

**DISEÑO Y FABRICACION DE UNA MAQUINA PARA REALIZAR PRUEBAS  
MECANICAS DE FLEXION A PARTES VEGETALES.**

**CAMILO RESTREPO ZULUAGA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2014**

**DISEÑO Y FABRICACION DE UNA MAQUINA PARA REALIZAR PRUEBAS  
MECANICAS DE FLEXION A PARTES VEGETALES.**

**CAMILO RESTREPO ZULUAGA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**ANDRÉS HERNANDO VALENCIA E.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**MEDELLÍN**

**2014**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Firma

Nombre

Presidente del jurado

---

Firma

Nombre:

Jurado

---

Firma

Nombre:

Jurado

Medellín, \_\_ de \_\_ 2014

En honor a mis padres, que me dieron la  
posibilidad de tener una buena  
formación profesional y personal...

Camilo Restrepo Z.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi compañero Camilo Molina por su ayuda en la fase de fabricación, pruebas del prototipo además por su acompañamiento en la realización del manuscrito.

## TABLA DE CONTENIDO

### Contenido

<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>9</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>10</b>
<b>ALCANCE .....</b>	<b>11</b>
<b>ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO.....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>1 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
1.1 LAS PLANTAS .....	16
1.1.1 Clasificación de los tejidos vegetales .....	21
1.2 RESISTENCIA DE MATERIALES .....	25
1.2.1 Flexión.....	26
<b>2 DISEÑO BASICO .....</b>	<b>28</b>
2.1 REQUERIMIENTOS .....	28
2.2 SUBSISTEMAS .....	29
2.3 FACTORES DE DISEÑO.....	30
2.4 ANÁLISIS DE SELECCIÓN DE SUBSISTEMAS.....	32
2.4.1 Sistema de sujeción .....	32
2.4.2 Sistema de Guiado.....	33
2.4.3 Chasis.....	34
2.4.4 Medición de la deformación.....	35
2.4.5 Sistema de aplicación de carga.....	35
<b>3 DISEÑO DE DETALLE.....</b>	<b>37</b>
<b>4 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN. ....</b>	<b>41</b>
<b>5 VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>43</b>
<b>6 Conclusiones .....</b>	<b>48</b>
<b>7 Futuras Mejoras .....</b>	<b>49</b>
<b>8 Bibliografía .....</b>	<b>52</b>



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Tipos de tejido celular vegetal. ....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2. Matriz de selección para el sistema de Sujeción. ....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 3. Matriz de selección para el sistema de Guiado. ....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 4. Matriz de selección para selección del chasis. ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 5. Matriz de selección para el sistema de medición de la deformación.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 6. Matriz de selección para el sistema de Sujeción. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 7. Propiedades del PVC (MatWeb) .....</b>	<b>43</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Peciolos de plantas dicotiledóneas en corte transversal. ....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2: Corte transversal de tallo similar al de un peciolo. ....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3: Representación de célula procariota. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4: Representación de célula eucariota. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5: Representación esquemática de la pared celular. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 6. Arco en madera fabricado en la antigüedad. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 7. Construcción en guadua. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 8. Viga sometida a flexión. ....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 9. Probeta sometida a flexión a 3 y 4 puntos. ....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 10. Despiece del prototipo. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 11. Explosión del chasis realizado en SolidEdge ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 12. Explosión del prototipo realizado en SolidEdge. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 13. Vista frontal del prototipo realizado en SolidEdge. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 14. Vista en isométrico del prototipo realizada en SolidEdge. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 15. Nivelación de correas de fijación. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 16. Ubicar punto de referencia. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 17. Montaje para realizar las pruebas. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 18. Prototipo para pruebas de flexión. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 19. Grafica ensayos tubo de PVC ....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 20. Palma utilizada para validación. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 21. Grafica de ensayos a peciolo de palma. ....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 22. Rodamientos y carros lineales SKF. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 23. Actuador lineal SKF. ....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 24. Celda de carga. ....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 25. Sensor de desplazamiento laser. ....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 26. Perfiles y tubos livianos en aluminio. ....</b>	<b>51</b>

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Diseñar un dispositivo para la realización de pruebas mecánicas de flexión a partes vegetales tanto en campo abierto como en laboratorio.

### **ESPECÍFICOS**

- Definir el procedimiento más adecuado para el desarrollo de pruebas de flexión a partes de plantas.
- Diseñar los componentes principales del dispositivo.
- Fabricar un prototipo funcional del dispositivo
- Realizar la validación del prototipo
- Proponer futuras mejoras para la optimización del dispositivo.

## **ALCANCE**

Desde la definición de las principales variables involucradas con la caracterización biomecánica estructural de las partes vegetales, se espera construir un prototipo funcional que permita caracterizar el comportamiento mecánico a flexión de estos elementos.

## ORGANIZACIÓN DEL MANUSCRITO

El texto se encuentra dispuesto en capítulos en los cuales se presentarán, inicialmente, los antecedentes y el estado del arte.

Luego en el marco teórico es presentado todo lo relacionado con la manera en la que la función estructural de las plantas puede ser analizada desde los principios de la Ingeniería, dando a conocer los principios por los cuales se evalúan los comportamientos de los materiales, en especial las plantas.

En el capítulo 2 será expuesto el proceso de diseño y construcción del prototipo, iniciando con un diseño básico, en el cual se evalúan las condiciones a las que deben ser sometidos los materiales que se quieren evaluar, las normas disponibles para el tipo de pruebas y los materiales que se quieren evaluar. Esto con el fin de darle un dimensionamiento básico al prototipo.

Luego, en el capítulo 3, se especifica el proceso de construcción del prototipo, materiales utilizados y el proceso de selección de alternativas de subsistemas a utilizar. Además se expondrán los motivos por los cuales fueron utilizados.

En el capítulo 4 se mostrarán los resultados obtenidos de la experimentación con distintos materiales, y la validación de la máquina con un material conocido, con el fin de verificar la confiabilidad de los datos que se obtienen y la repetitividad que tiene el equipo.

Finalmente se presentará una serie de conclusiones del proyecto, además de un manual sobre el uso adecuado del prototipo construido.

## RESUMEN

Debido a que en la Universidad Pontificia Bolivariana no se tiene un equipo adecuado para realizar pruebas de flexión a partes vegetales, se propuso este trabajo de grado con el fin de diseñar y fabricar un prototipo que permita realizar pruebas de flexión a tres y cuatro puntos, para conocer sus propiedades mecánicas y evaluar sus posibles usos como materiales de ingeniería, bien sea de manera directa o como referencia funcional.

Inicialmente se evaluarán los diferentes usos que han tenido las plantas en la evolución de la humanidad y la forma como han sido utilizadas, luego de esto se habla de la estructura interna de las plantas, sus diferentes tipos de tejido y las principales estructuras que los componen. Posteriormente, se realizará una contextualización de los principios básicos de la resistencia de materiales y la teoría requerida para el análisis de pruebas de flexión con el fin de que el prototipo desarrollado se ajuste a los requerimientos especificados. Luego se realizó el diseño y la construcción del prototipo con base en las especificaciones requeridas, en este proceso se ejecutó la selección de subsistemas, materiales y componentes mediante el análisis de matrices de selección que ayuden a implementar la opción más adecuada. Finalmente se realizaron las pruebas de control y validación del prototipo, primero se ensayó un material con propiedades conocidas para validar la repetitividad de los resultados arrojados por el prototipo y luego se realizó una prueba con una parte vegetal para validar el funcionamiento con los materiales objetivo del proyecto, dando como resultado el correcto funcionamiento del equipo.

## INTRODUCCIÓN

La gran biodiversidad de Colombia se ve reflejada en parte en una gran cantidad de especies vegetales cuyas partes tienen características físicas y mecánicas especiales que no han sido exploradas por la ciencia. La exposición a las fuertes y cambiantes condiciones climáticas del País, que además se presentan a lo largo de toda la vida útil de las plantas colombianas y que se representan algunas de ellas en cargas mecánicas, muestra a las especies como interesantes referentes de adaptación funcional.

Una de las principales propiedades que se han reconocido como referenciales en las plantas es la rigidez a flexión. Sin embargo, la medición de esta propiedad representa un reto técnico debido a la alta variabilidad morfológica de las plantas y a la ausencia de protocolos normalizados para los materiales vegetales. Por esta razón, y entendiendo que la información que se pueda obtener de las plantas puede transferirse con éxito al diseño mecánico a partir del modelo biomimético, se propone en este trabajo el diseño de un dispositivo que permita caracterizar la rigidez a flexión de partes vegetales.

El diseño propuesto se basa en el criterio de portabilidad, en la medida en que es ideal hacer las pruebas en campo de manera que se reduzca al máximo el tiempo que transcurre entre el corte de la parte vegetal y su caracterización. Además, se propone un sistema versátil que se adapte fácilmente a la variabilidad formal de las partes vegetales. La aproximación formal y material obtenida, si bien requiere de mejoramiento, permite la medición analógica de las cargas y las deflexiones que éstas generan en las partes vegetales con un nivel de precisión razonable para el tiempo y los recursos invertidos.

