoso. Una vez que la temperatura se reduce de nuevo, el material vuelve a solidificar.

Este ciclo de fundir y solidificar puede repetirse de forma casi indefinida y esta es una de las bases sobre las cuales se fundamentan los procesos para estos materiales.

Ejemplos de materiales termoplásticos: polietileno, PVC, poliestireno, Nylon, Acetato, policarbonato, polipropileno.

Dentro de los termoplásticos existe otra subdivisión que depende del tipo de orden molecular que presentan, y se dividen en materiales cristalinos o amorfos. Ciertamente es difícil encontrar un material plástico cristalino debido a la complejidad de su estructura y, en ocasiones, es más conveniente llamarlos semi-cristalinos o parcialmente cristalinos. La cristalinidad en aquellos materiales que pudieran ser considerados como cristalinos depende en gran parte de su “historial térmico” y por ende, de las condiciones del proceso bajo las cuales fue procesado.

#### Amorfos

En un termoplástico amorfo, ocurre lo contrario a los cristalinos. Las cadenas no mantienen ningún orden aparente durante su enfriamiento. El empaquetamiento es mucho menor que en los Cristalinos.

Por lo general, los plásticos cristalinos tienden a tener una mayor densidad, esto debido a su mayor empaquetamiento molecular.

AMORFOS	CRISTALINOS
Normalmente transparentes	Opacos
Resistencia mecánica media	Resistencia mecánica alta
Temperatura de fusión definida	Intervalo de fusión muy definido y estrecho (3-4°C)
Bajas contracciones de moldeo	Altas contracciones de moldeo
Ejemplos:	
PVC, PS, SAN, ABS, PMMA, PC.	PE, PP, POM, PA, PET, etc.

Tabla 3-1 - Diferencias entre Termoplásticos Amorfos y Termoplásticos Cristalinos:

#### Semi-Cristalinos

En un termoplástico semi-cristalino, al enfriarse, sus cadenas tienden a enlazarse muy ordenadamente por lo que se produce un empaquetamiento muy ordenado. A éste empaquetamiento ordenado se le denomina cristalización.

### 3.1.4 Polietileno

#### Estructura Química del Polietileno

El hidrocarburo llamado Etileno (  $C_2H_4$  ), es un gas a temperatura y presión ambiente, y su estructura molecular puede ser descrita tal y como se muestra en la figura 2.:

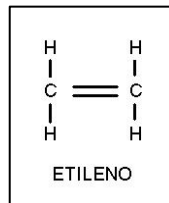


FIGURA 3-1 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE UNA MOLÉCULA DE ETILENO

Si el gas de etileno es sometido catalíticamente a condiciones apropiadas de presión y temperatura, este se transformará en Polietileno (PE) el cual es un sólido polimérico. Este proceso comienza cuando se forma un monómero activo, resultado de la interacción entre un catalizador ( $R^*$ ) y una molécula de etileno, según como se indica a continuación:

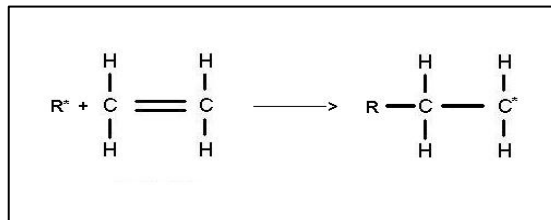


FIGURA 3-2 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE LA REACCION QUIMICA ENTRE UN CATALIZADOR Y UNA MOLECULA DE ETILENO

A partir del monómero activo, la cadena polimérica, entonces es formada por la subsecuente adición de monómeros de etileno a esta nueva unidad molecular central. La zona “activa” de esta nueva unidad molecular, que corresponde a la zona llamada “del electrón libre” ( denotado por \* ), se desplaza sucesivamente al final de la cadena del monómero formado, permitiendo así la adición de más monómeros de etileno. Esto se puede representar mediante la figura siguiente:

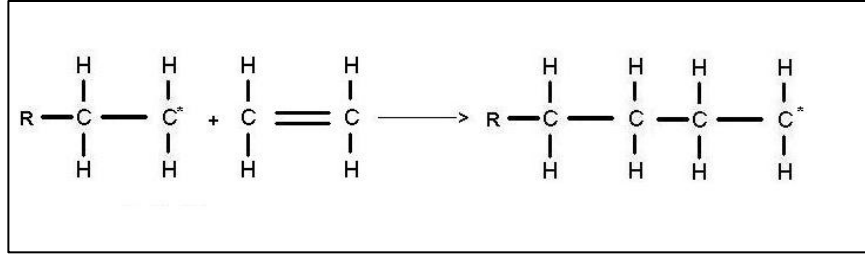


FIGURA 3-3 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE LA FORMACION DE UNA CADENA DE POLIETILENO

Al final, el resultado de la adición de muchos monómeros de etileno, es una molécula de Polietileno. Se sabe que el arreglo molecular del polietileno no es plano, esto es, estrictamente, existe un ángulo aproximado de 109° en el enlace entre carbono y el tercer carbono; este arreglo puede ser apreciado como un patrón zig-zag como el mostrado en la siguiente figura:

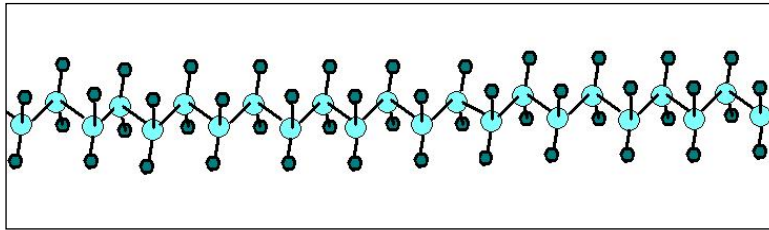


FIGURA 3-4 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DE UNA MOLÉCULA DE POLIETILENO

La longitud existente entre cada átomo de carbono C-C es de unos 0.154 nm. Si en lugar de hidrógenos tuviéramos flourita, entonces el compuesto que se obtiene PTFE (Politetrafluoretileno) conocido comercialmente como teflón.

#### Tipos más comunes de Polietileno

##### Polietileno de baja densidad

Polietileno de baja densidad (PEBD o por sus siglas en inglés LDPE).

Este es una de los plásticos usados más comúnmente en todo el mundo. Está caracterizado por tener una densidad entre 918-935 Kg/cm<sup>3</sup> es resistente y muy flexible. Se usa comúnmente para cuestiones de empaque (películas de plástico para empaque, bolsas, etc) aunque sus propiedades dieléctricas han sido utilizadas en la industria como aislante eléctrico. Otras aplicaciones se encuentran en los utensilios en el hogar, para tubos, botellas flexibles y tanques de almacenamiento de agua fría.

#### Polietileno de baja densidad lineal

Polietileno de baja densidad lineal. (PEBDL o por sus siglas en inglés LLDPE)

Este nuevo tipo de polietileno fue introducido al mercado en el año de 1977. El "LLDPE" es obtenido mediante un proceso de baja presión y tiene una microestructura regular con cadenas cortas ramificadas. Dependiendo de la velocidad de enfriamiento empleada en el proceso, el material forma una estructura en la cual las moléculas se unen entre sí. Por lo tanto, comparado con el LDPE el LLDPE es mucho más rígido, presenta un esfuerzo de cadencia mucho mayor y es más dúctil

#### Polietileno de alta densidad

Polietileno de alta densidad (PEAD o por sus siglas en inglés HDPE)

Este material tiene una densidad entre 935-965 Kg/cm<sup>3</sup> y es mucho más cristalino que el LDPE. Ligeramente más costoso que el LDPE pero mucho más resistente y rígido; este material presenta un campo mucho más variado de aplicaciones, tales como botes de basura, cajas, contenedores para líquidos de propósito general, etc.

#### Polietileno de ligadura cruzada

Polietileno de unión/ligadura cruzada (cross-linked polyethylene XLPE por sus siglas en inglés).

Algunos materiales termoplásticos (como el polipropileno) pueden modificar su estructura molecular de tal forma que sus cadenas se entrecruzan proporcionando al material un comportamiento similar al presentado por los termofijos. Para el caso del polietileno, existen diferentes métodos para poder obtener este tipo de estructura, entre ellos, el uso de radiación, peróxidos y sales. En algunos casos el entrecruzamiento puede ocurrir durante el moldeo mientras que en otros casos se le da forma final al producto y posteriormente se realiza el proceso de ligadura cruzada. Esta forma de enlace molecular tienen grandes efectos beneficio sobre el comportamiento del material, ya que mejora su resistencia al quebrantamiento, a la tracción, aumenta su dureza y su estabilidad mecánica, térmica y química.

El polietileno ha encontrado amplia aceptación en virtud de su buena resistencia química, falta de olor, no toxicidad, poca permeabilidad para el vapor de agua, excelentes propiedades eléctricas y ligereza de peso.



Recientemente, han adquirido mayor importancia los usos que se basan en su inercia y su resistencia al agua, y hoy se usa el polietileno en grado cada vez mayor para hacer botellas y otros envases, tuberías para agua y película para envolver, usos que consumen más de la mitad del polietileno producido.

### 3.1.5 Procesos de Conformado

El polietileno se suministra generalmente en forma de gránulos de unos 3mm de diámetro, ya en su estado natural o con un antioxidante o un pigmento. La mayor parte de los artículos terminados hechos con polietileno se fabrican por extrusión, soplado, inyección.

#### Extrusión.

Por este proceso se elaboran artículos huecos por soplado, tubería, perfiles, recubrimiento de cable y alambre, película tubular y plana, laminación de sustratos, lámina, etc.

La Extrusión, consiste en plastificar la resina por medio de calor y presión en un cilindro hueco y forzarlo por medio de un tornillo a pasar por una matriz o dado para obtener en forma continua la masa plastificada del polímero.

La operación se efectúa en un extrusor, máquina cuya función es proporcionar un material plastificado, térmicamente homogéneo y a velocidad constante.

#### Elementos de un extrusor.

Existen varios tipos de extrusores. El más usual es el que consta de un solo tornillo o gusano helicoidal, que se encuentra dentro de un cilindro provisto de sistemas de calentamiento, enfriamiento y control de temperatura.

El tornillo gira dentro de un cilindro, el cual es movido por la acción de un motor y de un reductor de velocidad.

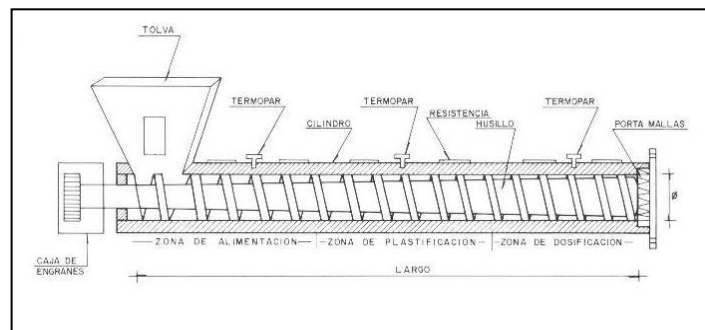


Fig (3-5) Componentes de un extrusor.

El tornillo extrusor tiene tres funciones fundamentales: Transportar el polietileno, plastificarlo y dosificarlo a través de un cabezal.

Las etapas a través del cilindro de un Extrusor se pueden dividir en tres:

- Alimentación y arrastre de sólidos.
- Compresión y plastificación.
- Homogeneización y dosificación.

Por lo tanto, en un extrusor convencional, el polímero se encuentra en tres formas: como partículas sólidas, después como una mezcla de plástico fundido con partículas sólidas, y finalmente, como una masa totalmente plastificada.

La zona de alimentación recibe el Polietileno por medio de una tolva, los gránulos pasan por gravedad de la tolva a la garganta del cilindro y de ahí hasta tener contacto con el tornillo que gira dentro del cilindro, siendo estos transportados hacia delante por el movimiento relativo de rotación del tornillo y el cilindro, aumentando la presión a la resina a medida que avanza a la siguiente zona.

En la zona de compresión continúa aumentando la presión a la resina al mismo tiempo que es calentada por las resistencias eléctricas a través de la superficie del cilindro, transformándose en una masa fundida y homogénea, que pasa después por el paquete de mallas, las que aumentan la presión en la superficie interna del cilindro, a la vez que detienen algún material extraño.

La temperatura que adquiere la resina plastificada, es la suma del calor impartido por las resistencias externas y el calor que genera la fricción.

El control de la temperatura se efectúa por medio de Termopares, que mandan la señal a los pirómetros, los cuales cortan o mandan el fluido eléctrico a las resistencias.

El tornillo es de paso constante entre su cuerda y filete en su profundidad o canal; esto último es característica importante de diseño y relaciona al volumen de un paso del filete en la sección de alimentación contra otro paso en la sección de dosificación, por esta acción fundamental se logra la homogeneización de la masa plastificada y el flujo uniforme.

Al final del tornillo extrusor, se encuentra un plato perforado que sirve para deshacer el flujo helicoidal de la masa plastificada y al mismo tiempo trabaja como soporte al paquete de mallas, las cuales les suministran aumento en la presión y evitan el paso de impurezas al dado.

El polietileno plastificado después de salir del tornillo al extrusor y mallas pasa al dado, el cual está montado en una extensión o adaptado de forma adecuada a cada proceso.

Por regla general, el dado cuenta con una perforación interna para entrada de aire, cuando se fabrica tubo o película tubular, o bien para el paso del alambre que pretende recubrir.

El calentamiento debe ser uniforme, para prevenir la variación de temperatura que puede ser causa de modificación de flujo en el dado y por lo tanto, de irregularidades en el producto terminado.

De manera general, el cilindro debe tener una longitud suficiente (L), con el fin de proporcionar una mayor superficie de transmisión de calor: 20 a 28 veces mayor que el diámetro interior del cilindro (D), para obtener una homogeneidad más eficiente de la resina.