El desarrollo de dispositivos de pruebas mecánicas para plantas representa una oportunidad científica importante para el País ya que se evidencia una carencia importante de este tipo de sistemas no solo en Colombia, sino también en Suramérica.

## 1 MARCO TEÓRICO

A lo largo de la historia de la humanidad, la naturaleza creativa del hombre desde sus inicios como *homo-sapiens* se ha inspirado en las formas y funciones de la naturaleza para adaptarse y manufacturar herramientas que permiten mejorar la calidad de vida y la interacción con el ambiente. Es así por ejemplo, como el intento de desplazarse en el viento simulando las aves, o sumergirse en las profundidades del océano como los peces son claros ejemplos de acciones de la naturaleza que impulsaron la creatividad del ser humano.

Además, la identificación de materiales que simulen funcionalmente a aquellos presentes en los órganos y otras partes de los sistemas biológicos ha sido y será uno de los principales retos para sortear en el diseño de equipos inspirados en estos, ya que desarrollar o encontrar materiales que permitan simular las funciones para las cuales se requieren determinados elementos, demandan un exhaustivo trabajo de tanteo y desarrollo para identificar el elemento correcto y que cumpla al 100% los retos planteados.

A medida que la civilización avanzó, desarrolló nuevos métodos para que estos procesos de identificación de materiales fueran más cortos y precisos mediante la implementación de ensayos estandarizados, y en este sentido las plantas no han sido desconocidas a este tipo de desarrollos, ya que han brindado grandes aportes a la medicina, infraestructura y cuantos usos el hombre le ha definido, gracias a su gran diversidad de especies y su localización a lo largo y ancho de todo el planeta, inclusive dentro del mismo océano.

En la actualidad hay una gran cantidad de usos que tienen las plantas de manera funcional, una de ellas, y la que toma este trabajo como referencia, es utilizar los sistemas estructurales de la plantas como referencia para la creación de estructuras artificiales con desempeños funcionales más eficientes. Para esto, es necesario en primera instancia conocer con precisión las propiedades mecánicas que tienen las partes vegetales identificando las propiedades mecánicas más relevantes en la implementación de nuevas alternativas en un prototipo o diseño.

Desde el principio de los tiempos las plantas han sido utilizadas para solucionar algunas de las necesidades básicas que han tenido los seres humanos. Estas se han usado de manera directa, tomando partes de las plantas como elementos funcionales, como cuando se empleaba la madera para brindar refugio y fuego, además se han usado como referenciación funcional, material o formal, sin utilizar como tal una parte de la planta, sino el principio funcional que la riges, como el uso de celdas fotovoltaicas, inspiradas en la forma como las plantas obtienen la energía del sol para poder subsistir.

Es por esto que surge la iniciativa de bio-referenciar las propiedades físicas y mecánicas de las plantas; comprendiéndolas con el fin de determinar los rangos de aplicación como referentes para el diseño de estructuras para diferentes necesidades. Para esto, se determinó un procedimiento básico y un dispositivo de ensayos que se describirán con una mayor profundidad a lo largo de este trabajo. Para una mayor comprensión del problema mecánico que se tiene al diseñar un dispositivo que trabaje con partes vegetales, se hace necesario describir las bases biológicas y técnicas que regulan el funcionamiento mecánico de las plantas.

## **1.1 LAS PLANTAS**

Las plantas son seres vivos denominados fotosintéticos, compuestos principalmente por celulosa sin capacidad locomotora, existentes en millones de especies que habitan cada uno de los diferentes hábitats de la tierra, además de ser primordiales para la vida en el planeta; ya que son las proveedoras de oxígeno además de ser el alimento de muchos animales incluyendo una parte fundamental de la dieta humana (Curtis, 2008).

Para realizar un acercamiento válido sobre la planta como una estructura útil en la vida cotidiana, se debe entender cada una de las partes que la componen y así conocer la influencia de cada componente de la planta en la resistencia final de la estructura.

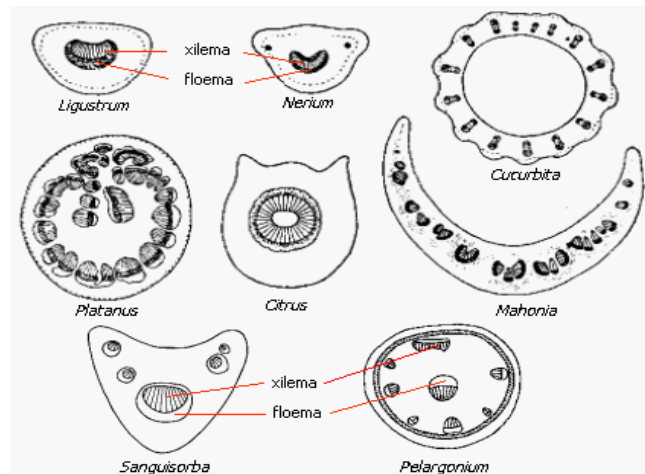


Todas las plantas están compuestas de microestructuras las cuales aportan diferentes componentes que en una sola estructura brindan rigidez, aislamiento, comunicación entre otras a cada una de las partes de la planta.

Las plantas generalmente están compuestas por 4 grandes partes:

- Raíces
- Tallo
- Follaje
- Frutos y flores

El follaje es el principal objeto de estudio en este proyecto; éste está compuesto por las hojas y los peciolo, los cuales son los encargados de unir las hojas con los tallos, además de ser el objeto de estudio de este trabajo debido a la variedad de formas y estructuras que tienen como se puede ver en la Figura 1.

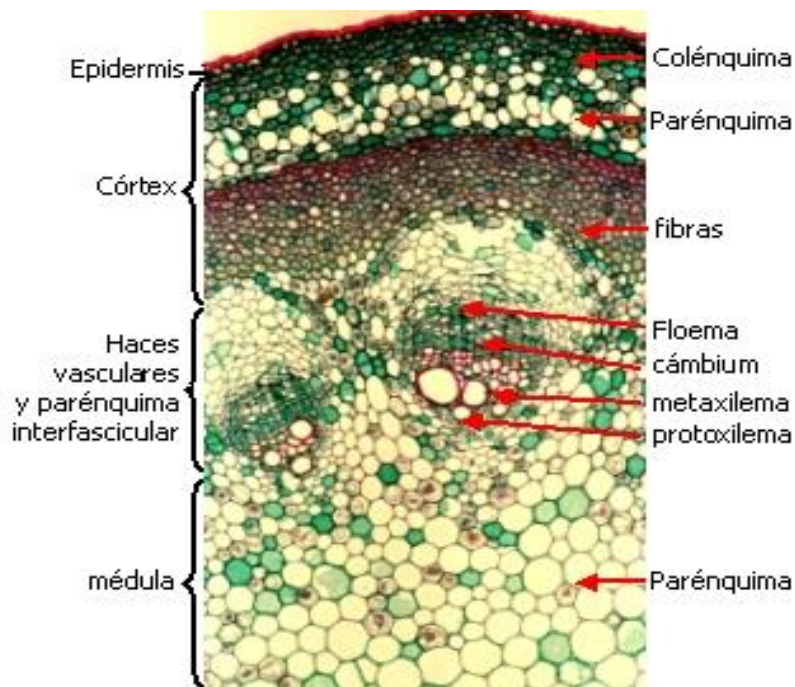


**Figura 1: Peciolo de plantas dicotiledóneas en corte transversal.**

Fuente: <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema21/21-1HDicot.htm> (Consultado. 14 de Abril de 2013)

Cada uno de estos componentes brindan características especiales a cada planta, y según su constitución (dependen de ubicación geográfica, tamaño, clima, etc.) conforman estructuras muy aprovechables por el hombre para diferentes necesidades, las cuales se han mencionado en la introducción de este proyecto, pero que se podrán caracterizar mediante la máquina diseñada y sustentada en la presente tesis.

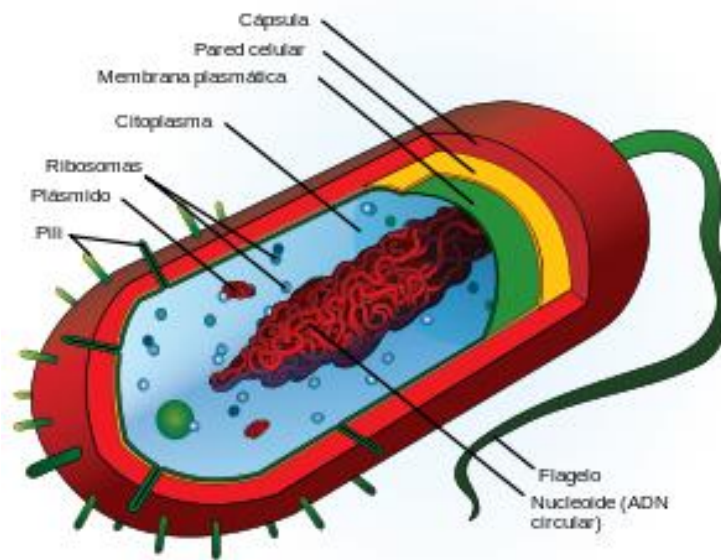
En la figura 2 se puede observar un tallo en corte transversal en el que se identifican algunas de las principales estructuras. Cabe resaltar que la estructura del tallo es muy similar en su constitución a la que presentan los peciolo, los cuales como ya se ha mencionado serán analizados mediante la utilización de la máquina diseñada.