Estas medidas son específicas para cada extrusor y se expresa por la relación L/D.

### 3.2 Impacto Ambiental

Evaluar el impacto ambiental del polietileno implica tener en cuenta todas las etapas por las que atraviesa un producto desde la extracción de las materias primas para su elaboración hasta que se transforma en residuo juntamente con su tratamiento. Este enfoque es denominado en la industria: "Análisis del Ciclo de Vida". De este modo se evalúa la fabricación, uso y recuperación o disposición final en relación al balance de energía y al impacto ambiental.

El polietileno es reciclable, es decir, se vuelve a fundir y transformar en productos finales. El polietileno reciclado es utilizado para fabricar bolsas de residuos, caños, madera plástica para postes, marcos, film para agricultura, etc.

En la actualidad se están desarrollando nuevas técnicas de gran complejidad que permitirán reciclar químicamente no sólo al Polietileno sino a todos los plásticos. De esta manera se podrán recuperar los componentes naturales para volverlos a utilizar como materias primas y así optimizar aún más los recursos naturales.

#### 3.2.1 Procesos de Reciclado

El impacto nocivo que producen los plásticos en el medioambiente es menor que el ocasionado por otros materiales tradicionales, su fabricación requiere menos recursos que otros casos, su ligereza y resistencia medioambiental aportan claras ventajas a su eficiencia ( transporte, embalaje, etc.) y además, los plásticos se pueden reciclar.

Existen dos soluciones generales para cuando un producto se convierte en residuo: a) tirarlo a un vertedero, b) recuperarlo. Los plásticos no se degradan en el medio ambiente como la basura ecológica (excepto en el caso de los plásticos biodegradables) y la primera opción no parece ecológicamente muy aceptable ni tan siquiera para la imagen del producto. Sí, en cambio, la recuperación. Se trata de un amplio concepto que engloba en sí a otros dos: a) reutilización, b) reciclaje. El que más interés acapara es sin duda el primero de ellos, tanto ecológica como económicamente, debido a que requiere mínimos recursos y el menor desgaste del valor del producto. Sin embargo, la normativa legal, la salubridad y la degradación del producto no siempre posibilitan recurrir a la reutilización, con lo cual la única alternativa posible para esta serie de supuestos es la del reciclaje, que en cualquier caso, nunca será el último fin, sino una vía para alcanzar otra serie de objetivos. Si lo que se pretende es reducir la cantidad de residuos y el consumo de materias primas, el reciclaje siempre resultará rentable; si se pretende reducir el consumo energético, la energía necesaria para el reciclaje deberá ser inferior a la que se requiera para fabricar la materia prima.

Por reciclaje se entiende el aprovechamiento de las materias útiles que aparecen habitualmente en las basuras.

No existe una evidencia clara de cuando comenzó el reciclado de los plásticos, pero se estima que el primer esfuerzo importante en este sentido fue protagonizado por la industria y se produjo a finales de los años 60 e inicios de los 70. Este hecho fue impulsado por una serie de factores.

Muchas de las técnicas de reciclado desarrolladas durante esta época sentaron los inicios de las técnicas actuales.

Actualmente, existen cuatro técnicas de reciclado de los plásticos presentes en los residuos sólidos urbanos:

#### Reciclado primario

Se denomina reciclaje primario a la trituración de los residuos plásticos procedentes de los procesos de fabricación de un producto, posterior mezcla con plásticos vírgenes y su utilización a modo de materia prima (reciclaje mecánico). Se trata de un proceso barato y rentable, dado que el residuo es homogéneo y se encuentra poco contaminado.

#### Reciclado secundario

En el reciclaje secundario, el residuo plástico procede de una pieza ya utilizada, con lo cual el material es más heterogéneo y contaminado. Hay que separar,

---

triturar, limpiar y convertir los plásticos en materia prima (reciclaje mecánico). Dada la degradación del plástico, para que la calidad del material reciclado sea aceptable se han de agregar aditivos especiales y caros, motivo por el cual la mayoría de los casos se recurre a este tipo de reciclaje, más complejo y costoso, cuando se cuenta con alguna subvención pública. Si bien en los últimos años se ha avanzado mucho en la tecnología de separación de plásticos, en ocasiones resulta insuficiente.

#### Reciclado terciario

En el reciclaje Terciario o químico (pirólisis, glicólisis, acoholísis e hidrólisis) las cadenas moleculares se reducen hasta obtener los monómeros iniciales o productos intermedios de bajo peso molecular que pueden servir de materia prima para la polimerización. Según un estudio realizado por “Association of plastic manufacturers of Europe” (APME), en 1995 un total de 99,000 toneladas de residuos plásticos fueron recicladas mediante esta tecnología, cifra que en los años venideros irá en aumento, puesto que cuando no es posible el reciclaje mecánico, el químico resulta una buena opción, aunque, hoy por hoy, resulta demasiado costosa.

#### Reciclado cuaternario.

En el Reciclado cuaternario o de recuperación de energía, el residuo plástico emplea como combustible. Dado que los plásticos son materiales provenientes del petróleo, su valor energético es similar al de este último. El PP por ejemplo, tiene 46 MJ/Kg, mientras que la leña tiene 16 KJ/Kg. La energía de los residuos orgánicos no llega sino al 10% de la que contienen los plásticos. Así pues, la recuperación de la energía de los plásticos reduce la cantidad de material depositado en los vertederos y contribuye a la conservación de los combustibles clásicos.

#### Reciclado mecánico

El proceso comienza con la separación de los plásticos del resto de componentes de los residuos sólidos urbanos. Este paso ha de realizarse principalmente a mano, si no ha habido una recogida selectiva previa. Posteriormente, el material es granulado, fundido o parcialmente fundido y moldeado para dar lugar a otros productos. Pero este método de reciclado presenta una serie de limitaciones de uso, como es el hecho de que este proceso únicamente es aplicable a los materiales termoplásticos ya que son los únicos que pueden moldearse por acción del calor sin que se descompongan. Debe tenerse en cuenta que el nuevo material plástico obtenido de este modo presenta deficiencias en el color y en las propiedades plásticas, convirtiendo al nuevo producto en un plástico de inferior calidad.

### 3.3 Uniones Mecánicas

Los pernos, clavos y los tornillos se usan para sujetar entre sí las diversas partes de un dispositivo.

#### 3.3.1 Clasificación de las uniones

Los tipos de uniones usadas en las estructuras, se pueden clasificar, aproximadamente, como sigue:

1. Remachadas, con pernos, con pasadores, atornilladas y clavadas.
2. Adheridas (engomados, soldadas)
3. Soldadas ( por fusión, eléctrica por puntos, mediante cordones, dispersión)

En el tipo 1, las fuerzas se transmiten por medio de miembros intermedios (tales como pernos, remaches, pasadores, clavos, etc.) sujetando a compresión las superficies de contacto. Tales uniones requieren agujeros de un lado a otro de los miembros principales; estos causan una pérdida de eficiencia ( a no ser que se adicione material localmente).

En el tipo 2, los miembros se unen por un agente de ligazón, sin la necesidad de taladrar agujeros.

En el tipo 3, la unión se hace por aplicación de calor y presión, suficientes como para establecer una verdadera adhesión interatómica

El análisis de las uniones mecánicas o juntas no se puede efectuar en forma tan rigurosa por la complejidad del problema; el diseño de las conexiones estructurales es en gran parte empírico y se basa tanto en la experiencia disponible como en una interpretación adecuada de las investigaciones experimentales.

#### 3.3.2 Resistencia de remaches, pernos y pasadores

La función básica de estos elementos es transmitir fuerzas cortantes. Por lo general, no se tiene la intención de hacer que los remaches y pernos transmitan fuerzas de tensión: los tornillos hacen esta función.

La resistencia cortante de remaches, tornillos y pernos está basada, directamente, en ensayos en los que las condiciones de una junta o unión se simulan lo mejor posible. El esfuerzo cortante último para un remache, tornillo o perno se define como:

$$\tau_{ult} = \frac{P_s}{A} \quad (\text{Ec. 3-5})$$

Donde  $P_s$  es la fuerza transversal máxima desarrollada (en un ensaye) por una sección transversal, y  $A$  es el área nominal de la sección transversal del remache, tornillo o perno.

La resistencia cortante transversal se encuentra multiplicando el área transversal del elemento por este esfuerzo cortante:

$$P_s = \tau_{ult} A \quad (\text{Ec. 3-6})$$

La resistencia a la tensión de los remaches, depende del tamaño y perfección de su cabeza. Ya que esto puede variar mucho en la práctica, los remaches, por lo común, no se usan para transmitir cargas directas de tensión.

La resistencia real a la tensión de los tornillos depende de la resistencia última a la tensión del material y del área mínima de la sección transversal en la raíz de la rosca:

$$P_t = \sigma_{ult} A_{\min} \quad (\text{Ec. 3-7})$$

En algunos casos, la rosca o hembra del tornillo no puede ser capaz de desarrollar la resistencia a la tensión del tornillo; es decir, la cabeza puede romperse o cortarse si es demasiado delgada.

La resistencia nominal a la tensión de los tornillos, está basada en una carga unidireccional (estática), por tanto no es segura para cargas variables.

### 3.3.3 Tipos de fallas en uniones con remaches, pernos y pasadores

Las uniones atornilladas y las juntas remachadas con carga cortante se tratan exactamente igual al diseñarlas y analizarlas.

En la figura 3-6a se muestra una unión con un remache, cargada al cortante.

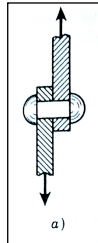


Fig. 3-6a Unión con remache cargada al cortante

A continuación se muestran los diversos modos en los que esta junta podría fallar.

La figura 3-6b indica una falla por flexión del remachado.

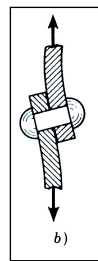


Fig. 3-6b Falla por flexión del remachado.

El momento de flexión es, aproximadamente  $M = Ft/2$ , donde  $F$  es la fuerza cortante y  $t$  es el agarre del remache, o sea, el grueso total de las piezas ajustadas.

Despreciando la concentración del esfuerzo, el esfuerzo por flexión en las piezas o en el remache es,

$$\sigma = \frac{M}{I/c} \quad (\text{Ec. 3-8})$$

donde  $I/c$  es el módulo de sección correspondiente al elemento sujetado más débil, o para el remache o los remaches, dependiendo de qué esfuerzos se ha de encontrar. El cálculo del esfuerzo por flexión en esta forma es una hipótesis, porque no se sabe



exactamente cómo se distribute la carga al remache, ni se conocen las deformaciones relativas de éste y de los elementos.

En la figura 3.6c, se indica la falla del remache por cortante puro:

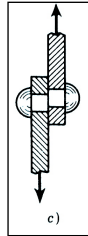


Fig. 3-6c Falla por cortante del remache

el esfuerzo en el remache es:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 3-9})$$

donde A es el área transversal de todos los remaches del grupo.

La ruptura de una de las placas, por tensión pura, se ilustra en la figura 3-6d.

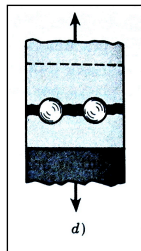


Fig. 3-6d Falla por ruptura de placas

el esfuerzo de tensión es:

$$\sigma = -\frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 3-10})$$

donde A es el área transversal neta de la placa, o sea, reducida en una cantidad igual al área correspondiente a todos los agujeros por remache.

La figura 3.6e ilustra una falla por aplastamiento del remache o de la placa. El cálculo de este esfuerzo de aplastamiento se complica por la distribución de la carga sobre la superficie cilíndrica del remache.

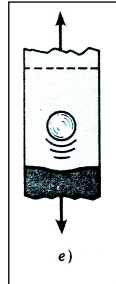


Fig. 3-6e Falla por aplastamiento del remache

Los valores exactos de las fuerzas que actúan sobre el remache se desconoce y, entonces, se acostumbra establecer la hipótesis de que las componentes de estas fuerzas estén distribuidas de manera uniforme sobre el área de contacto proyectada del remache. Esto da para el esfuerzo, la expresión:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 3-11})$$

donde el área proyectada para un solo remache es  $A=td$ . Aquí  $t$  es el espesor de la placa más delgada y  $d$  es el diámetro de remache o perno.

En la figura 3-6 f y 3-6g se indica el desgarre. En el trabajo estructural, esta falla se evita colocando los remaches a por lo menos,  $1 \frac{1}{2}$  diámetros de distancia del borde de la placa.

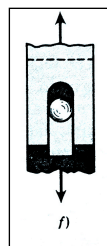


Fig. 3-6f Falla por desgarre



Fig. 3-6g Falla por desgarre

En el diseño estructural se acostumbra seleccionar por anticipado el número de remaches y su diámetro y espaciamiento. Luego se determina la resistencia para cada método de falla. Si la resistencia calculada no fuese satisfactoria, se hacen cambios en el diámetro, en el espaciamiento o en el número de remaches a utilizar, para adaptar la resistencia a las condiciones de cargas esperadas.

#### 3.3.4 Uniones en la Madera

La solución matemática de la distribución de esfuerzos en las uniones de madera, es un problema extremadamente difícil y no ha sido resuelto teóricamente. Los múltiples factores que gobiernan la carga última o carga de seguridad en las juntas con diferentes tipos de elementos auxiliares de unión, hace casi imposible obtener ecuaciones por cualquier método, que no sea el resultado de pruebas materiales.

En general, las variables que determinan la resistencia a la carga en las uniones de madera son: la densidad específica de la madera, la especie, el contenido de humedad, el tipo y tamaño del elemento auxiliar, la dirección de la carga respecto a la dirección de las fibras de la madera, la dirección de la carga respecto al eje del elemento de unión, la flexión en el elemento de unión, el tipo o tamaño de placas de unión de acero o madera.

#### Características de la madera

La madera se compone de celdillas alargadas cuya base es la celulosa. Las celdillas están cementadas por lignina, y su ordenamiento dentro del árbol afecta grandemente la apariencia y las propiedades de las diversas especies.

La sección transversal de la mayoría de los árboles ofrece ciertas características que son muy comunes a todo árbol, la figura ilustra las partes características que constituyen la estructura de cualquier tronco de árbol.

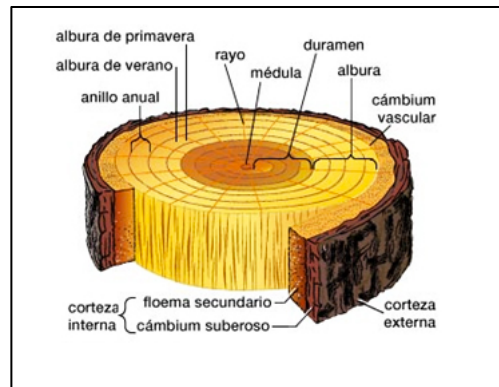


Fig (3-6) Esquema de las partes que componen el tronco de un árbol.

**Corteza:** también denominada peridermis, es la capa exterior que actúa como protector de los demás tejidos frente a los agentes invasores y medioambientales. Se forma a partir del felógeno, que produce súber hacia fuera y felodermis hacia adentro.

**Cámbium:** es la capa que sigue a la corteza y constituye la base del crecimiento en espesor del árbol. Está formada por células de paredes delgadas que se transforman por divisiones sucesivas, en nuevas células, que generan en la parte interna del árbol el xilema y en la externa el floema. El xilema pasa a constituir la madera del árbol, mientras que el floema se encarga de transportar los productos de la fotosíntesis elaborados por las hojas hacia el resto de la planta.

**Albura:** madera de la sección externa del tronco, de color más claro. Es la zona más viva, saturada de savia y sustancias orgánicas. Alberga la parte joven de la madera, que corresponde a los últimos ciclos de crecimiento del árbol. Se transforma con el tiempo en duramen.

**Duramen:** madera de la parte interna del tronco, formada por tejidos que han alcanzado su máximo desarrollo y resistencia. Su madera es muy compacta y tiene un buen aprovechamiento posterior.

**Médula:** parte central del tronco, constituida por tejido flojo y poroso, de la que parten radios hacia la corteza o peridermis. Es más oscura que la albura y no circula savia por ella. Esta parte, de diámetro muy pequeño, se suele desechar en los procesos de elaboración de la madera.

En el centro o médula del árbol, se inician los anillos concéntricos, que continúan hacia la corteza. Cada anillo representa el crecimiento del árbol durante un año. Cada anillo anual se divide en dos capas. La interior, llamada primavera, se desarrolla durante la primera parte de la estación de crecimiento y es generalmente más clara en color que la madera de verano. La capa exterior llamada verano,

consiste de celdillas más pequeñas, con paredes más gruesas y es la parte oscura del anillo. Es más fuerte y pesada que la madera de primavera y tiene un efecto importante en determinar las propiedades de resistencia de la mayoría de las especies.

#### Densidad de la madera

La densidad establece un criterio de resistencia de las coníferas. Se determina por la velocidad de crecimiento del árbol y por la cantidad de madera de verano presente. Esto significa que la resistencia de una pieza de madera se mide por la cantidad y distribución de sustancia básica madera, o sea el material que compone las paredes de las celdillas. La densidad específica de esta sustancia es la misma para todas las maderas, 1.54, y todas las maderas tendrían la misma densidad específica en todas sus partes si no fuera por el acomodamiento y dimensionamiento de las celdillas y el espesor de las paredes de estas celdillas. La densidad de la madera es un índice definitivo de sus propiedades de resistencia. Se puede determinar una relación entre la densidad específica y la resistencia, expresándola como una ecuación basada en los resultados medios de las pruebas de resistencia efectuados sobre diversas especies.

#### Densidad específica de la madera

La madera se compone de celdillas alargadas cementadas por lignina. Considerando que la densidad de las celdillas específica del material que forman las paredes de las celdillas, o sea la sustancia de la madera, es aproximadamente igual a 1.54 para todas las especies. La densidad específica de todas las especies sería la misma si no fuera por la variación en el tamaño y arreglo de las cavidades celulares. La densidad de la madera es un índice definitivo de sus propiedades de resistencia.

La tabla 4 establece la relación entre la densidad específica y la resistencia, expresándola como una ecuación basada en los resultados medios de las pruebas de resistencia efectuados sobre diversas especies.

#### Contenido de Humedad

Cuando las paredes de las celdillas comienzan a perder humedad, o bien inmediatamente después que se seca la madera más allá del punto de saturación de las fibras, la mayoría de las propiedades mecánicas de resistencia aumentan rápidamente con una disminución en el contenido de humedad. Este incremento se

debe a la rigidización de las paredes de las celdillas conforme se secan y que se prensa la madera conforme se enjunta.

No todas las propiedades de resistencia se ven igualmente afectadas por los cambios en el contenido de humedad.

#### Clavos para madera

El clavo es uno de los medios más simples para unir piezas de madera con un óptimo resultado. Su uso se remonta a tiempos inmemorables. Puede ser de vástago liso o estriado (este último tiene la opción de ser helicoidal o anular), es fabricado con base en alambre endurecido (con bajo contenido de carbono) por proceso de trefilado en frío, pudiendo tener terminaciones galvanizado, barnizado o pulido. Los clavos son elementos de fijación simple y de fácil aplicación. Se caracterizan por ser capaces de transmitir los esfuerzos de un elemento a otro en una estructura. Su gran divulgación los convierte en prácticos y económicos. La forma del clavo puede influir en el resultado de la junta y deberá ser estudiado. En general, sin embargo, los clavos de alambre común y cuerpo redondo serán satisfactorios y los más baratos para su uso en construcción.

Las puntas de los clavos influyen en la facilidad de penetración y el resultado de la prestación. Las puntas agudas tienden a separar las fibras como si fuera una cuña produciendo una gran tendencia en la madera al rajado. Los clavos de punta roma son más difíciles de clavar, pero tienden a desgarrar la madera y a disminuir su rajado. La punta normal tipo diamante generalmente da lugar al más satisfactorio uso en cualquiera de los casos. Las superficies de los clavos pueden tratarse para aumentar su resistencia a cargas paralelas o mejorar su aspecto. El galvanizado es probablemente el mejor procedimiento polifacético para mejorar su aspecto y darles resistencia a la corrosión.

Hoy existe un amplio surtido de clavos desarrollados para distintos tipos de trabajo muy puntuales, surtido que puede clasificarse en tres grupos básicos de acuerdo a su diámetro, al diseño del vástago y al terminado. Para el caso del diámetro, éste varía regularmente entre 2.0 y 3.2 milímetros de acuerdo a la longitud, resistencia y aplicación que se le dará, aunque también existen clavos de hasta 5 milímetros, poco conocidos y usados en la industria de la madera y el mueble. En el caso del diseño del vástago el mercado ofrece clavos anillados, aquellos provistos de una secuencia de anillos alrededor del vástago que aseguran una mayor resistencia y agarre luego de ser clavados y que por esta misma razón, reducen las posibilidades de que el elemento ceda a las presiones que soportará, sobre todo si se clava en maderas muy blandas. También se encuentran los clavos helicoidales que tienen un

pronunciado entramado o grabado en bajo relieve y en forma de hélice alrededor de todo el vástago, característica que facilita la penetración del elemento en la superficie a trabajar y aumenta el agarre. Por último están los clavos lisos cuyo vástago, como su nombre lo indica, carece totalmente de grabados y favorece una penetración suave, sin obstáculos, en especial si se trabajan maderas extremadamente duras. Otra clasificación hace referencia a la presentación de las puntas y en ésta puede encontrarse tres tipos: los clavos sin punta que son utilizados especialmente para maderas muy blandas dado que al penetrar, cortan fácilmente las fibras de la madera sin astillarla; los de punta cincel, ideales para maderas medianamente duras gracias a que su diseño permite cortar una parte de la fibra, separándola para abrirse camino. El tercer grupo corresponde a los clavos Punta Diamante, segmento que ofrece dos opciones: con un ángulo a  $40^{\circ}$  a  $60^{\circ}$ , y están diseñados para el trabajo con maderas duras ya que su forma no corta las fibras y penetra más fácil al abrirse camino entre ellas. Es importante anotar que las cabezas de los clavos tienen un estándar en su tamaño de acuerdo al diámetro del vástago, y que parte desde los 2 milímetros de diámetro para una cabeza de 5 milímetros de diámetro, de 2.5 mm para una cabeza de 6.3 milímetros de diámetro y de 2.8 mm, 3.1 mm y 3.2 mm de diámetro para una cabeza de 6.8 milímetros.

#### Clavos Comunes Y Clavos Pesados.

Las figuras 3-7 y 3-8 ilustran varios tipos de puntas y vástagos de clavos. En general, los clavos con punta larga afilada, tienen mayor poder de retención que los clavos de punta común. Pero si la especie de madera tiene tendencia a rajarse, una punta aguda acentuará esta tendencia, y su capacidad de retención disminuirá. El clavo despuntado reduce la rajadura pero causa destrucción de las fibras de la madera al ser introducido en la madera; esto reduce su capacidad de retención a menos de la de un clavo común. El clavo despuntado pero con extremo aguzado no provocará rajaduras tan fácilmente como el clavo común, y es igual al clavo común en su capacidad de retención cuando se emplea en maderas de mayor densidad, pero su resistencia a la extracción, es inferior a la del clavo común en las maderas de inferior densidad.

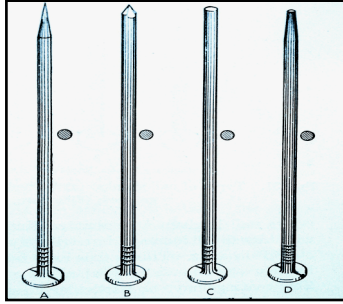


Figura 3-7 Tipos de puntas de clavo de izquierda a derecha (a) larga y aguda, (b) común, (c) sin punta (d) aguzada despuntada

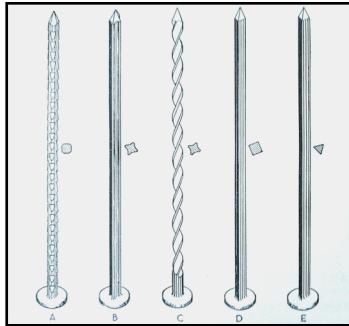


Fig (3-6) Tipos de vástagos de clavos (de izquierda a derecha) (a) dentado, (b) con surcos longitudinales (c) con surcos espirales, (d) cuadrado, (e) triangular

El clavo pesado de alambre no es más que un clavo grande y se fabrica en longitudes de 76 a 305 mm. Generalmente terminan en punta diamante o biselada.

### 3.3.5 Extracción de clavos en madera

Los clavos resisten cargas de extracción, cargas laterales o combinaciones de estas dos. Ambas resistencias son afectadas por la madera, el clavo, y las condiciones de uso. En general, sin embargo, cualquier variación de estos factores tiene un efecto más pronunciado en la resistencia de extracción que en la resistencia lateral. La resistencia de un clavo a ser extraído de una pieza de madera depende de la densidad de la madera, del diámetro del clavo, y de la profundidad de penetración. El estado de la superficie del clavo al momento de ser clavado también influye en la resistencia inicial de la extracción.

Las fórmulas para estimar las cargas permisibles en todos los elementos de unión, se basan en la suposición que las cargas son permanentes o de plazo largo.



### Resistencia a la extracción

La resistencia a la extracción en las uniones hechas con clavos comunes o pesados depende de la dirección de la penetración del elemento de unión con relación a la dirección de las fibras, la profundidad de penetración del elemento, el diámetro del elemento de unión, y de la especie, densidad y contenido de humedad de la madera. De los resultados de ensayos se ha obtenido una fórmula general que expresa el límite de resistencia a la extracción de clavos, tanto comunes como pesados, clavados en el costado de madera bien seca;

$$P = KG^n D \quad (\text{Ec. 3-12})$$

En la que  $P$  es la resistencia, límite en Kg/cm de penetración.  
 $K$  es una constante que depende de la especie  
 $G$  es la densidad específica basada en madera secada al horno.  
 $n$  es la potencia de densidad.  
 $D$  es el diámetro del calvo en cm.

De la ecuación anterior, resulta evidente que la resistencia límite a la extracción por centímetro lineal de penetración del elemento de unión es directamente proporcional a la constante que depende de la especie empleada, a una potencia de la densidad, y al diámetro del elemento de unión empleado, siempre que éste se hubiese clavado al costado de las fibras de madera seca. Para estimar la carga de trabajo con un factor de seguridad aproximadamente igual a 6, la constante  $K$  para toda clase de clavos, generalmente se toma igual a 97 y la potencia a que ha de elevarse la densidad igual a  $5/2$ , así que la carga de seguridad a la extracción se convierte en

$$P = 97G^{5/2} D \quad (\text{Ec. 3-13})$$

La resistencia a la extracción decrece conforme decrece el ángulo entre la dirección de las fibras y la dirección del clavo.

### Resistencia lateral

La ecuación general para obtener la carga lateral permisible sobre clavos clavados en los costados de madera seca es

$$P = KD^{3/2} \quad (\text{Ec. 3-14})$$

P es la carga lateral permisible en Kg por clavo.

K es la constante que varía con la especie

D es el diámetro del clavo en cm.

La ecuación está basada en que existe una penetración en el miembro de madera en el que se aloja la punta, de las dos terceras partes de la longitud del clavo para maderas coníferas, y de la mitad de la longitud para las de hojas caduca.

### Profundidad de Penetración.

En la figura 3-7 se observan los resultados de pruebas para determinar la influencia de la profundidad de penetración de la porción estriada del vástago de un clavo dentro del material penetrado. Como se puede observar, la resistencia a la extracción de cualquier clavo de diferentes diámetros para cualquier madera, varía directamente con la profundidad de penetración. Esta es la razón por la cuál, para todas la pruebas de extracción, las cargas se dimensionan en fuerza sobre longitud de penetración.