**Figura 2: Corte transversal de tallo similar al de un peciolo.**

Fuente: <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema17/17-3tallo.htm> (Consultado. 14 de Abril de 2013)

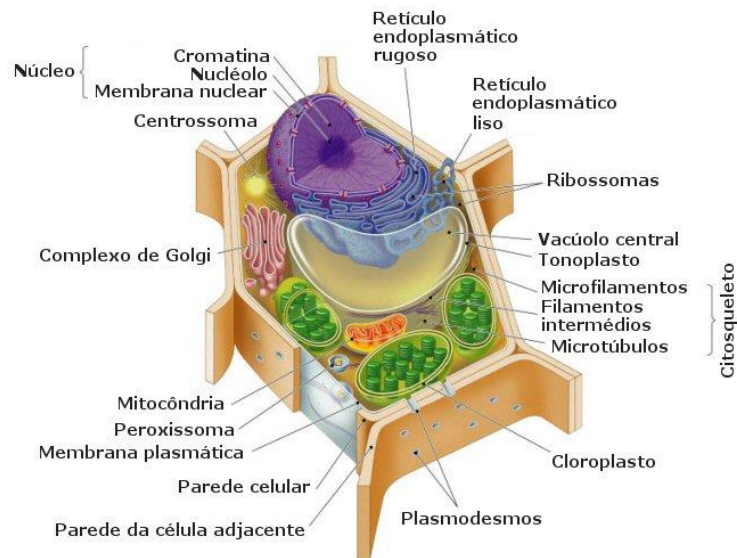
La célula vegetal, es la unidad modular que compone todas las estructuras de las plantas y es la unidad encargada de sintetizar el alimento por medio de la fotosíntesis, además de poseer la capacidad de reproducirse por sí misma, almacenar nutrientes y darle el color a la planta. Existen dos tipos de células: células eucariotas y células procariotas. Las células procariotas son células sin un núcleo definido, por lo que el material genético normalmente contenido en el núcleo de la célula se encuentra esparcido por el citoplasma (ver figura 3).



**Figura 3: Representación de célula procariota.**

**Fuente:** [http://es.wikipedia.org/wiki/Célula\\_procariota](http://es.wikipedia.org/wiki/Célula_procariota) (Consultado. 14 de Abril de 2013)

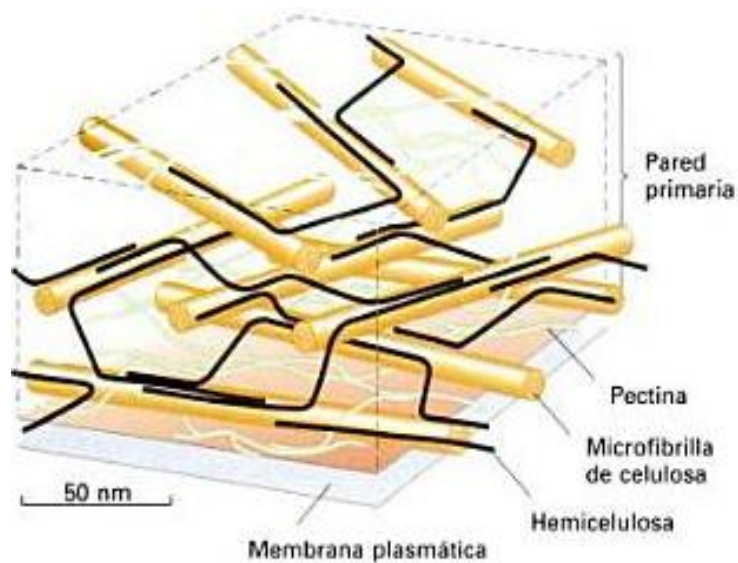
Las Células eucariotas (ver figura 4) son aquellas que poseen un núcleo definido en su interior, dentro del cual se encuentra almacenado el material genético de la célula.



**Figura 4: Representación de célula eucariota.**

**Fuente:** <http://lcelula2010.galeon.com/enlaces/celeuc.html> (Consultado. 14 de Abril de 2013)

Las paredes celulares se componen básicamente de tres elementos: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa se hace presente en forma de microfibrillas que refuerzan mecánicamente una matriz de hemicelulosa y lignina. Las microfibrillas son celdas poliméricas largas, tubulares, se componen de celulosa y están cubiertas por una monocapa de hemicelulosa. En el material vegetal, estas microfibrillas están inmersas dentro de una matriz de lignina que las une actuando como cemento vegetal (Askeland, 2004)(Figura 5). La manera como se organicen en el espacio las células vegetales y las variaciones de ellas mismas en su configuración básica, originan lo que se conoce como tejidos vegetales.



**Figura 5: Representación esquemática de la pared celular.**

**Fuente:** (Harvey, 2006)

### 1.1.1 Tejidos vegetales

Los tejidos son conjuntos de células similares organizadas en una sola unidad estructural, los cuales pueden ser simples, un solo tipo de células, o compuesto, conformado por varios tipos de células diferentes.

Los principales tejidos de las plantas se subdividen en 3 grandes grupos; meristemas, sistema fundamental (parénquima, colénquima y esclerénquima) y sistema epidérmico. Los cuales se detallan en la Tabla 1.

Tejido	Función	Tipo de célula	Características
Meristema	Encargados del crecimiento de la planta por división celular	Ce­llas meristemáticas	Tiene células pequeñas con paredes celulares muy finas y vacuolas abundantes.
Parénquima	Encargado de los procesos metabólicos de la planta: realiza los procesos de respiración, fotosíntesis y almacenamiento de nutrientes	Células parenquimáticas	Células vivas, de pared celular delgada que permite una rápida división celular.
Colénquima	Es un tejido que sostiene los órganos internos de las plantas y ayuda a dar flexibilidad a tallos jóvenes, peciolo­s y nervios de las hojas.	Colénquima angular, tangencial, lagunar y masivo.	Células alargadas, con alto contenido de agua y pared celular gruesa.
Esclerénquima	Tejido que sostiene la planta, le da rigidez y protección a la planta ya que le da resistencia y dureza.	Fibras y traquéidas	Células muertas en su madurez, con pared celular dura y resistente.
Epidermis	Tejido encargado de proteger las partes internas de las plantas, además ayuda al sostenimiento de la planta por su rigidez.	Células epidérmica	Sus células están recubiertas por una cutícula formada por cutina, microfibrillas de polisacáridos y ceras

**Tabla 1. Tipos de tejido celular vegetal.**

Actualmente muchas especies de plantas son utilizadas como materiales estructurales, sometidas a diferentes esfuerzos y medios de interacción, especialmente en países como Colombia donde la gran diversidad de estas especies, el bajo costo y las excelentes propiedades brindadas por estas soluciones vegetales son las principales razones para ser empleadas. Un claro ejemplo de la utilización de elementos naturales (específicamente peciolo­s y tallos) que desde la antigüedad ha utilizado el hombre, son los arcos utilizados por los aborígenes indígenas de diferentes latitudes del mundo. Estos elementos utilizados para defenderse y conseguir alimentos, se fundamentan en el módulo elástico de estos materiales para impulsar un artefacto (flecha) que viaja a gran velocidad debido a dicho impulso para impactar un blanco seleccionado (Figura 6).



**Figura 6.** Arco en madera fabricado en la antigüedad.

**Fuente:** [http://www.todoespadas.com/images/TraditionelleEventesArcos/ono\\_0101.jpg](http://www.todoespadas.com/images/TraditionelleEventesArcos/ono_0101.jpg)  
(Consultado. 10 de Marzo de 2014)

De igual manera las partes vegetales han sido utilizadas para fabricar viviendas, tanto parcial como totalmente, usando troncos rectos para formar las estructuras y fibras naturales para realizar los amarres de estas (Figura 7).



**Figura 7.** Construcción en guadua.

**Fuente:** <http://www.arqhys.com/contenidos/fotos/contenidos/Futuro-de-la-arquitectura-de-bamb%C3%BA...jpg>  
(Consultado. 10 de Marzo de 2014)

Para llegar a este nivel de confiabilidad en la construcción de una casa con materiales naturales, fue necesario realizar una caracterización a fondo; esta caracterización solo puede ser lograda mediante el análisis de los resultados obtenidos a través de máquinas como la diseñada para este proyecto.

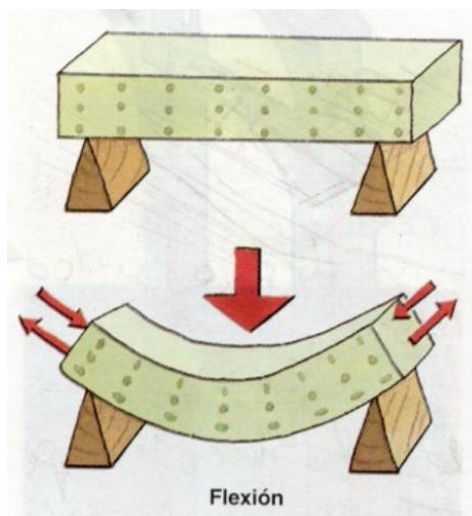


## 1.2 RESISTENCIA DE MATERIALES

Con el fin de profundizar en la mecánica de materiales, se darán a conocer las propiedades que afectan en cierta manera la resistencia que pueda tener un elemento a un esfuerzo al que se vea sometido.

De acuerdo a la forma con la cual se efectúe dicho esfuerzo el elemento puede ser visto como un eje, en caso de ser un esfuerzo torsional, una columna, en caso de estar sometido a cargas de compresión y como una viga si está sometido a esfuerzos flectores. En este caso únicamente se evaluarán las condiciones de los elementos sometidos a esfuerzos flectores, es decir comportamiento como una viga.

Una viga sometida a flexión es un elemento el cual la mitad de su sección transversal está sometida a tensión y la otra mitad de la sección transversal se encuentra sometida a compresión, así como se ve en la figura 7.



**Figura 8. Viga sometida a flexión.**

**Fuente:** [http://html.rincondelvago.com/materiales-de-construccion\\_28.html](http://html.rincondelvago.com/materiales-de-construccion_28.html) (Consultado. 03 de Marzo de 2014)

Un mismo elemento puede tener diferentes resistencias de acuerdo a la forma como se le aplica la carga, además de la geometría del elemento, para este caso se requiere evaluar el módulo de Young y el primer momento de área para la sección transversal del elemento.

Se denomina módulo de Young a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria cuando el esfuerzo es una tensión o una compresión. (Martínez, 1997)

El segundo momento de área  $I$  comúnmente es usado para realizar los cálculos de deformaciones de los materiales sometidos a flexión y depende básicamente de la sección transversal del elemento que se va a evaluar, éste en su forma general está dado por:

$$I = \iint r^2 dA$$

**Ecuación 1. Ecuación general 2° momento de inercia.** (Martinez, 2004)

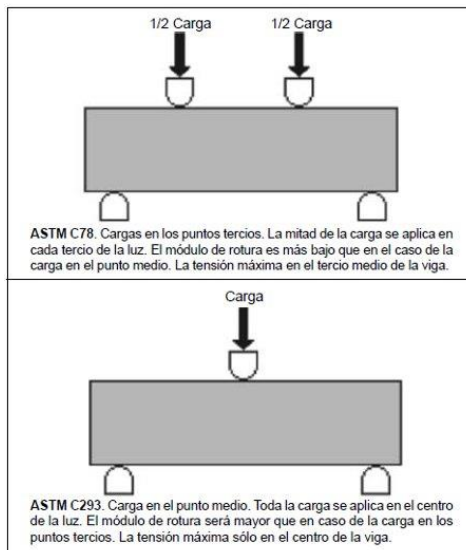
Dónde:

- $I$  es el segundo momento de inercia alrededor del eje escogido.
- $dA$ , es el diferencial de área.
- $r$ , es la mínima distancia del elemento  $dA$  al eje escogido.

### 1.2.1 Flexión.

Las pruebas de flexión son utilizadas para conocer la resistencia que tiene un material, con área transversal definida, a ser “doblado” o flexionado. Estas cargas pueden ser aplicadas en 2 apoyos (Cantiléver), 3 apoyos o 4 apoyos.

El prototipo que se pretende diseñar debe permitir realizar pruebas a 3 y 4 puntos (Figura 9.) aplicando la carga en los apoyos superiores y externos, esto para imitar al máximo la acción del peso de las hojas sobre el peciolo cuando estas están en calma, además la acción del viento en condiciones de tormenta. (Ennos, 2000)



**Figura 9. Probeta sometida a flexión a 3 y 4 puntos**

Fuente: <http://civilgeeks.com/2011/03/18/resistencia-a-la-flexion-del-concreto/>

La ecuación 2 permite conocer el módulo de rigidez a flexión de un elemento, y será la ecuación que regirá las pruebas realizadas en el prototipo diseñado. (Young, 2011)

$$EI = \frac{F}{y} \times \frac{l^2 \times c}{8}$$

**Ecuación 2. Ecuación Modulo de flexión en 4 puntos.** (Ennos, 2000)

Donde  $F$  es la carga aplicada en cada uno de los puntos de carga externa,  $y$  es el movimiento hacia arriba en el punto central, y por lo tanto  $F/y$  es la pendiente inicial de la curva fuerza / desplazamiento.  $L$  es la distancia entre las barras de central y los puntos de carga externa y  $c$  es la distancia entre las dos barras de central.

## 2 DISEÑO BASICO

El diseño básico de un elemento de máquina o de una máquina en general, es la parte en la cual se comienzan a evaluar las características principales de los elementos requeridos, así como los posibles materiales, formas y dimensiones que esta va a tener.

Para la selección de materiales, formas y dimensiones se realizó una matriz de factibilidad, en la cual se evaluaron las diferentes opciones que se plantearon para cada uno de los subsistemas, evaluando ciertas características cada una con un valor específico según los requerimientos del prototipo.

### 2.1 REQUERIMIENTOS

El prototipo a diseñar debe contar con unos requerimientos mínimos, tanto de fabricación, materiales a utilizar y practicidad de uso, los cuales son:

- Capacidad de ser operado en zonas donde no se tengan acometidas eléctricas, hidráulicas y/o neumáticas.
- Debe ser fácil de transportar, maniobrable.
- Uso de materiales que no se deformen ante las cargas que en este serán evaluadas, para evitar errores a la hora de la toma de datos.
- Uso de materiales que no afecten la estructura física de las probetas.
- Tener en cuenta la precisión y exactitud tanto de las cargas aplicadas como de los valores de deformaciones obtenidos bajo esas cargas.
- Evitar la fricción entre las partes móviles y las fijas para mitigar al máximo errores en las pruebas por fricción y por desalineación.

## 2.2 SUBSISTEMAS

Los subsistemas para el prototipo, serán seleccionados de acuerdo a las condiciones en las cuales se realizarán las pruebas.

Las pruebas se deben realizar tanto en laboratorio como en campo, por tal motivo el sistema debe ser completamente portable, los sistemas deben poder ser utilizados sin fuentes de energía que en campo no se encuentran. Los materiales con lo que se fabrique el prototipo deben ser livianos y resistentes, además debe ser un sistema con mecanismos de ensamble confiables que no pierdan su estabilidad ni en los momentos de transporte ni en los momentos de ensayo.

Los subsistemas del prototipo para pruebas de flexión son:

- Sistema de sujeción:

Sistema en el cual se apoyarán los elementos a flexionar. Éste debe poder ser utilizado en pruebas de 3 y 4 puntos, además permitir modificaciones en las distancias entre los apoyos. Lo más importante del sistema de sujeción es lograr que no afecte la prueba, ya que una sujeción dura puede ocasionar indentaciones en los materiales evaluados y afectar los resultados finales de la prueba.

- Sistema de guiado:

El sistema de guiado es de gran ayuda al momento de realizar la prueba, ya que si se tiene una elevada fricción los datos de la carga aplicada no serán válidos. Este debe ser económico y que no se vea afectado por la humedad que puede estar presente en las zonas donde se realizaran las pruebas.

- Chasis:

Este subsistema se encarga de soportar todo el mecanismo de prueba, así como la carga que se aplicará en la prueba y los elementos a ensayar. Por esto, este debe ser fuerte y resistente para evitar que se deforme al realizar las pruebas, además de ser liviano y fácil de maquinar.

- Medición:

Lo que se busca en el ensayo es conocer la deformación del elemento ensayado al ser sometido a una carga específica, por ende el sistema de medición de esta variable es de suma importancia, además por las pequeñas deformaciones que presentan los elementos a ensayar. Para esto se requiere un método de medición de deformaciones con una resolución mínima de 0,05mm

- Aplicación de la carga:

Para la aplicación de la carga se requiere un sistema que sea fácilmente utilizable en campo, además que sea preciso y con la posibilidad de hacer pequeñas modificaciones a la carga que se aplica.

## **2.3 FACTORES DE DISEÑO.**

- Sistema de sujeción:

- No debe afectar la forma del material ensayado
- Debe permitir modificaciones en las distancias entre los apoyos
- Se debe permitir cambios para flexión a 3 y 4 puntos

- Sistema de guiado:
  - Reducir la fricción entre las partes móviles y el chasis.
  - Permitir el libre desplazamiento del carro móvil
  - Tener la longitud necesaria para permitir el recorrido completo del carro móvil al momento de realizar las pruebas.
  
- Chasis:
  - Fabricación rápida y ágil.
  - Resistir las cargas a las que se expone durante las pruebas sin deformarse.
  - Ser liviana para su transporte.
  