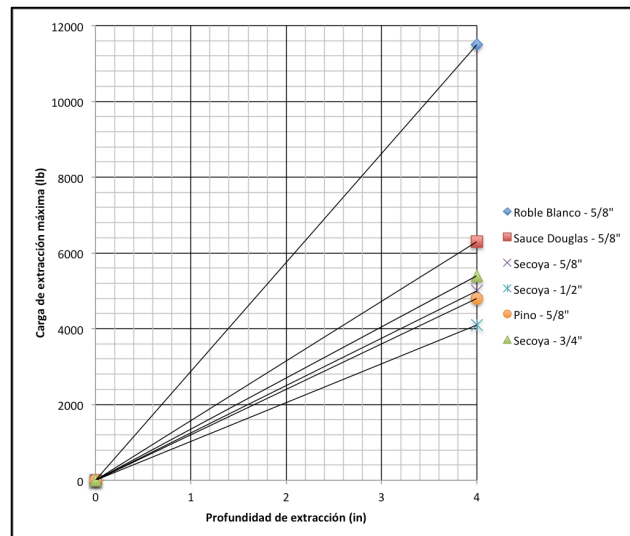


Fig (3-7) Resistencia a la extracción de clavos para diferentes profundidades de penetración.

Diámetro del Clavo.

Existe un estrecha relación entre el diámetro del elemento de unión y su resistencia a la extracción. La figura (3-8) muestra para una especie de madera dada, la carga de extracción por unidad de penetración varía en proporción directa a  $\frac{3}{4}$  veces el diámetro del clavo.

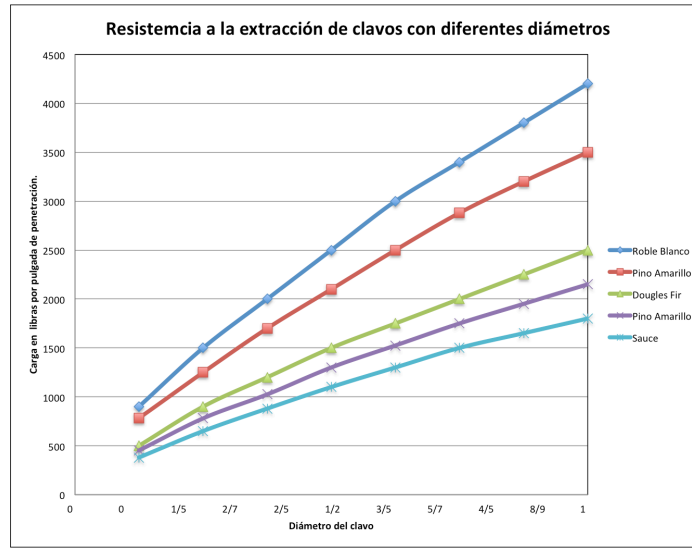


Fig (3-9) Resistencia de clavos de diferente diámetro a cargas de extracción.

### 3.3.6 Unión de dos o más planos

Cuando se unen tres o más piezas (uniones con dos o más planos de cortante) la capacidad de los clavos se determina multiplicando la capacidad de una unión sencilla por  $0.9 n$ , en que  $n$  es el número de planos de cortante. Cada uno de los miembros debe tener un espesor ni menos que las dos terceras partes del correspondiente al miembro que recibe la punta en unión sencilla. Para los espaciamientos entre clavos se recomiendan los siguientes valores mínimos, en donde  $D$  es el diámetro del clavo.

- 10 D entre hileras de clavos
- 5 D de los bordes
- 20 D en los extremos
- 20 D entre clavos a los lados de las fibras.

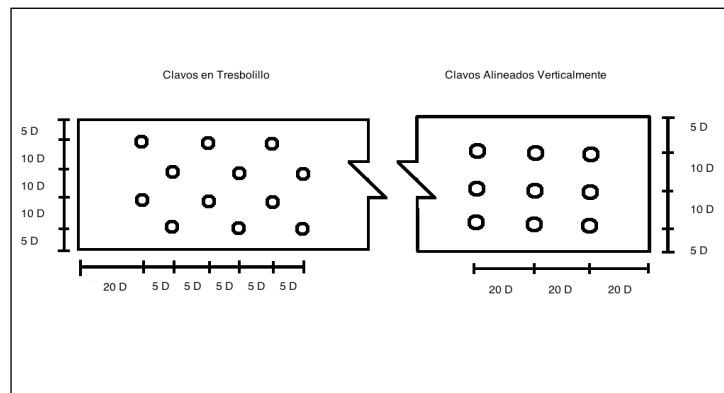


Fig (3-10) Espaciamiento mínimo de clavos.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1 Objeto de estudio.**

Las tarimas de PEAD (Polietileno de Alta Densidad) Reciclado objeto del estudio, están conformadas por elementos de sección transversal constante de 5 X 1 pulgadas y 3.5 x 1 pulgadas de longitudes variadas; los medios de unión empleados son clavos de 2 pulgadas de largo y calibres 0.98 y 1.28 con una sección estriada a lo largo vástago de 1 pulgada aproximadamente.

El número de elementos de PEAD que conforman los diferentes tipos de tarimas, dependen del diseño de cada una de ellas, así con el arreglo geométrico de los clavos empleados para su unión. De forma general se emplean 3 clavos por unión.

#### **4.1.1 Clasificación de las muestras.**

Para determinar el comportamiento de la resistencia mecánica de la unión se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la tracción y resistencia al esfuerzo cortante en diferentes muestras elaboradas con las siguientes características:

Muestras para ensayo de Tracción

1 tramo de PEAD Reciclado de 18 cm de largo por 12.5 cm de ancho y 2.7 cm de grueso

1 tramo de PEAD Reciclado de 18 cm de largo por 10 cm de ancho y 2.2 cm de grueso

Unidas mediante clavos estriados ( de 2 a 4 clavos según se indica en la tabla siguiente) de calibre 0.98 ó 1.28.

Muestras para ensayo Cortante.

1 tramo de PEAD Reciclado de 12.5 cm de largo por 10 cm de ancho y 2.2 cm de grueso

1 tramo de PEAD Reciclado de 10 cm de largo por 12.5 cm de ancho y 2.7 cm de grueso

Unidas mediante clavos estriados ( de 2 a 4 clavos según se indica en la tabla siguiente) de calibre 0.98 ó 1.28.

De forma adicional se tuvieron 3 muestras tanto para pruebas de esfuerzo de tracción como de esfuerzo cortante extraídas de producto terminado.

Grupo	Descripción	Calibre del Clavo	Tipo De Prueba	Número de Muestras
1	Muestras tomadas directamente de una tarima terminada	1.28	Tracción	3
2	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, unidas mediante 3 clavos en arreglo geométrico tipo Triangular	0.98	Tracción	10
3	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, unidas mediante 3 clavos en arreglo geométrico tipo Lineal.	0.98	Tracción	9
4	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, unidas mediante 4 clavos en arreglo geométrico tipo forma de cuadro.	0.98	Tracción	10
5	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, unidas mediante 2 clavos en arreglo geométrico tipo Lineal.	0.98	Tracción	12
6	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, unidas mediante 4 clavos en arreglo geométrico tipo forma de cuadro.	1.28	Tracción	10
7	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, unidas mediante 3 clavos en arreglo geométrico tipo Lineal.	1.28	Tracción	10
8	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, unidas mediante 2 clavos en arreglo geométrico tipo Lineal.	1.28	Tracción	11
9	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, Unidas mediante 4 clavos en arreglo geométrico tipo forma de cuadro.	0.98	Cortante	10
10	Muestras elaboradas específicamente para la prueba, Unidas mediante 4 clavos en arreglo geométrico tipo forma de cuadro	1.28	Cortante	10

Tabla 4-1 Descripción de las muestras empleadas para los ensayos destructivos.

Nota: El grupo 1, no es representativo como tal. Dichas muestras fueron utilizadas durante los ensayos de pruebas, para evaluar el desempeño de los adaptadores de la máquina Instron. Su reporte y registro es meramente protocolario.

#### 4.1.2 Control de Muestras

Para su control, cada una de las probetas fue identificada con un número consecutivo; A las muestras de ensayos de Tracción, mediante un calibrador Vernier, se les midió la profundidad a la cual se encontraba la cabeza del clavo con respecto al plano de inserción del mismo, una vez terminada la prueba, se tomaron nuevamente las profundidades de cada clavo del ensamble. El objeto de este último procedimiento fue establecer un posible patrón de falla común en el ensamble.

#### 4.1.3 Método de Pruebas.

Para llevar a cabo los ensayos se emplearon un par de adaptadores para la Máquina de pruebas mecánicas Instron; estos dispositivos se construyeron en el laboratorio de Manufactura. La forma de los adaptadores, permitieron llevar a cabo las pruebas de esfuerzo de tracción y esfuerzo cortante, empleando el módulo de pruebas mecánicas de la Máquina INSTRON.



Fig. 4-1 Adaptador Pruebas de Tracción

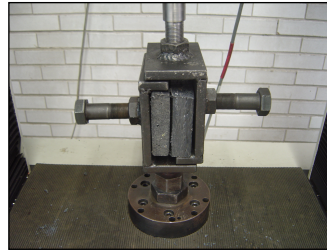


Fig. 4-2 Adaptador Pruebas de Esfuerzo Cortante

Los parámetros bajo los cuales se realizaron las pruebas, en el módulo de control de pruebas de la máquina INSTRON, fueron los siguientes:

Modelo de la máquina:

INSTRON CORPORATION.

Test Type: Tensile (ensayo de tracción en plásticos)

Interface Type: 4200 series

Machine parameters of test:

Sample rate (pts/sec): 10.00

Crosshead speed (mm/min): 5.00

Sample Type: ASTM

Humidity: 50%

Temperature: 18 °C

4.1.4.1 Datos obtenidos de las Pruebas de Tracción.

Los datos obtenidos a partir de las pruebas en la máquina Instron fueron la Carga Máxima Soportada por el ensamble medido en KiloNewtons (KN); para su manejo e interpretación se hizo la conversión correspondiente a Kilogramos (Kg).

Tabla 4-2 Datos obtenidos de las pruebas de extracción

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX
	FISICA	INSTRON	KN	Kg
Grupo 1	1	1	3.35	342.24
Grupo 1	2	2	4.42	450.71
Grupo 1	3	3	4.23	431.84
Grupo 2	1	2	2.92	298.27
Grupo 2	2	3	3.64	371.43
Grupo 2	3	4	3.19	325.41
Grupo 2	4	5	3.18	324.59
Grupo 2	5	6	3.18	324.18
Grupo 2	6	7	2.46	250.61
Grupo 2	7	8	3.68	375.10
Grupo 2	8	9	2.42	247.35
Grupo 2	9	10	3.27	334.08
Grupo 2	10	11	2.92	298.27
Grupo 3	11	12	3.40	347.24
Grupo 3	12	13	2.56	261.33
Grupo 3	13	14	2.72	277.76
Grupo 3	14	15	2.95	300.82
Grupo 3	15	16	3.26	332.45
Grupo 3	16	17	2.78	283.47
Grupo 3	17	18	3.00	306.12
Grupo 3	18	19	3.00	305.71
Grupo 3	19	20	2.64	269.59
Grupo 4	20	1	n/d	
Grupo 4	21	2	4.49	458.16



Continuación Tabla 4-2

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX
	FISICA	INSTRON	KN	Kg
Grupo 4	22	3	3.338	340.61
Grupo 4	23	4	3.463	353.37
Grupo 4	24	5	4.639	473.37
Grupo 4	25	6	3.382	345.10
Grupo 4	26	7	3.189	325.41
Grupo 4	27	8	4.397	448.67
Grupo 4	28	9	4.111	419.49
Grupo 4	29	10	4.015	409.69
Grupo 4	30	11	n/d	n/d
Grupo 4	31	12	3.809	388.67
Grupo 5	32	13	2.13	217.35
Grupo 5	33	14	2.207	225.20
Grupo 5	34	15	1.495	152.55
Grupo 5	35	16	2.464	251.43
Grupo 5	36	17	1.784	182.04
Grupo 5	37	18	2.42	246.94
Grupo 5	38	19	2.46	251.02
Grupo 5	39	20	2.589	264.18
Grupo 5	40	21	2.098	214.08
Grupo 5	41	22	1.868	190.61
Grupo 5	42	23	2.299	234.59
Grupo 5	43	24	2.303	235.00
Grupo 6	1	1	4.02	409.69
Grupo 6	2	2	5.42	553.06
Grupo 6	3	3	4.47	455.71
Grupo 6	4	4	4.33	441.73
Grupo 6	5	5	5.38	548.98
Grupo 6	6	6	4.96	505.82

Continuación Tabla 4-2

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX
	FISICA	INSTRON	KN	Kg
Grupo 6	7	7	5.11	521.84
Grupo 6	8	8	5.53	564.59
Grupo 6	9	9	5.13	523.47
Grupo 6	10	10	4.17	425.71
Grupo 7	11	11	3.15	321.33
Grupo 7	12	12	3.03	308.98
Grupo 7	13	13	3.86	394.08
Grupo 7	14	14	4.14	422.86
Grupo 7	15	15	3.05	311.43
Grupo 7	16	16	3.92	400.20
Grupo 7	17	17	3.32	338.98
Grupo 7	18	18	3.46	352.96
Grupo 7	19	19	4.05	413.37
Grupo 7	20	20	3.23	329.49
Grupo 8	21	21	2.49	253.98
Grupo 8	22	22	2.70	275.71
Grupo 8	23	23	2.13	217.35
Grupo 8	24	24	2.03	207.45
Grupo 8	25	25	1.72	175.41
Grupo 8	26	26	2.72	277.35
Grupo 8	27	27	3.13	318.88
Grupo 8	28	28	2.42	247.35
Grupo 8	29	29	3.48	355.00
Grupo 8	30	30	2.42	247.35
Grupo 8	31	31	3.08	313.88

Tabla 4-2 Datos obtenidos de las pruebas de esfuerzo de Tracción

4.1.4.2 Datos obtenidos de las Pruebas de Esfuerzo Cortante.

Los datos obtenidos de la máquina Instron fueron la Carga Máxima Soportada por el ensamble medido en KilonNewtons (KN); para su manejo e interpretación se hizo la conversión correspondiente a Kilogramos (Kg).