- Medición:
  - Capacidad de medir deformaciones lineales con una precisión menor a 0,05 mm.
  - Equipo que evite al máximo errores de lectura y paralaje.
  - Equipo que tenga una escala que tenga un incremento mínimo de 0,02 mm.
  
- Aplicación de la carga:
  - Aplicación de carga variable.
  - Sistema que no requiera de grandes montajes a la hora de realizar trabajos en campo.
  - Portabilidad del sistema a ser usado en campo.

## 2.4 ANÁLISIS DE SELECCIÓN DE SUBSISTEMAS

### 2.4.1 Sistema de sujeción

- Opciones:
  - Ejes en aluminio.
  - Soportes en caucho.
  - Riatas no flexibles
- Factores de selección:
  - Afecta a la probeta, generando indentaciones en la superficie de la misma.
  - El sistema permite realizar cambios en la configuración de los apoyos de forma fácil y rápida.
  - Permite realizar cambios en la prueba, bien sea para realizarla a 3 o 4 puntos.
  - Precio del sistema.
- Matriz de selección

**Tabla 2. Matriz de selección para el sistema de Sujeción.**

Sistema de Sujeción					
	Afecta la Probeta	Permite modificaciones	Pruebas a 3 y 4 puntos	Precio	Total
Opciones	40%	20%	20%	20%	100%
Ejes en aluminio	1	3	4	2	2,20
Soporte en caucho	2	3	4	3	2,80
Riata no flexible	5	4	4	4	4,40

Nota. 5: Excelente, 4: Bueno, 3: Aceptable, 2: Regular, 1: Malo



## 2.4.2 Sistema de Guiado

- Opciones:
  - Rodamientos lineales.
  - Cavidad en el chasis.
  - Sistema de guía de cortadora de baldosa.
  
- Factores de selección:
  - Reducción en la fricción del sistema.
  - Permite o no un libre desplazamiento del carro móvil frente al chasis.
  - Longitud del sistema de guido, permite el desplazamiento del carro móvil la longitud requerida por el ensayo.
  - Precio del sistema.
  
- Matriz de selección:

**Tabla 3. Matriz de selección para el sistema de Guiado.**

Sistema de Guiado					
	Reducción de fricción	Desplazamiento libre	Longitud	Precio	Total
Opciones	20%	20%	20%	40%	100%
Rodamiento lineal	5	4	3	1	3,60
Cavidad en la carcasa	1	1	5	5	2,60
Cortadora de baldosa	4	4	3	4	3,80

Nota. 5: Excelente, 4: Bueno, 3: Aceptable, 2: Regular, 1: Malo

### 2.4.3 Chasis

- Opciones:
  - Acero
  - Aluminio
  - Madera
  - Plástico
  
- Factores de selección:
  - Peso final del prototipo, portabilidad.
  - Facilidad en la fabricación.
  - Resistencia requerida por el prototipo para evitar deformaciones durante la prueba.
  - Precio de fabricación.
  
- Matriz de selección:

**Tabla 4. Matriz de selección para selección del chasis.**

Chasis					
	Peso	Fabricación	Resistencia	Precio	Total
Opciones	25%	20%	35%	20%	100%
Acero	1	2	5	1	2,00
Aluminio	3	2	5	1	2,80
Madera	3	5	4	4	3,80
Plástico	4	1	4	1	2,80

Nota. 5: Excelente, 4: Bueno, 3: Aceptable, 2: Regular, 1: Malo

#### 2.4.4 Medición de la deformación.

- Opciones:
  - Comparador de caratula
  - Regla
  - Sensor laser
- Factores de selección:
  - Precisión a la hora de realizar la medición.
  - Facilidad en la lectura
  - Escala adecuada para la exactitud requerida por la prueba.
  - Precio del sistema.
- Matriz de selección:

**Tabla 5. Matriz de selección para el sistema de medición de la deformación.**

Sistema de Medición					
	Precisión de la medición	Fácil lectura	Escala apropiada	Precio	Total
Opciones	40%	20%	20%	20%	100%
Comparador de caratula	5	5	5	4	4,80
Regla	3	1	1	5	2,60
Sensor laser	5	5	5	1	4,20

#### 2.4.5 Sistema de aplicación de carga

- Opciones:
  - Sistema de pesas calibradas.
  - Aplicación de carga por medio de agua en un recipiente de volumen conocido.
  - Sistema de pistón neumático con tanque de aire comprimido.

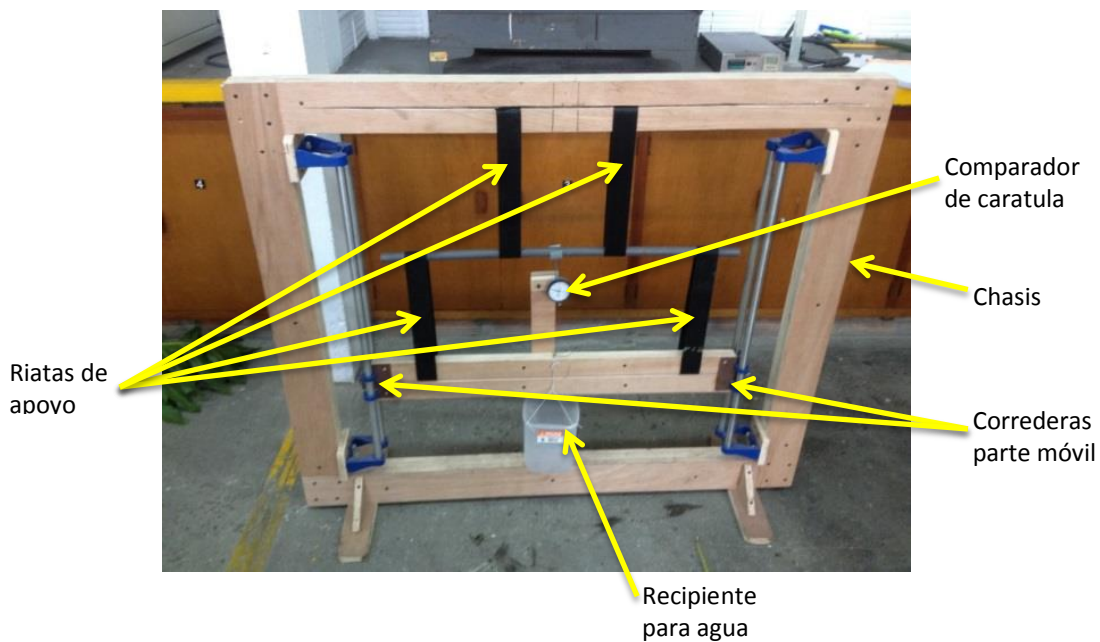
- Factores de selección:
  - Capacidad de modificar la carga de acuerdo a la necesidad.
  - Facilidad al momento de ser transportado.
  - Posibilidad de unas en campo.
  - Precio del sistema.
  
- Matriz de selección

**Tabla 6. Matriz de selección para el sistema de Sujeción.**

Aplicación de la carga					
	Carga variable	Fácil transporte	Uso en campo	Precio	Total
Opciones	40%	20%	20%	20%	100%
Sistema de pesas	5	2	5	4	4,20
Tanque con agua	5	4	5	5	4,80
Pistón neumático	5	3	2	1	3,20

### 3 DISEÑO DE DETALLE

El prototipo está compuesto por un chasis que será construido en madera, que se encarga de sostener un sistema de guiado para la parte móvil del prototipo, en el chasis, el cual tiene una ranura en la parte superior, van dos de los soportes para la probeta (Riata), en la parte móvil del prototipo van los otros dos soportes además del recipiente donde se adiciona el agua para así cargar el elemento que se está ensayando y el sistema de medición de las deformaciones. (Figura 10)

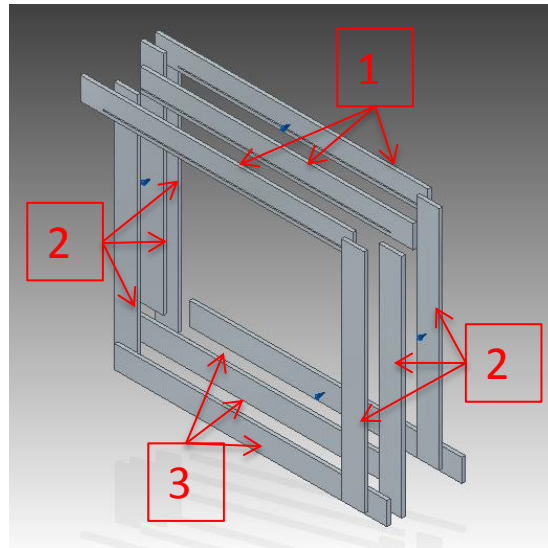


**Figura 10. Despiece del prototipo.**

Ya conociendo la selección de materiales a utilizar en los subsistemas que componen el prototipo y su función, se profundizará un poco más en el proceso de construcción llevado a cabo.

Inicialmente se cortaron secciones de madera Triplex de 100cm X 10cm (Figura 11, partes #2), de 120cm X 10cm (Figura 10, partes #3) y de 120cm X 10cm con una ranura (Figura 10, partes #1) con los cuales se conformó el chasis, este es la base y soporte de todo el prototipo, se soportó en 2 tablas de Triplex colocadas en la parte inferior y soportadas de la

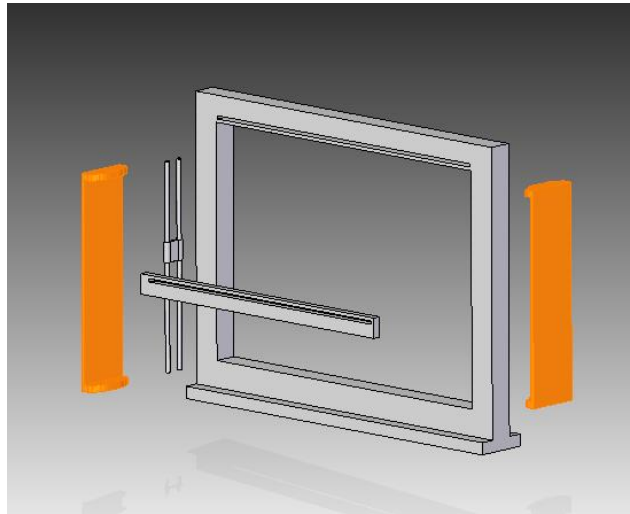
estructura con 2 pie de amigos cada una en madera para darle más estabilidad al prototipo y evitar inconvenientes a la hora de aplicar la carga.



**Figura 11. Explosión del chasis realizado en SolidEdge**

En el interior de este marco se ensamblaron los sistemas de guiado, los cuales como se conoció anteriormente son los rieles utilizados en las cortadoras de baldosa, permitiendo el correcto deslizamiento del carro móvil en el soporte. Estos fueron anclados con tornillos de 3/8".

En la parte móvil de la cortadora de baldosa se sujetó una sección de Triplex de 930mm X 10mm para ser el carro móvil del sistema, este se acoplo por medio de unas platinas que fueran sujetadas por medio de remaches. En este carro móvil al igual que en la parte superior se realizó una ranura de unos 5mm a todo el largo, con el fin de introducir en ellas la riata, la cual es el elemento de sujeción para las probetas a ensayar, esto permite evaluar elementos de diferentes tamaños, además de modificar la distancia entre los puntos de aplicación a lo que el usuario requiera en su prueba.

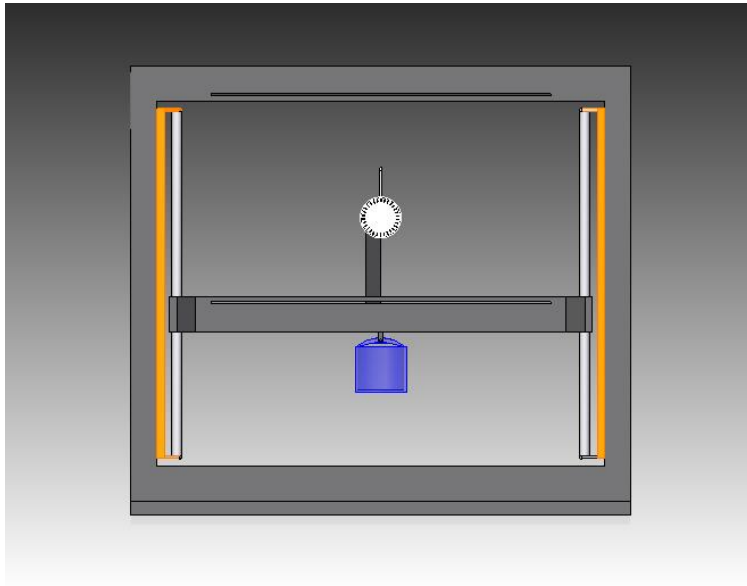


**Figura 12. Explosión del prototipo realizado en SolidEdge**

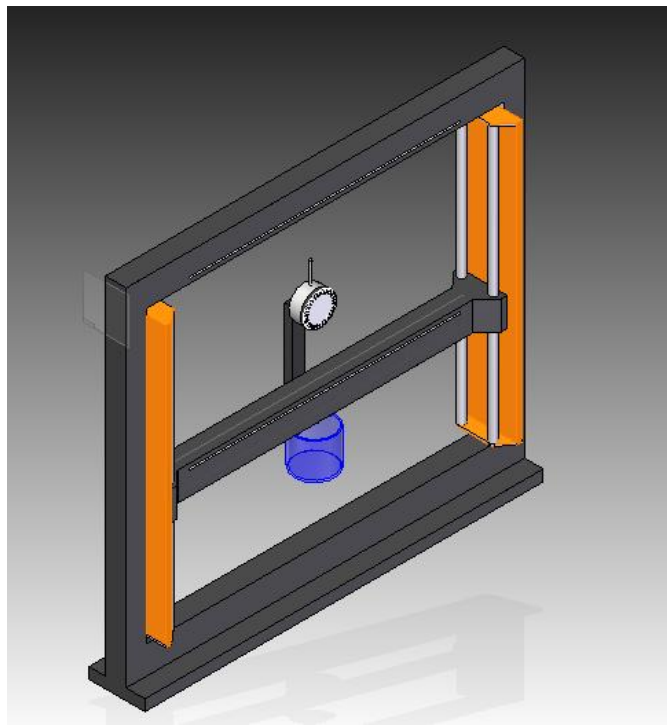
El uso de la riata como sistema de sujeción permite que el elemento a evaluar no se deforme ante la carga mediante un objeto de mayor dureza, esto debido a que los elementos a evaluar serán partes vegetales, esta riata fue unida por medio de fibra trenzada de gran resistencia, con el fin de evitar su rompimiento y/o deformación durante la prueba.

El sistema de carga, el cual será un recipiente plástico para almacenar agua, fue sujetado por medio de un cáncamo al carro móvil del sistema, este se ubicó en todo el centro, evitando que el carro se ladee o genere cargas dispares en la sujeción de las probetas. La carga del sistema se realiza por medio de una probeta plástica graduada, para lograr introducir agua en el recipiente de manera controlada y con volúmenes específicos, variables y pequeños, para así hacer cambios en la deformación de la probeta muy pequeños y obtener una curva de deformación vs carga más precisa y fiable.

La forma de medir la deformación de la probeta fue un comparador de caratula de dial, el cual permite tener deformaciones de 0,01mm, este se sujetó del carro móvil con un soporte en Triplex, y fue ubicado de tal forma que coincidiera con la parte media de la probeta, punto en el cual se tendrá la deformación real. En la punta del comparador de caratula se adaptó un soporte cóncavo, el cual puede adaptarse a las diferentes formas de las probetas, ya que al ser vegetales presentan superficies irregulares, y comúnmente “cilíndricas”.



**Figura 13. Vista frontal del prototipo realizado en SolidEdge**



**Figura 14. Vista en isométrico del prototipo realizada en SolidEdge**



#### 4 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN.

Para la realización de las pruebas de flexión con el prototipo diseñado se deben seguir una serie de pasos para garantizar la exactitud y precisión de las pruebas. Estos pasos se enumeraran a continuación con el fin de ilustrar correctamente la prueba.

- Inicialmente se debe realizar el corte del peciolo de la planta ayudado de un bisturí con muy buen filo, esto con el fin de tener un corte limpio y evitar realizar esfuerzos en el peciolo que puedan afectar las pruebas.
- El peciolo recién cortado debe ser puesto en un recipiente con suficiente agua con el fin de mantener la humedad del peciolo.
- El equipo debe ser configurado de acuerdo a la prueba que se quiere realizar, bien sea pruebas de flexión a tres o cuatro puntos.
- Siempre se debe verificar que los tornillos se encuentren muy bien ajustados para evitar que cualquier elemento se mueva durante la prueba.
- Al momento de montar el peciolo al prototipo se debe verificar que el largo del peciolo no interfiera con el movimiento de la máquina (Largo máximo 900mm), además se debe asegurar la perpendicularidad entre las correas de fijación y el peciolo, este procedimiento se realiza por medio de un nivel como se muestra en la figura 15.



**Figura 15. Nivelación de correas de fijación.**

- Luego de montar el peciolo se debe verificar nuevamente las distancias entre las correas de fijación a nivel del peciolo garantizando dichas medidas.
- Cuando el peciolo se encuentre sin carga se debe ubicar el comparador de caratula en el centro del peciolo; verificar que la aguja del comparador de caratula este indicando una deformación cero para hacer este el punto de referencia Figura 16.



**Figura 16. Ubicar punto de referencia.**

- Luego de realizar estos procedimientos el elemento se encuentra dispuesto para realizar las pruebas Figura 17.