**Tabla 4-3 Datos obtenidos de las pruebas de esfuerzo Cortante**

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX
	FISICA	INSTRON	KN	Kg
Grupo 9	1	1	3.94	402.24
Grupo 9	2	2	3.97	405.51
Grupo 9	3	3	4.76	486.12
Grupo 9	4	4	3.96	404.29
Grupo 9	5	5	4.47	456.12
Grupo 9	6	6	4.17	425.31
Grupo 9	7	7	3.50	357.45
Grupo 9	8	8	4.54	463.47
Grupo 9	9	9	4.73	482.35
Grupo 9	10	10	4.38	446.63
Grupo 10	11	11	6.86	700.20
Grupo 10	12	12	6.81	694.80
Grupo 10	13	13	6.73	687.04
Grupo 10	14	14	6.29	641.84
Grupo 10	15	15	6.12	624.59
Grupo 10	16	16	6.38	650.82
Grupo 10	17	17	7.03	717.04
Grupo 10	18	18	6.99	713.27
Grupo 10	19	19	7.06	720.71
Grupo 10	20	20	6.55	668.06

Continuación Tabla 4-3

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX
	FISICA	INSTRON	KN	Kg
Grupo 11	21	21	2.74	279.39
Grupo 11	22	22	3.23	329.08
Grupo 11	23	23	3.04	309.80
Grupo 11	24	24	2.83	288.47
Grupo 11	25	25	2.02	205.82
Grupo 11	26	26	2.76	281.84
Grupo 11	27	27	2.93	299.08
Grupo 11	28	28	2.40	244.49
Grupo 11	29	29	2.63	267.86
Grupo 11	30	30	2.18	222.24
Grupo 11	31	31	2.05	208.78
Grupo 12	32	32	1.68	171.33
Grupo 12	33	33	1.68	171.33
Grupo 12	34	34	1.34	136.43
Grupo 12	35	35	1.50	153.27
Grupo 12	36	36	1.35	137.65
Grupo 12	37	37	1.31	133.98
Grupo 12	38	38	1.25	127.35
Grupo 12	39	39	0.98	99.85
Grupo 12	40	40	1.14	115.92

Tabla 4-3 Datos obtenidos de las pruebas de esfuerzo cortante.

#### 4.1.5 Manejo Estadístico de los Datos Obtenidos.

Con base en los datos obtenidos experimentalmente se procedió al análisis estadístico de los mismos; en primera instancia se calculó la carga máxima de extracción promedio de cada grupo, como se indica a continuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

Donde:

$\bar{x}$  = "CARGA MAXIMA PROMEDIO"

$n$  = "NÚMERO DE ELEMENTOS DEL GRUPO"

$a$  = "CARGA MAXIMA SOPORTADA POR LA PROBETA"

$i$  = "I - ESIMA PROBETA ANALIZADA"

Posteriormente, de igual forma, para cada grupo se determinó la desviación estándar.

$$\sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{Ec. 4-2})$$

Donde:

$\sqrt{s^2}$  = "DESVIACIÓN ESTANDAR DEL GRUPO"

$\bar{x}$  = "CARGA MAXIMA PROMEDIO"

$n$  = "NÚMERO DE ELEMENTOS DEL GRUPO"

$x$  = "CARGA MAXIMA SOPORTADA POR LA PROBETA"

$i$  = "I - ESIMA PROBETA ANALIZADA"

Una vez determinados estos dos parámetros se identificaron aquellas muestras cuyos valores de resistencia se encontraran dentro del rango definido por el promedio de resistencia más/menos una desviación estándar.

Los resultados de esta selección se muestran a continuación:

Tabla 4-4 Muestras dentro de la desviación estándar de la Resistencia a la extracción promedio (Esfuerzo de tracción).

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX	CARGA MAX. PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR DEL GPO.	EN RANGO
	FISICA	INSTRON	KN	Kg	Kg	Kg	SÍ/NO
Grupo 1	-	1	3.35	342.24	408.27	57.95	No
Grupo 1	-	2	4.42	450.71			Sí
Grupo 1	-	3	4.23	431.84			Sí
Grupo 2	1	2	2.92	298.27	314.93	43.11	Sí
Grupo 2	2	3	3.64	371.43			No
Grupo 2	3	4	3.19	325.41			Sí
Grupo 2	4	5	3.18	324.59			Sí
Grupo 2	5	6	3.18	324.18			Sí
Grupo 2	6	7	2.46	250.61			No
Grupo 2	7	8	3.68	375.10			No
Grupo 2	8	9	2.42	247.35			No
Grupo 2	9	10	3.27	334.08			Sí
Grupo 2	10	11	2.92	298.27			Sí
Grupo 3	11	12	3.40	347.24	298.28	28.54	No
Grupo 3	12	13	2.56	261.33			No
Grupo 3	13	14	2.72	277.76			Sí
Grupo 3	14	15	2.95	300.82			Sí
Grupo 3	15	16	3.26	332.45			No
Grupo 3	16	17	2.78	283.47			Sí
Grupo 3	17	18	3.00	306.12			Sí
Grupo 3	18	19	3.00	305.71			Sí
Grupo 3	19	20	2.64	269.59	No		

Continuación Tabla 4-4

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX	CARGA MAX. PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR DEL GPO.	EN RANGO
	FISICA	INSTRON	KN	Kg	Kg	Kg	SÍ/NO
Grupo 4	20	1	n/d		396.26	53.62	No
Grupo 4	21	2	4.49	458.16			No
Grupo 4	22	3	3.338	340.61			No
Grupo 4	23	4	3.463	353.37			Sí
Grupo 4	24	5	4.639	473.37			No
Grupo 4	25	6	3.382	345.10			Sí
Grupo 4	26	7	3.189	325.41			No
Grupo 4	27	8	4.397	448.67			Sí
Grupo 4	28	9	4.111	419.49			Sí
Grupo 4	29	10	4.015	409.69			Sí
Grupo 4	30	11	n/d	-			No
Grupo 4	31	12	3.809	388.67			Sí
Grupo 5	32	13	2.13	217.35	222.08	32.94	Sí
Grupo 5	33	14	2.207	225.20			Sí
Grupo 5	34	15	1.495	152.55			No
Grupo 5	35	16	2.464	251.43			Sí
Grupo 5	36	17	1.784	182.04			No
Grupo 5	37	18	2.42	246.94			Sí
Grupo 5	38	19	2.46	251.02			Sí
Grupo 5	39	20	2.589	264.18			No
Grupo 5	40	21	2.098	214.08			Sí
Grupo 5	41	22	1.868	190.61			Sí
Grupo 5	42	23	2.299	234.59			Sí
Grupo 5	43	24	2.303	235.00			Sí
Grupo 6	1	1	4.02	409.69	495.06	56.99	No
Grupo 6	2	2	5.42	553.06			No
Grupo 6	3	3	4.47	455.71			Sí
Grupo 6	4	4	4.33	441.73			Sí
Grupo 6	5	5	5.38	548.98			Sí

Continuación Tabla 4-4

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX	CARGA MAX. PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR DEL GPO.	EN RANGO
	FISICA	INSTRON	KN	Kg	Kg	Kg	SÍ/NO
Grupo 6	6	6	4.96	505.82			Sí
Grupo 6	7	7	5.11	521.84			Sí
Grupo 6	8	8	5.53	564.59			No
Grupo 6	9	9	5.13	523.47			Sí
Grupo 6	10	10	4.17	425.71			No
Grupo 7	11	11	3.15	321.33	359.37	44.04	Sí
Grupo 7	12	12	3.03	308.98			No
Grupo 7	13	13	3.86	394.08			Sí
Grupo 7	14	14	4.14	422.86			No
Grupo 7	15	15	3.05	311.43			No
Grupo 7	16	16	3.92	400.20			Sí
Grupo 7	17	17	3.32	338.98			Sí
Grupo 7	18	18	3.46	352.96			Sí
Grupo 7	19	19	4.05	413.37			No
Grupo 7	20	20	3.23	329.49			Sí
Grupo 8	21	21	2.49	253.98	262.70	52.87	Sí
Grupo 8	22	22	2.70	275.71			Sí
Grupo 8	23	23	2.13	217.35			Sí
Grupo 8	24	24	2.03	207.45			No
Grupo 8	25	25	1.72	175.41			No
Grupo 8	26	26	2.72	277.35			Sí
Grupo 8	27	27	3.13	318.88			No
Grupo 8	28	28	2.42	247.35			Sí
Grupo 8	29	29	3.48	355.00			No
Grupo 8	30	30	2.42	247.35			Sí
Grupo 8	31	31	3.08	313.88			Sí

Tabla 4-4 Muestras dentro de la desviación estándar de la Resistencia a la extracción promedio (Esfuerzo de tracción).



**Tabla 4-5 Muestras dentro de la desviación estándar de la Resistencia a la extracción promedio (Esfuerzo Cortante).**

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX	CARGA MAX. PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR DEL GPO.	EN RANGO
	FISICA	INSTRON	KN	Kg	Kg	Kg	SÍ/NO
Grupo 9	1	1	3.94	402.24	431.15	41.10	Sí
Grupo 9	2	2	3.97	405.51			Sí
Grupo 9	3	3	4.76	486.12			NO
Grupo 9	4	4	3.96	404.29			Sí
Grupo 9	5	5	4.47	456.12			Sí
Grupo 9	6	6	4.17	425.31			Sí
Grupo 9	7	7	3.50	357.45			NO
Grupo 9	8	8	4.54	463.47			Sí
Grupo 9	9	9	4.73	482.35			NO
Grupo 9	10	10	4.38	446.63			Sí
Grupo 10	11	11	6.86	700.20	681.07	33.83	Sí
Grupo 10	12	12	6.81	694.80			Sí
Grupo 10	13	13	6.73	687.04			Sí
Grupo 10	14	14	6.29	641.84			NO
Grupo 10	15	15	6.12	624.59			NO
Grupo 10	16	16	6.38	650.82			Sí
Grupo 10	17	17	7.03	717.04			NO
Grupo 10	18	18	6.99	713.27			Sí
Grupo 10	19	19	7.06	720.71			NO
Grupo 10	20	20	6.55	668.06			Sí

Continuación Tabla 4-5

	MUESTRA	CORRIDA	CARGA MAX	CARGA MAX	CARGA MAX. PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR DEL GPO.	EN RANGO
	FISICA	INSTRON	KN	Kg	Kg	Kg	SÍ/NO
Grupo 11	21	21	2.74	279.39	263.94	41.46	Sí
Grupo 11	22	22	3.23	329.08			NO
Grupo 11	23	23	3.04	309.80			NO
Grupo 11	24	24	2.83	288.47			Sí
Grupo 11	25	25	2.02	205.82			NO
Grupo 11	26	26	2.76	281.84			Sí
Grupo 11	27	27	2.93	299.08			Sí
Grupo 11	28	28	2.40	244.49			Sí
Grupo 11	29	29	2.63	267.86			Sí
Grupo 11	30	30	2.18	222.24			NO
Grupo 11	31	31	2.05	208.78			NO
Grupo 12	32	32	1.68	171.33	136.71	23.79	NO
Grupo 12	33	33	1.68	171.33			NO
Grupo 12	34	34	1.34	136.43			Sí
Grupo 12	35	35	1.50	153.27			Sí
Grupo 12	36	36	1.35	137.65			Sí
Grupo 12	37	37	1.31	133.98			Sí
Grupo 12	38	38	1.25	127.35			Sí
Grupo 12	39	39	0.98	99.85			NO
Grupo 12	40	40	1.14	115.92			Sí

Tabla 4-5 Muestras dentro del rango “Resistencia promedio más/menos una desviación estándar (Esfuerzo cortante)”.

Con aquellas muestras cuya resistencias dentro del rango definido como: Promedio +/- Desviación estándar, se determinó nuevamente el promedio de Resistencia Máxima con dichos valores.

La Tabla 4-6, muestra la resistencia máxima soportada por el ensamble considerando a aquellas muestras cuyo comportamiento se encontró dentro de un rango definido por el promedio de resistencia más/menos una desviación estándar.

GRUPO	TIPO DE PRUEBA	RESISTENCIA PROMEDIO DEL ENSAMBLE (Kg)	CLAVOS POR UNIÓN	CALIBRE DEL CLAVO	RESISTENCIA PROMEDIO POR CLAVO (Kg)
1	TRACCIÓN	441	3	1.28	147
2	TRACCIÓN	317	3	0.98	105.8
3	TRACCIÓN	302	3	0.98	100.9
4	TRACCIÓN	376	4	0.98	94
5	TRACCIÓN	229	2	0.98	114.8
6	TRACCIÓN	499	3	1.28	124.9
7	TRACCIÓN	356.2	4	1.28	118.7
8	TRACCIÓN	246.6	2	1.28	123.3
9	CORTANTE	429	4	0.98	107
10	CORTANTE	685	4	1.28	171
11	CORTANTE	276	2	1.28	138
12	CORTANTE	134	2	0.98	66.8

**Tabla 4-6. Resistencia promedio por clavo de las muestras seleccionadas como “dentro de rango: Promedio +/- una desviación estándar”, por grupo.**

De forma adicional, se determinó el promedio de la Carga Máxima Soportada por Clavo en ensayos de Tracción y Cortante, considerando todas las pruebas realizadas. El procedimiento que se utilizó fue dividir la Carga Máxima Soportada por cada Muestra entre el número de elementos que la constituían, y luego se trabajó como ya se ha descrito para obtener el promedio y la desviaciones estándar.

	Carga Máxima Promedio Soportada	Desviación Estándar	Ensayo
Calibre 0.98	104.09 Kg/clavo	14.34 Kg/clavo	Tracción
Calibre 1.28	125.17 Kg/clavo	15.65 Kg/clavo	Tracción
Calibre 0.98	89.79 Kg/clavo	22.6 Kg/Clavo	Cortante
Calibre 1.28	151 Kg/clavo	24.6 Kg/clavo	Cortante

**Tabla 4-7. Carga Máxima Promedio soportada por clavo de todas las muestras analizadas según calibre y tipo de ensayo.**

Para los ensayos de Tracción, con las lecturas de profundidad tomadas al inicio y al final de las pruebas, se determinó el desplazamiento relativo sufrido por

cada clavo del ensamble; con base en esto y en una inspección visual de cada muestra, se estableció un criterio de falla asociado a la carga de tracción.

Así mismo se determinaron los porcentajes de ocurrencia por cada grupo analizado y por tipo de falla asociada.

Una falla asociada a Estriado significa que tras la prueba de tracción, se observa que la unión se desprendió mayormente por la zona de estriado del clavo.

Una falla asociada a la Cabeza significa que tras la prueba de tracción, se observa que la unión se desprendió mayormente por un desgarramiento en la zona de la cabeza.

Un caso indefinido, es aquel en el cual, después de la prueba de tracción, no se observa desprendimiento o separación tal que permita determinar alguno de los dos casos anteriores mencionados.

En la tabla siguiente (Tabla 4-8 y 4-9) se presenta un resumen de los tipos de falla observados en las pruebas de extracción.

Tabla 4-8 De Pruebas de Tracción

GRUPO	FALLA ASOCIADA A:			TOTAL DE	CALIBRE	FALLA ASOCIADA A:			TOTAL DE
	ESTRIADO	CABEZA	INDEFINIDO	CLAVOS		ESTRIADO	CABEZA	INDEFINIDO	CLAVOS
2	11	17	2	30	0.98	36.7%	56.7%	6.7%	100.0%
3	10	13	1	24	0.98	41.7%	54.2%	4.2%	100.0%
4	33	15	0	48	0.98	68.8%	31.3%	0.0%	100.0%
5	10	14	0	24	0.98	41.7%	58.3%	0.0%	100.0%
	64	59	3	126		50.8%	46.8%	2.4%	100%

Tabla 4-8 Tipos de "fallas asociadas" observadas en las pruebas de Extracción (grupos 2 a 5).

Tabla 4-9 De Pruebas de Tracción

GRUPO	FALLA ASOCIADA A:			TOTAL DE	CALIBRE	FALLA ASOCIADA A:			TOTAL DE
	ESTRIADO	CABEZA	INDEFINIDO	CLAVOS		ESTRIADO	CABEZA	INDEFINIDO	CLAVOS
6	31	4	5	40	1.28	77.50%	10.00%	12.50%	100%
7	18	7	2	27	1.28	66.67%	25.93%	7.41%	100%
8	4	9	3	16	1.28	25.00%	56.25%	18.75%	100%
	53	20	10	83		63.9%	24.1%	12.0%	100.0%

Tabla 4-9 Tipos de "fallas asociadas" observadas en las pruebas de Extracción (grupos 6 a 8).

En la tabla 4-10, se presentan las observaciones derivadas de los ensayos de carga cortante.

GRUPO	FALLA ASOCIADA A:					FALLA ASOCIADA A:			
	ESTRIADO	CABEZA	INDEFINIDO	TOTAL DE CLAVOS	CALIBRE	ESTRIADO	CABEZA	INDEFINIDO	TOTAL DE CLAVOS
9	40	0	0	40	0.98	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
10	5	23	12	40	1.28	12.5%	57.5%	30.0%	100.0%
11	1	19	0	20	1.28	5.0%	95.0%	0.0%	100.0%
12	20	0	0	20	0.98	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
TOTAL	66	42	12	120					
%	55.0%	35.0%	10.0%	100.0%					

**Tabla 4-10** Tipos de “fallas asociadas” observadas en las pruebas de Carga Cortante (grupos 9 a 12).

**Cálculo de áreas proyectadas y de contacto de los clavos de la unión.**

Dados los dos tamaños de clavos empleados en las pruebas, calibre 0.98 y 1.28, tenemos las siguientes dimensiones:

**Tabla 4-11** Dimensiones de los clavos empleados en los ensayos.

Concepto	Calibre 0.98	Calibre 1.28
Diámetro de la cabeza ( $D_c$ )	6.3 mm	7 mm
Radio de la cabeza ( $R_c$ )	3.15 mm	3.5 mm
Diámetro del Vástago ( $D_v$ )	2.7 mm	3.3 mm
Radio del Vástago ( $R_v$ )	1.35 mm	1.65 mm
Longitud del Vástago	51 mm	63.5 mm
Ancho de pieza 1 de PEAD	22 mm	22 mm
Ancho de pieza 2 de PEAD	28.5 mm	28.5 mm

Se calcularon los siguientes conceptos:

$$1) A_{\text{CONTACTO}} = A_C - A_V \quad (\text{Ec. 4-2})$$

Donde:

$A_{\text{CONTACTO}}$ : Área de contacto (proyección de área) entre la cabeza del clavo y los perfiles de PEAD,

$A_C$ : Área de la cabeza del clavo

$A_V$ : Área de la sección transversal del vástago del clavo

$$2) A_{\text{AGARRE}} = P_V * L_P \quad (\text{Ec. 4-3})$$

Donde:

$A_{\text{AGARRE}}$ : Área de contacto entre el cuerpo vástago del clavo y los perfiles de PEAD

$P_V$ : Perímetro del vástago

$L_P$ : Longitud de penetración (longitud donde existe contacto entre el vástago y el perfil de PEAD).

Ejemplo.

Para 1 clavo Calibre 1.28 tenemos de la Ec. 4-2:

$$A_{\text{CONTACTO}} = A_C - A_V$$

$$A_C = \pi * R_C^2 = 3.1416 * (3.5 \text{ mm})^2 = 38.48 \text{ mm}^2$$

$$A_V = \pi * R_V^2 = 3.1416 * (1.6 \text{ mm})^2 = 8.04 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{CONTACTO}} = 30.44 \text{ mm}^2$$

Y de la Ec 4-3.:

$$A_{\text{AGARRE}} = P_V * L_P$$

$$P_V = 3.1416 * 3.3 \text{ mm} = 10.4 \text{ mm}$$

$$L_P = 22 \text{ mm} + 28.5 \text{ mm} = 50.5 \text{ mm}$$

$$A_{\text{AGARRE}} = 523.5 \text{ mm}^2$$

La tabla 4-12 muestra las áreas proyectadas ( $\text{mm}^2$ ) totales de 1 a 4 clavos.

$A_{\text{CONTACTO}}$	CAL. 1.28	CAL. 0.98
x1 clavo	30.44	25.45
x2 clavos	60.88	50.89
x3 clavos	91.33	76.34
x4 clavos	121.77	101.79

Tabla 4-12

La tabla 4-13 muestra las áreas de contacto del vástago y los perfiles de PEAD ( $\text{mm}^2$ ) totales de 1 a 4 clavos.

$A_{\text{AGARRE}}$	CAL. 1.28	CAL. 0.98
x1 clavo	523.55	428.36
x2 clavos	1047.09	856.71
x3 clavos	1570.64	1285.07
x4 clavos	2094.19	1713.42

Tabla 4-13

Tabla 4-14 Resumen de los datos recopilados en los ensayos de extracción.

Gpo.	Cal.	Clavos del Ensamble	$A_{\text{CONTACTO}}$ ( $\text{mm}^2$ )	$A_{\text{AGARRE}}$ ( $\text{mm}^2$ )	Falla asociada el Estriado.	Falla asociada a la cabeza	Falla Indefinida	Resistencia Promedio del Ensamble (Kg)	Resistencia Promedio por Clavo (Kg)
2	0.98	3	76.34	1285.07	36.7%	56.7%	6.7%	317.00	105.80
3	0.98	3	76.34	1285.07	41.7%	54.2%	4.2%	302.00	100.90
4	0.98	4	101.79	1713.42	68.8%	31.3%	0.0%	376.00	94.00
5	0.98	2	50.89	856.71	41.7%	58.3%	0.0%	229.00	114.80
6	1.28	4	121.77	2094.19	77.50%	10.00%	12.50%	499.00	124.90
7	1.28	3	91.33	1570.64	66.67%	25.93%	7.41%	356.20	118.70
8	1.28	2	60.88	1047.09	25.00%	56.25%	18.75%	246.60	123.30

Dadas la marcada diferencia en ordenes de magnitud entre  $A_{\text{CONTACTO}}$  y  $A_{\text{AGARRE}}$  se puede recurrir al uso de logaritmos base 10 para poder realizar comparaciones más representativas; aplicando logaritmo a  $A_{\text{CONTACTO}}$  y  $A_{\text{AGARRE}}$  y actualizando la tabla 4-14 tenemos:

Análisis del comportamiento Mecánico de Uniones de Polietileno Reciclado.

Gpo.	Cal.	Clavos del Ensamble	Falla asociada el Estriado	Falla asociada a la cabeza	Falla Indefinida	Log TAC	Log AC	Log TAC-Log AC	Resist. Ensamble (Kg)	Resist. clavo (Kg)
2	0.98	3	36.7%	56.7%	6.7%	1.88	3.11	1.6513	317.00	105.80
3	0.98	3	41.7%	54.2%	4.2%	1.88	3.11	1.6513	302.00	100.90
4	0.98	4	68.8%	31.3%	0.0%	2.01	3.23	1.6107	376.00	94.00
5	0.98	2	41.7%	58.3%	0.0%	1.71	2.93	1.7185	229.00	114.80
6	1.28	4	77.50%	10.00%	12.50%	2.09	3.32	1.5924	499.00	124.90
7	1.28	3	66.67%	25.93%	7.41%	1.96	3.20	1.6302	356.20	118.70
8	1.28	2	25.00%	56.25%	18.75%	1.78	3.02	1.6923	246.60	123.30

Tabla 4-15 Resumen de los datos recopilados en los ensayos de extracción, empleando logaritmos.

**Modelo Matemático para determinar la carga de extracción normal.**

Con base en el modelo matemático citado en la literatura para determinar la carga de extracción normal en la madera, tenemos que la ecuación 3-13:

$$P = 97G^{5/2}D$$

En la que P es la resistencia, límite en Kg/cm de penetración.

G es la densidad específica basada en madera secada al horno.

D es el diámetro del calvo en cm.

Despejando G de la ecuación tenemos:

$$G = \left(\frac{P}{97D}\right)^{2/5} \quad (\text{Ec. 4-3})$$

con los valores de resistencia obtenidos en las pruebas de extracción (2 cm de penetración) para las muestra con clavos de calibre 0.98 ( Diámetro de 0.27 cm) tenemos entonces que :

Tabla 4-16 Valor de la densidad específica G para las muestras de extracción.

	MUESTRA	CORRIDA	Carga Max. Ensamble	P por clavo	G
	FISICA	INSTRON	Kg	Kg/cm	
Grupo 2	1	2	298.27	49.71	1.29
Grupo 2	2	3	371.43	61.91	1.41
Grupo 2	3	4	325.41	54.24	1.34
Grupo 2	4	5	324.59	54.1	1.34
Grupo 2	5	6	324.18	54.03	1.34
Grupo 2	6	7	250.61	41.77	1.21
Grupo 2	7	8	375.1	62.52	1.42
Grupo 2	8	9	247.35	41.23	1.20



Análisis del comportamiento Mecánico de Uniones de Polietileno Reciclado.

Continuación de tabla 4-16.