**Figura 17. Montaje para realizar las pruebas.**

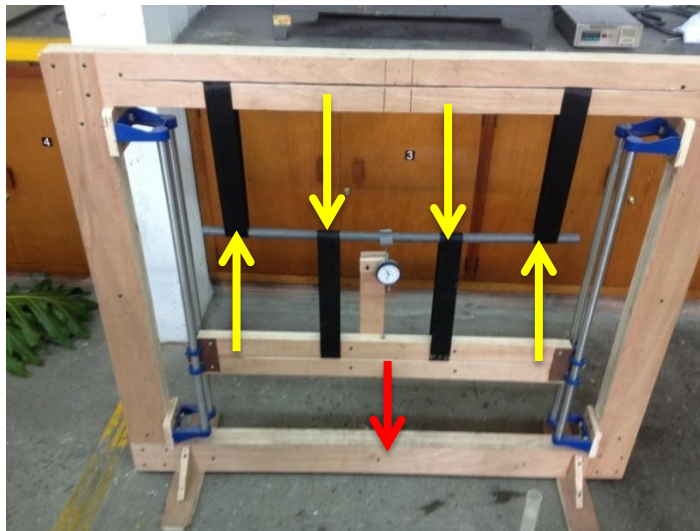
## 5 VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

Para la realización de las pruebas y con el fin de validar el prototipo, se utilizó un material con características y propiedades mecánicas conocidas, para lo cual se utilizó tubería de PVC de ½", cuyas propiedades mecánicas teóricas son las siguientes:

Mechanical Properties	Metric	English
Modulus of Elasticity	1.80 - 2.20 GPa	261 - 319 ksi
Flexural Modulus	1.52 - 2.40 GPa	220 - 348 ksi
Flexural Yield Strength	17.2 - 68.9 MPa	2490 - 10000 psi

**Tabla 7. Propiedades del PVC (MatWeb)**

En la siguiente imagen se muestra la configuración de las cargas al momento de realizar las pruebas.



**Figura 18. Prototipo para pruebas de flexión.**

Con base en que la carga se aplica en el centro de la riata, se ubicaran las riatas de la siguiente manera:

Los soportes externos están a 7,5 cm de los extremos del tubo, los soportes intermedios estas ubicados a 20 cm de los soportes externos y la separación entre los soportes internos (c) es de 10 cm, con eso se obtiene una separación entre los soportes externos (l) de 50 cm.

La aplicación de la carga de se realizó con una rata de aumento 100gr los cuales fueron controlados por medio de volumen de agua, estos fueron agregados hasta obtener 2000 gr, luego se agregó una carga total de 3000 g y una final de 4000 g para darle un mayor rango a la prueba.

Los resultados de la deformación obtenidos experimentalmente fueron comparados con los resultados teóricos obtenidos de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E \times I = \frac{F}{y} \times \frac{L^2 \times C}{8}$$

Dónde:

- E=Modulo de Flexión del material
- I = Inercia de la probeta
- F= Carga aplicada
- Y = Deformación
- L= Separación entre los apoyos externos
- C= Separación entre los apoyos internos

De esta ecuación se despeja la deformación obteniendo

$$y = \frac{F \times L^2 \times C}{E \times I \times 8}$$

Para conseguir la deformación se requiere conocer la inercia la cual se puede obtener de acuerdo a la ecuación de la inercia para cilindros huecos la cual es la siguiente:

$$I = \frac{\pi}{4} \times (R^4 - r^4)$$

Donde

- R = Radio externo del cilindro
- r = Radio interno del cilindro

Para el módulo de flexión se evalúa la prueba con el módulo encontrado en la ficha técnica del material (Tabla 7)

La Figura 18 muestra el comportamiento de los datos obtenidos tanto desde la prueba experimental como desde el cálculo teórico.

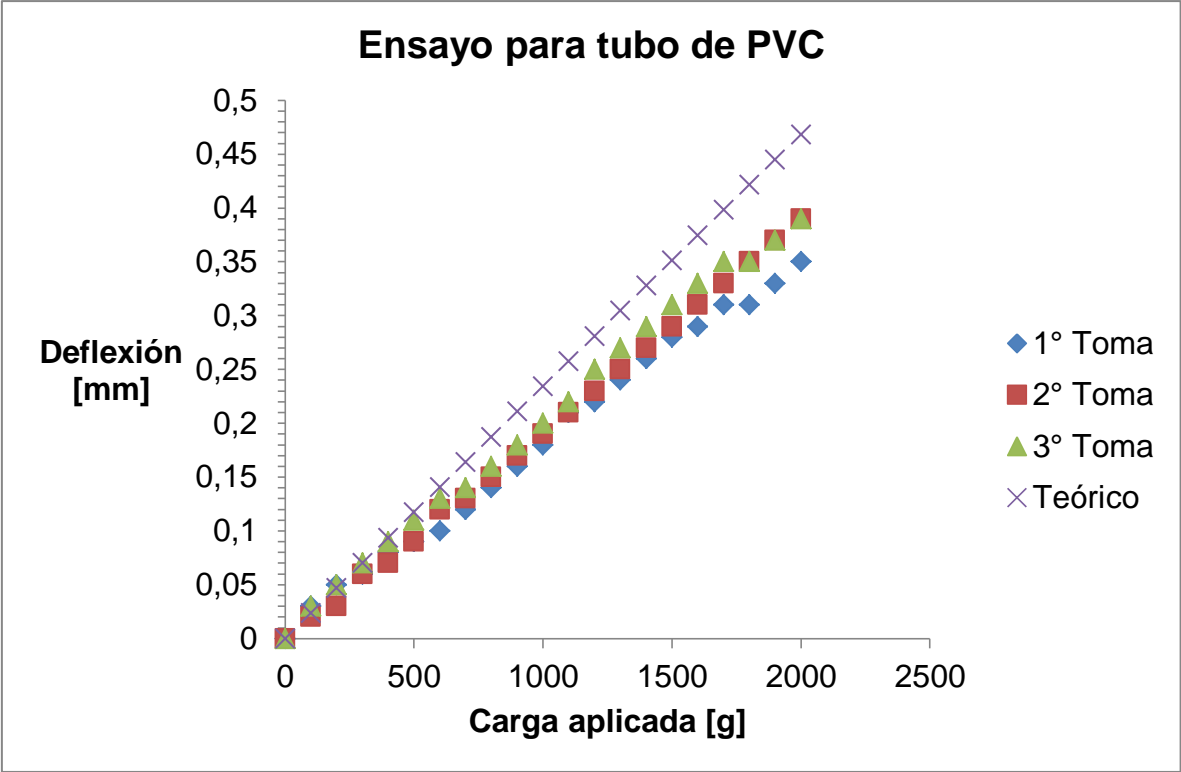


Figura 19. Grafica ensayos tubo de PVC

En los resultados se puede ver una leve diferencia entre los tres ensayos realizados al tubo de PVC y los datos teóricos, los cuales fueron calculados por medio de la información de la Tabla 7; esta diferencia puede ser causada por el nivel de precisión en la fabricación de los elementos, además la referencia teórica de las propiedades mecánicas del PVC fue consultada en la red, por tal motivo no se conoce certeramente la resistencia mecánica del PVC ensayado, además de posibles defectos de fabricación que éste tenga.

El comportamiento de los datos permite afirmar que la primera medición experimental realizada con el prototipo tiene una repetitividad aceptable que le da validez funcional a la propuesta.

A la hora de realizar la verificación del prototipo con un material vegetal, se tomó en cuenta la humedad del mismo, por tal motivo este fue cortado minutos antes de realizarse la prueba y durante el tiempo entre el corte y la prueba se mantuvo el peciolo sumergido en agua para evitar la pérdida de la humedad. Para esta validación se utilizó un peciolo de una palma mostrada en la Figura 20.