	MUESTRA	CORRIDA	Carga Max. Ensamble	P por clavo	G
	FISICA	INSTRON	Kg	Kg/cm	
Grupo 2	9	10	334.08	55.68	1.35
Grupo 2	10	11	298.27	49.71	1.29
Grupo 3	11	12	347.24	57.88	1.37
Grupo 3	12	13	261.33	43.56	1.23
Grupo 3	13	14	277.76	46.3	1.26
Grupo 3	14	15	300.82	50.14	1.30
Grupo 3	15	16	332.45	55.41	1.35
Grupo 3	16	17	283.47	47.25	1.27
Grupo 3	17	18	306.12	51.02	1.31
Grupo 3	18	19	305.71	50.95	1.31
Grupo 3	19	20	269.59	44.93	1.24
Grupo 4	21	2	458.16	57.27	1.37
Grupo 4	22	3	340.61	42.58	1.21
Grupo 4	23	4	353.37	44.17	1.23
Grupo 4	24	5	473.37	59.17	1.39
Grupo 4	25	6	345.1	43.14	1.22
Grupo 4	26	7	325.41	40.68	1.19
Grupo 4	27	8	448.67	56.09	1.36
Grupo 4	28	9	419.49	52.44	1.32
Grupo 4	29	10	409.69	51.21	1.31
Grupo 4	30	11	388.67	48.59	1.28
Grupo 4	31	12	-	-	-
Grupo 5	32	13	217.35	54.34	1.34
Grupo 5	33	14	225.2	56.3	1.36
Grupo 5	34	15	152.55	38.14	1.16
Grupo 5	35	16	251.43	62.86	1.42
Grupo 5	36	17	182.04	45.51	1.25
Grupo 5	37	18	246.94	61.74	1.41
Grupo 5	38	19	251.02	62.76	1.42
Grupo 5	39	20	264.18	66.05	1.45
Grupo 5	40	21	214.08	53.52	1.33
Grupo 5	41	22	190.61	47.66	1.27
Grupo 5	42	23	234.59	58.65	1.38
Grupo 5	43	24	235	58.75	1.38

Con los valores de G calculados, se puede obtener un valor promedio para la muestra, quedando entonces que:

$$G_{\text{average}} = 1.3131$$

Modificando el parámetro de Diámetro del clavo a quedar 0.33 cm ( calibre 1.28)  
tenemos:

$$P = 97G^{5/2}D \quad (\text{Ec. 3-13})$$

$$P = 97 * 1.3131^{\frac{5}{2}} * 0.33 = 126.50 \quad (\text{Ec. 3-14})$$

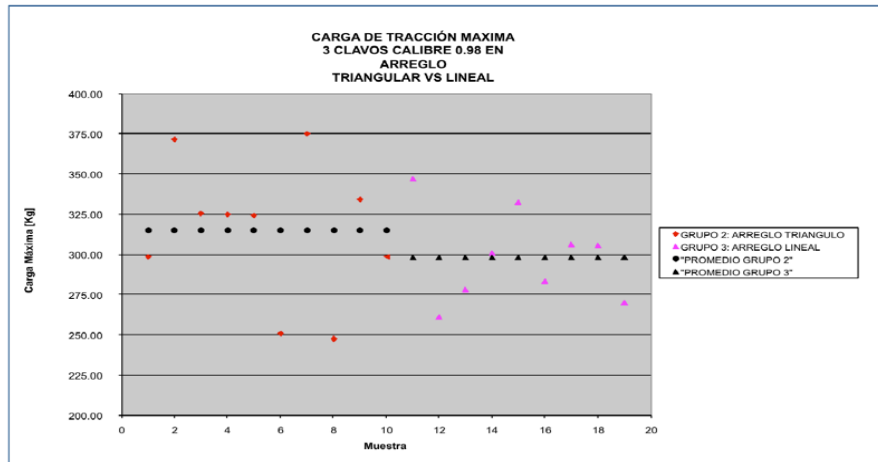
$$\mathbf{P = 126.50 \text{ Kg /cm}}$$

(Nota: el valor de la carga de extracción normal (2 cm de penetración) para calibre de clavo 1.28 con base en los datos experimentales es 125.17 Kg)

## 4.2 Presentación de Resultados.

### Ensayos de Esfuerzo de Tracción

El gráfico 4-1 presenta una comparación entre las Cargas de extracción Máximas Soportadas por Ensamblajes del Grupo 2 y el Grupo 3.



Gráfica 4-1

Carga de Tracción Máxima de los Grupos 2 y 3.

Grupo 2: Clavos calibre 0.98 – 3 clavos en arreglo Triangular

Grupo 3: Clavos calibre 0.98 – 3 clavos en arreglo Lineal

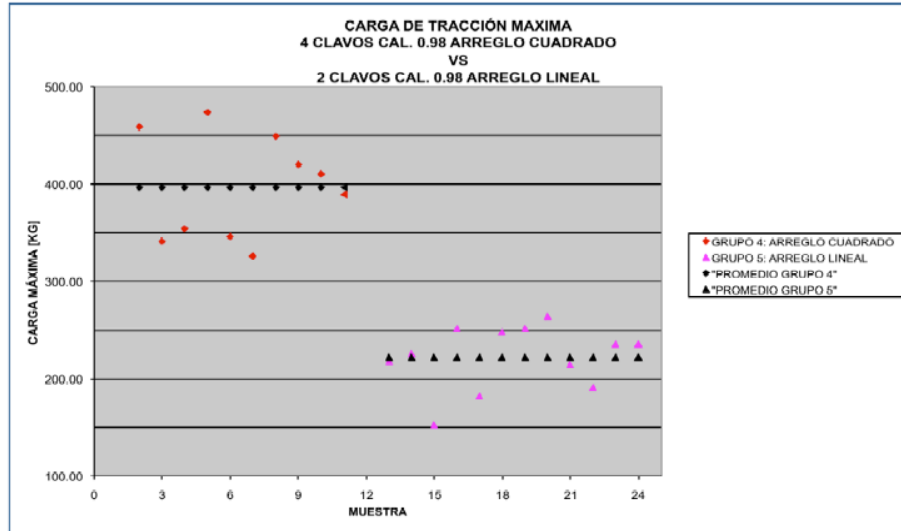
- Carga de tracción Máxima Promedio del grupo 2: 317 Kg por ensamble y 105.8 Kg/clavo
- Carga de tracción Máxima Promedio del grupo 3: 302 Kg por ensamble y 100.9 Kg/clavo
- Carga de tracción Máxima Promedio de todas las muestras: 104.9 Kg/clavo (De acuerdo a tabla 4-7)

De la tabla 14-4 se observa que ambos grupos presentaron fallas mayormente asociadas a la cabeza, que la resistencia a la carga está en el rango del promedio de todas las muestras, y que, como se desearía en cuestiones de diseño, existieron casos de fallas tipo “indefinidas”.

Se puede observar que la carga máxima de extracción soportada por los ensambles del grupo 2 es del mismo orden que la Carga de Extracción Máxima Promedio de Todas las Muestras.

El arreglo geométrico que se le da al ensamble no influye de manera importante en la carga máxima de extracción que pudiese soportar el elemento unido.

El gráfico 4-2 presenta una comparación entre las Cargas de extracción Máximas Soportadas por Ensamblajes del Grupo 4 y el Grupo 5.



Gráfica 4-2 Carga de Tracción Máxima de los Grupos 4 y 5.

Grupo 4: Clavos calibre 0.98 – 2 clavos en arreglo Lineal

Grupo 5: Clavos calibre 0.98 – 4 clavos en arreglo forma de cuadro

Carga de Extracción Máxima Promedio del grupo 4: 376 Kg por ensamble y 94 Kg/clavo

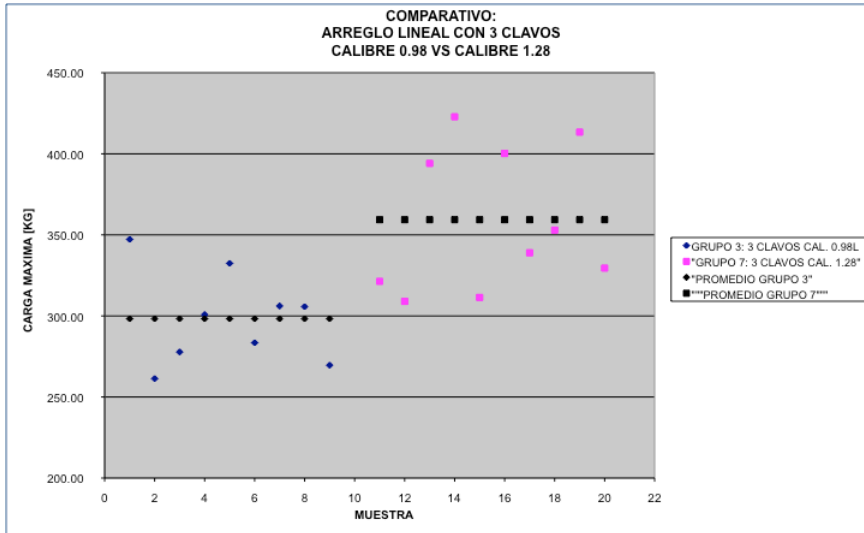
Carga de Extracción Máxima Promedio del grupo 5: 229 Kg por ensamble y 114.8 Kg/clavo

Carga de Extracción Máxima Promedio de todas las muestras: 104.9 Kg/clavo ( De acuerdo a tabla 4-7)

De la tabla 14-4, se observa que la falla asociada al grupo 4, está mayormente orientada a la zona de estriado (68.8% de los clavos fallaron en esta zona) presentando una resistencia a la extracción por clavo menor a la que presentó el grupo 5, cuya falla asociada con mayor incidencia fue en la zona de la cabeza (58.3% de clavos) y valores de resistencia a la extracción de 114.8 Kg / clavo.

En ambos grupos no se registraron fallas del tipo “Indefinidas”. Los promedios de resistencia a la extracción por clavo de estos grupos se sitúan en los extremos obtenidos, el grupo 4 con el promedio más bajo y el grupo 5 con el promedio más alto.

El gráfico 4-3 presenta una comparación entre la Carga Máxima Soportadas por ensambles del Grupo 3 y del Grupo 7.



Gráfica 4-3 Carga de Tracción Máxima de los Grupos 3 y 7.

Grupo 3: Clavos calibre 0.98 – 3 clavos en arreglo Lineal

Grupo 7: Clavos calibre 1.28 – 3 clavos en arreglo Lineal

- Carga de extracción Máxima Promedio del grupo 3: 302 Kg por ensamble – 100.9 Kg/clavo
- Carga de extracción Máxima Promedio del grupo 7: 499 Kg por ensamble – 118.7 Kg/clavo

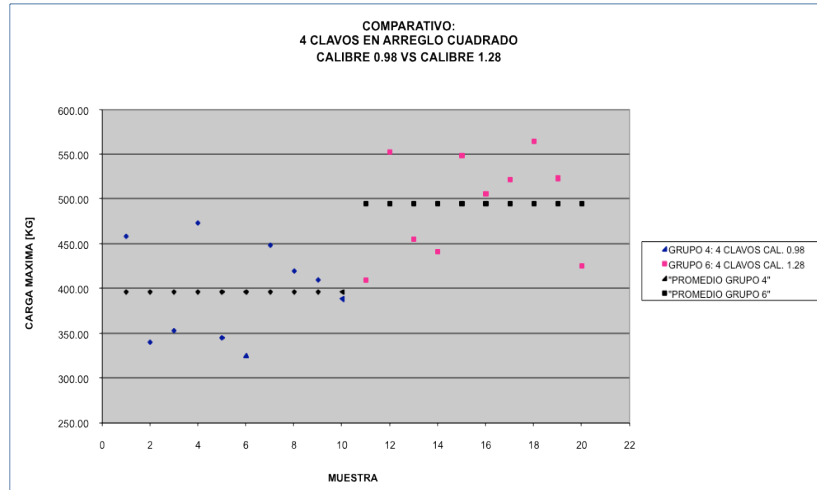
Carga de extracción Máxima Promedio de todas las muestras de calibre 0.98: 104.9 Kg/clavo

- Carga de extracción Máxima Promedio de todas las muestras de calibre 1.28: 125.17 Kg/clavo

En este caso se comparan arreglos geométricos iguales, pero con calibres de clavo diferentes; Al incrementar el calibre del clavo, se observa con base en la tabla 14-4, que la falla asociada más común pasa de 54.2% (cal. 0.98) a 25.9% (cal. 1.28) en el área de la cabeza .

El incremento en la resistencia a la extracción por clavo, al aumentar el calibre del clavo (de 0.98 a 1.28) es de 17.8 Kg/ clavo (20.48% de incremento).

El Gráfico 4-4 presenta una comparación entre las Cargas Máximas de Extracción Soportadas por Ensamblajes del Grupo 4 y el Grupo 6.



Gráfica 4-4 Carga de Tracción Máxima de los Grupos 4 y 6

Grupo 4: Clavos calibre 0.98 – 4 clavos en arreglo en forma de cuadro

Grupo 6: Clavos calibre 1.28 – 4 clavos en arreglo en forma de cuadro

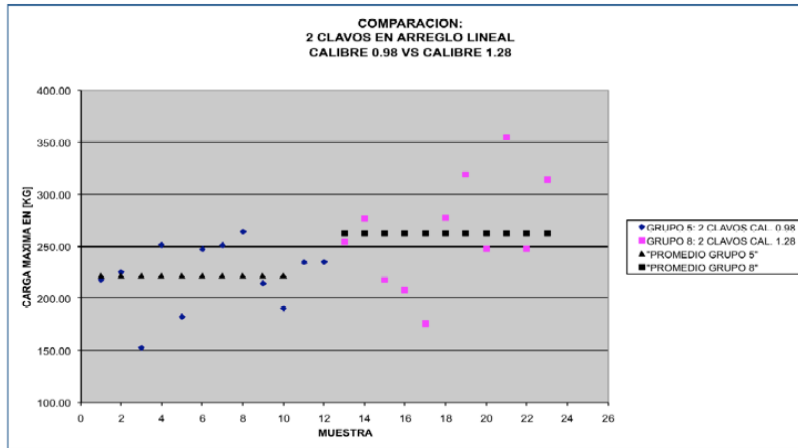
- Carga de tracción Máxima Promedio del grupo 4: 376 Kg por ensamble – 94 Kg/clavo
- Carga de tracción Máxima Promedio del grupo 6: 499 Kg por ensamble – 124.9 Kg/clavo

Carga de tracción Máxima Promedio de todas las muestras de calibre 0.98: 104.9 Kg/clavo

- Carga de tracción Máxima Promedio de todas las muestras de calibre 1.28: 125.17 Kg/clavo

Al igual que en el caso anterior, aquí se vuelven a comparar arreglos geométricos iguales, con clavos de diferentes calibres pero ahora mayor número de clavos; de la tabla 14-4, la falla en la zona de la cabeza pasa de 31.3% (cal. 0.98) a un 10% (cal. 1.28), sin embargo, en el grupo 4 (4 clavos cal. 0.98) tenemos la resistencia a la extracción por clavo más baja de todos los ensayos (94 Kg/clavo), mientras que para el grupo 6 (4 clavos cal. 1.28) la resistencia a la extracción por clavo es la mayor obtenida (124.9 Kg/ clavo); así mismo hay que notar la presencia de fallas del tipo “Indefinidas” en el grupo 6 (12.5%).

El gráfico 4-5 presenta una comparación entre las Cargas de extracción Máximas Soportadas por Ensamblajes del Grupo 5 y el Grupo 8.



Gráfica 4-5 Carga de Tracción Máxima de los Grupos 5 y 8.