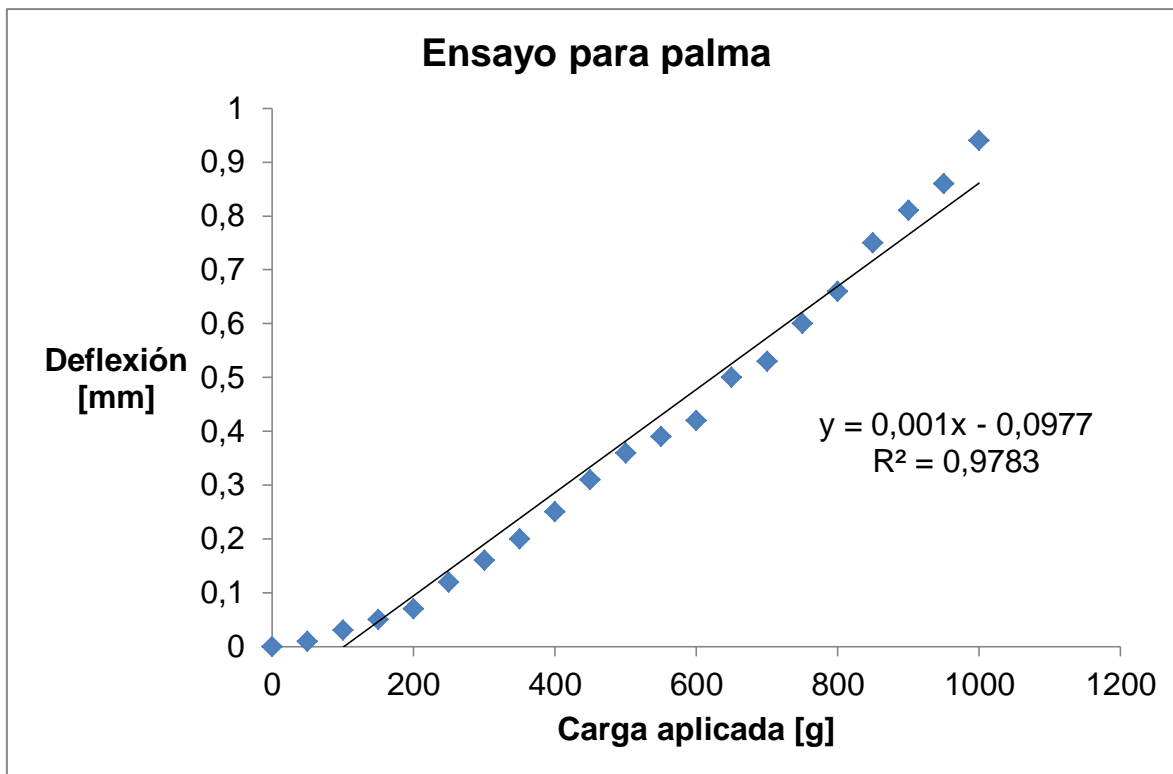


**Figura 20. Palma utilizada para validación.**

Con el fin de comparar la calibración del equipo, las condiciones de las pruebas no fueron modificadas, quedando el montaje de la siguiente manera

Los soportes externos están a 7,5 cm de los extremos del tubo, los soportes intermedios estas ubicados a 20 cm de los soportes externos y la separación entre los soportes internos (c) es de 10 cm, con eso obtenemos una separación entre los soportes externos (l) de 50 cm.

En Figura 21 se muestran los resultados obtenidos en la prueba realizada al peciolo.



**Figura 21. Grafica de ensayos a peciolo de palma.**

En la gráfica de la figura 20 se observa que los datos se ajustan a un modelo elástico lineal que era de esperarse con base en lo reportado en la literatura científica. El valor de  $R^2$  de la ecuación de la línea de tendencia tiene un valor muy cercano a 1, lo cual estadísticamente demuestra la confiabilidad que tiene la regresión. Estos datos validan funcionalmente el equipo.

## 6 Conclusiones

- Este trabajo permitió desarrollar un prototipo de máquina para realizar pruebas de flexión a partes vegetales. El prototipo puede ser utilizado tanto en laboratorio como en campo, además de no afectar la probeta en su composición ni en su estructura física en los apoyos.
- El prototipo permitió realizar las pruebas de flexión a las probetas, arrojando como resultados deformaciones asociadas a una carga aplicada
- Debido a la variabilidad geométrica de las plantas, el prototipo requiere algunas mejoras y modificaciones tanto en materiales como en su construcción, con el fin de aumentar su precisión.



## 7 Futuras Mejoras

El prototipo fabricado es susceptible a futuras mejoras y adecuaciones las cuales podrán aumentar las prestaciones del equipo.

Entre las mejoras que pueden ser realizadas al equipo se encuentran las siguientes:

- Cambio del sistema de desplazamiento del carro móvil por el uso de carros lineales (Figura 21) o rodamientos lineales los cuales permiten un mejor deslizamiento, más preciso y con menos resistencia al desplazamiento y sin permitir desalineaciones angulares entre el eje y el carro móvil.



**Figura 22. Rodamientos y carros lineales SKF.**

**Fuente:** <http://www.skf.com/group/products/linear-motion/index.html>

- Uso de sistemas de aplicación de carga electromecánicos (Figura 22), esto permitirá una aplicación de la carga más precisa. Estos sistemas son de fácil montaje, totalmente portátiles ya que algunos de los actuadores lineales para bajas cargas pueden ser alimentados con baterías, lo que facilita su uso en campo.



**Figura 23. Actuador lineal SKF.**

**Fuente:** [http://www.skf.com/group/products/actuation-systems/index.html?WT.oss=Actuation%20Systems&WT.z\\_oss\\_boost=0&tabname=All&WT.z\\_oss\\_rank=1](http://www.skf.com/group/products/actuation-systems/index.html?WT.oss=Actuation%20Systems&WT.z_oss_boost=0&tabname=All&WT.z_oss_rank=1)

- Utilización de celdas de carga para la medición real de la carga aplicada (Figura 23). Esto con el fin de conocer el cambio de la carga a la que este sometiendo la parte vegetal en el tiempo, debido a que esta cambia a medida que pasa el tiempo la parte vegetal va cambiando su deformación.



**Figura 24. Celda de carga.**

**Fuente:** <http://www.wim-systems.com/celdas-de-carga-wim-wlc-st.html>

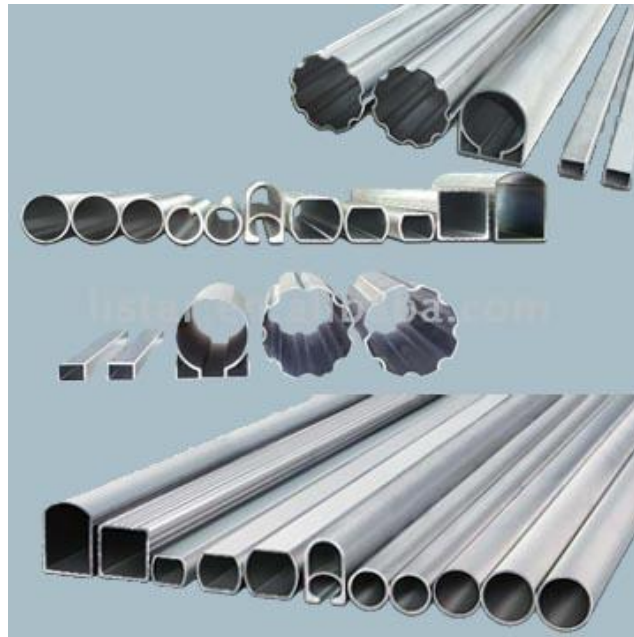
- Uso de sensores de desplazamiento laser (Figura 24), para determinar la deflexión de los materiales ensayados, logrando mediciones en escalas más pequeñas, aumentando la precisión de las pruebas.



**Figura 25. Sensor de desplazamiento laser.**

**Fuente:** <http://www.keyence.com.mx/products/measure/laser/lk/lk.php>

- Uso de materiales más livianos, métodos de fabricación más precisos como maquinados por control numérico, pueden dar aún más precisión al equipo, permitiendo pruebas más estables y con mayor confiabilidad. Uso de perfiles y tubos en aluminio para reducir peso y dar mayor precisión a las pruebas (Figura 25)



**Figura 26. Perfiles y tubos livianos en aluminio.**

**Fuente:** <http://spanish.alibaba.com/product-gs/aluminum-profile-10152481.html>

## 8 Bibliografía

- Askeland. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (Cuarta ed.). México: Thomson.
- Beaumont, P. (202). Stress and strain in plants. *SAPS*, 1-7.
- Curtis, H. (2008). Biología de las plantas. *Biología*, sección 7.
- Ennos, A. (2000). The functional morphology of the petioles of the banana, *Musa textilis*. *Journal of Experimental Botany*, 2085-2093.
- Harvey, L. (2006). *Biología celular y molecular*. Buenos Aires: Editorial Medica Paramericana.
- Martínez, P. (1997). Medición del módulo de elasticidad de Young. 11.
- Martinez, V. V. (2004). *Estática y estructuras isostáticas*.
- MatWeb. (n.d.). Retrieved Octubre 20, 2012, from Materia Property Data: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=85e34fa76c6d40339eb8f65fc0ebfe58&ckck=1>
- Taiz, L. (2006). *Fisiología Vegetal*. Castellon de la Plana.
- Valla, J. J. (2007). *Botánica. Morfología de las plantas superiores*. Buenos Aires.
- Weisstein, E. W. (s.f.). *Normal Distribution Function*. Recuperado el 1 de Febrero de 2012, de <http://mathworld.wolfram.com/NormalDistributionFunction.html>
- Young, W. (2011). *Roark's Formulas for Stress and Strain* (8° ed.). McGraw-Hill Companies.
- Niklas, K J. (2000) *Plant Biomechanics*. Chicago.
- ETNIER, S. A. (2007). DIFFERENCES IN MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF SURFACE AND AERIAL PETIOLES OF THE AQUATIC

PLANT NYMPHAEA ODORATA SUBSP. TUBEROSA. American journal of botany , 1067-1072.

F. J. Sutili, L. D. (2010). Flexural behaviour of selected plants. Hydrology and Earth Sciences Discussions , 1459-1483.

Hejnowicz, Z. (2005). Structural and mechanical peculiarities of the petioles of giant leaves of *Amorphophallus*. American journal of botany , 391-403.

Köhler, L. (2000). Biphasic mechanical behaviour of plant tissues. Materials Science and Engineering , 51-56.

Schulgasser, K. (1997). On the strength of herbaceous vascular plants stems. Annals of Botany , 35-44.