Grupo 5: Clavos calibre 0.98 – 2 clavos en arreglo Lineal

Grupo 8: Clavos calibre 1.28 – 2 clavos en arreglo Lineal

- Carga de tracción Máxima Promedio del grupo 5: 229.0 Kg por ensamble – 114.8 Kg/clavo
- Carga de tracción Máxima Promedio del grupo 8: 246.6 Kg por ensamble – 123.3 Kg/clavo

Carga de tracción Máxima Promedio de todas las muestras de calibre 0.98: 104.9 Kg/clavo

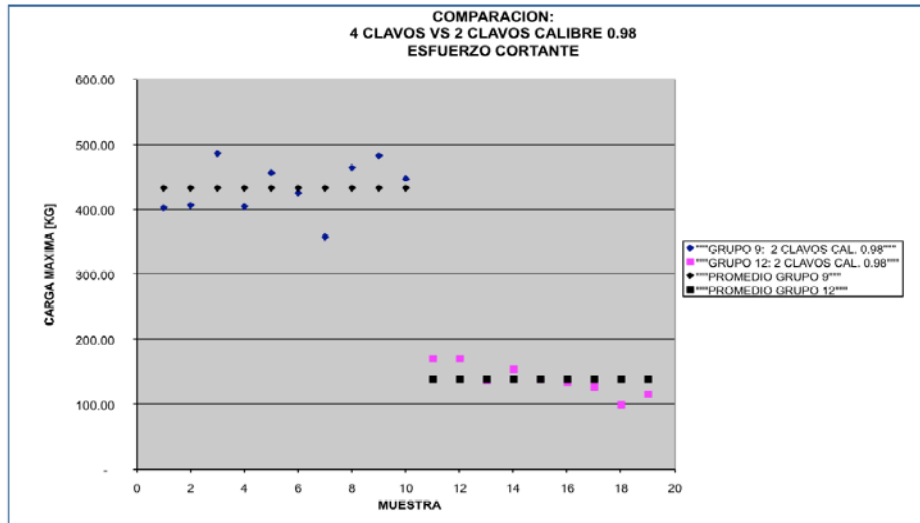
- Carga de tracción Máxima Promedio de todas las muestras de calibre 1.28: 125.17 Kg/clavo

En este comparativo se analiza el tercer caso de arreglos geométricos iguales, calibres de clavos diferentes, y menor número de clavos: 2. De la tabla 14-4, para el grupo 5 se observa que la resistencia a la extracción máxima por clavo es de 114.8 Kg/clavo, que la falla asociada a la cabeza es 58.3%, que la falla asociada al estriado es 41.7% y que este grupo obtuvo la mayor resistencia a la extracción por clavo de todos los grupos de calibre 0.98.

Para el grupo 8 tenemos una resistencia a la carga de extracción de 123.3 Kg/clavo, la falla asociada a la cabeza 56.25%, falla asociada al estriado 25% y fallas “indeterminadas” de 18,75%.

Ensayos de Esfuerzo Cortante

La gráfica 4-6 muestra las Cargas Máximas Soportadas en la Modalidad Cortante para Ensamblajes del Grupo 9 y 12 respectivamente.



Gráfica 4-6 Carga de Tracción Máxima de los Grupos 9 y 12.

Grupo 9: Clavos calibre 0.98 – 4 clavos en arreglo Lineal

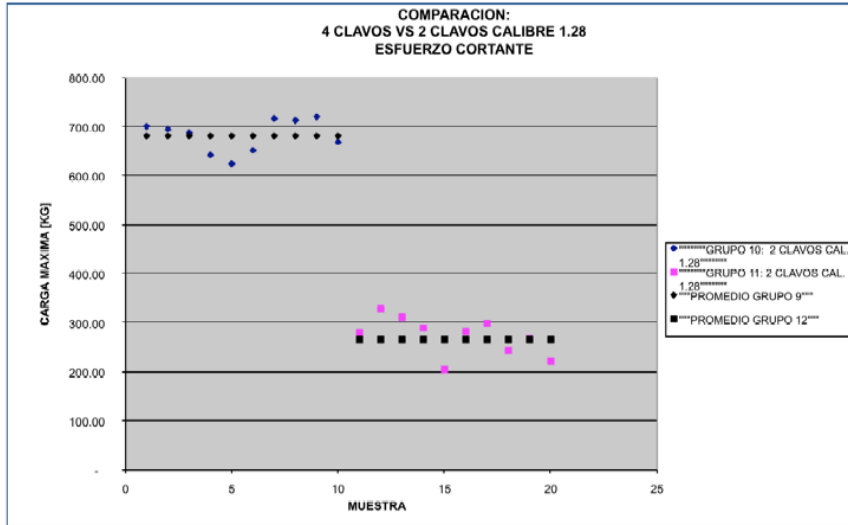
Grupo 12: Clavos calibre 0.98 – 2 clavos en arreglo Lineal

- Carga Cortante Máxima Promedio del grupo 9: 429 Kg por ensamble – 107 Kg/clavo
- Carga Cortante Máxima Promedio del grupo 12: 134 Kg por ensamble – 66.8 Kg/clavo

En los ensayos de resistencia a la extracción cortante, para los ensambles de calibre 0.98, las inspecciones visuales para determinar el tipo de falla asociada arrojan para ambos grupos un 100% de falla asociada a la zona de estriado.



La gráfica 4-7 compara la resistencia a esfuerzo Cortante entre ensambles con 2 y 4 clavos de calibre 1.28.



Gráfica 4-1 Carga de Tracción Máxima de los Grupos 10 y 11.

Grupo 10: Clavos calibre 1.28 – 4 clavos en arreglo Lineal

Grupo 11: Clavos calibre 1.28 – 2 clavos en arreglo Lineal

Carga Cortante Máxima Promedio del grupo 10: 685 Kg por ensamble – 171 Kg/clavo

Carga Cortante Máxima Promedio del grupo 11: 276 Kg por ensamble – 138 Kg/clavo

En los ensayos de resistencia a la extracción cortante, para los ensambles de calibre 1.28, las fallas asociadas observadas son diferentes que en el caso de muestras con clavos de calibre 0,98.

El grupo 11, presentó en un 95% de los casos, fallas asociadas a la cabeza, sin observarse casos “indefinidos”; el grupo 10 por el contrario, presentó fallas asociadas a la cabeza de 58%, fallas asociadas al estriado de 13% y casos “indefinidos” de 30%.

## 5. CONCLUSIONES.

Con base en lo establecido en la literatura, las pruebas realizadas y el análisis de resultados obtenidos, se pueden concluir los siguientes puntos:

- La resistencia a la extracción de ensambles de polietileno de alta densidad reciclado mediante clavos estriados de calibre 0.98, considerando el criterio de resistencia a la extracción por unidad de sujeción (clavo), se ve disminuida a medida que aumenta el número de clavos empleados. De igual forma, la falla asociada en la unión (con los valores de resistencia a la extracción mayores) son aquellos que se dan en mayor porcentaje en la zona de la cabeza del clavo.
- Sustituir elementos de unión calibre 0.98 por clavos estriados de calibre 1.28 incrementa la resistencia a la extracción por elemento de unión, sin que se presente una caída en la resistencia a la extracción por clavo al aumentar el número de unidades empleadas. El incremento en el número de elementos de unión disminuye el porcentaje de casos en los que la falla asociada a la extracción es en la zona de la cabeza del clavo.
- Las pruebas de extracción cortante empleando clavos de calibre 0.98 muestran fallas en la unión asociada a la zona del estriado sin importar el número de clavos involucrados.
- Las pruebas de extracción cortante empleando clavos de calibre 1.28 muestran mayormente fallas asociadas a la zona de la cabeza (95% para los casos en los que se usaban 2 clavos, 57.5% para los casos en los que se usaban 4 clavos); es importante destacar que el grupo 10 (calibre 1.28 y 4 clavos) presentó 30% de casos de falla asociado como “indefinida” lo que significa que la “deformación plástica” de la unión fue mínima comparada con los demás grupos, situación muy deseable en cuestiones de diseño.
- Tomando en cuenta el desempeño de los clavos de calibre 0.98 durante las pruebas de extracción normal, el incremento en la resistencia a la extracción normal al emplear clavos calibre 1.28, depende del número de clavos

empleados, teniendo incrementos desde 7% para dos clavos hasta 26% cuando se trata de 4 clavos (incremento en la resistencia de cada clavo)

- Partiendo del modelo matemático para determinar la Resistencia a la extracción citada en la literatura ( modelo para madera), y considerando los siguientes aspectos:
  - 1) Que sin tener la misma naturaleza, pero debido al proceso de extrusión al cuál son sometidos los perfiles de polietileno de alta densidad en su conformado, se puede considerar que los perfiles tienen en su estructura macroscópica interna un símil a las fibras contenidas en la madera (producto del proceso de cristalización).
  - 2) Que la profundidad de penetración de los elementos de unión es en todos los casos de 2 pulg. (que representan el grosor de los perfiles de PEAD reciclados del ensamble)
  - 3) Que la constante  $K$  (constante que depende de la especie) es 97 y la potencia  $n$  igual a  $5/2$  como se cita en la literatura.
  - 4) Que el Diámetro del clavo empleado es de 0.27 cm

Se determinó con base en la ecuación 3-13 el valor de  $G$  (donde  $G$  es la Densidad Específica basada en madera secada al horno, de la madera empleada para ensayos de extracción de clavos en madera”) con el cual se puede modelar el comportamiento de la resistencia a la extracción de clavos estriados en PEAD.

Si bien este valor de densidad específica, no coincide con los valores establecidos en la literatura para el PEAD, ya que su valor ( $G=1.31$ ) es mayor al nominal, podemos considerar que este valor experimental empleado en el modelo matemático (Ec. 3-14) es una buena aproximación con base en lo obtenido en las pruebas en el laboratorio.

Por la forma en que se desarrollaron las pruebas de extracción cortante, y dado que el comportamiento de los elementos que conforman el ensamble en este tipo de pruebas, no es del tipo “en paralelo”, no es posible aproximar la ecuación de resistencia a la extracción lateral para madera citada en la literatura para nuestro caso de estudio.

Finalmente, con base en lo establecido en la literatura y lo observado en la experimentación se pueden definir una serie de criterios básicos de diseño que permitirán tener un mejor aprovechamiento de los recursos materiales y económicos dentro de esta industria:

- La variable de mayor relevancia en este caso es la profundidad de penetración, sabiendo que existe una relación directamente proporcional entre la carga máxima de extracción por clavo y la profundidad de penetración.
- Como segundo parámetro de relevancia a controlar es el diámetro del clavo, entendiéndose que al incrementar el diámetro de éste, también se incrementa la resistencia a la extracción.

De acuerdo a lo observado en el punto 5 de las conclusiones, se puede llegar a tener un incremento en la resistencia a la extracción normal de hasta 26% por clavo al emplear calibres 1.28 comparado con un calibre 0.98.

Desde el punto de vista meramente de resistencia a la extracción normal y cortante, la combinación de número de clavos y calibre de clavo que presentó un mejor desempeño a lo largo de las pruebas fue la de 4 clavos calibre 1.28, cuyos registros marcaron la mayor resistencia a la extracción normal y cortante por clavo (124.90 Kg y 171 kg respectivamente).

Las actividades desarrolladas nos permitieron analizar el comportamiento mecánico de la unión de perfiles de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) Reciclado mediante clavos, bajo un número determinado de casos, sometidos a cargas normales y cortantes de extracción, logrando identificar el modelo más resistente dentro de los estudiados, y que sirve de base para un análisis más amplio del comportamiento mecánico de las tarimas de PEAD reciclado detonante de este trabajo.

## 6. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda hacer pruebas empleando probetas con diferentes tipos de elementos de unión, para incrementar el espectro de opciones disponibles para el diseño y manufactura de las Tarimas de Polietileno de Alta Densidad Reciclado.
- Analizar el tema “costo-beneficio” de sustituir el uso de clavos estriados de calibre 0.98 por un calibre mayor (1.28), partiendo de los requerimientos necesarios de resistencia que se desea tener para las Tarimas de PEAD Reciclado.

## 7. BIBLIOGRAFÍA.

Dr. Armando Ortíz Prado, Apuntes de Modelado de Procesos de Manufactura, 2007. FI UNAM.

R.J. Crawford, Plastics Engineerings, Plastics Engineerings, Año, Editorial.

Rangel Nafaile Carlos, Los Materiales de la Civilización, 2006, Editorial Fondo de Cultura Económica, México.

Hein, M., Arena, S., Foundations of College Chemistry, Tenth Ed., 2000 e Introduction to General, Organic and Biochemistry, 7th. Edition. Brooks/Cole. Traducido como Fundamentos de Química, 2001. México, International Thomson Editores, S.A. de C.V.

Colomer Mendoza, Francisco José. Gallardo Izquierdo, Antonio. Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos, 2007, Universidad Politécnica de Valencia, LIMUSA.

Howard J. Ansen, C.E., Diseño Moderno de Estructuras de Madera, Civil Engineering Dept. Illinois Institute of Technology, 1963, Segunda Edición, Compañía Editorial Continental.

Fernández Villegas, Francisco Robles. Echenique-Manrique Ramón, Estructuras de Madera, Primera edición, Editorial LIMUSA S.A. de C.V.

Shigley, Joseph Edward. Mitchell, Larry D. Diseño en Ingeniería Mecánica, 1985, cuarta edición (tercera edición en español), McGraw-Hill.

Jaramillo, J.J. Los clavos: Elementos de unión tan elementales como esenciales. 2005. Revista MM. Edición 48.

Liska, J. A. Problemas Relacionados con el fomento del uso de la madera en la construcción y posibles soluciones. Sección 4, Parte I Aspectos Técnicos. Revista Unasyva. Edición 25.

USDA. 1999. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. General technical report FPL-GTR-133. Madison, Wisconsin, United States.

Referencias consultadas en Internet:

<http://www.bosques-naturales.com>

<http://depa.pquim.unam.mx/qg/Apoyo/guia.PDF>