

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
VISCO-ELASTO-PLÁSTICO DE LA GUADUA EN EL PLANO
TRANSVERSAL**

Luis Esteban Moncada Enríquez

Director:

José Jaime García Álvarez, Ph.D.

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa Académico de Ingeniería Civil
Santiago de Cali, 10 de septiembre de 2024

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO VISCO-ELASTO-PLÁSTICO DE LA GUADUA EN EL PLANO TRANSVERSAL

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Luis Esteban Moncada Enríquez

Director:

José Jaime García Álvarez, Ph.D.

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Programa Académico de Ingeniería Civil

Santiago de Cali, 10 de septiembre de 2024



Nota de aceptación

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad del Valle para optar al título de Ingeniero Civil.

Jurado

Jurado

Ciudad y fecha.

RESUMEN

La preocupación por la protección del medio ambiente ha llevado a fomentar el uso de materiales naturales como la guadua en la construcción. Sin embargo, esta tiene restricciones como la anisotropía y su forma variable en diámetro y espesor. En las uniones entre culmos se producen esfuerzos en la dirección transversal, convirtiéndolas en un caso crítico de estudio. Una caracterización detallada del comportamiento en la sección transversal permite crear modelos de elementos finitos útiles para realizar pruebas virtuales ahorrando materiales y costos de fabricación. En la sección transversal se presenta un comportamiento visco-elasto-plástico. Para caracterizar este comportamiento se realizaron ensayos de relajación de esfuerzos en semiarcos de guadua, aplicando un desplazamiento en el sentido circunferencial del arco. Se controló la velocidad de aplicación de la deformación, el nivel de deformación y las dimensiones de las probetas. No se encontraron diferencias significativas de los parámetros mecánicos con respecto a velocidad de aplicación de la deformación y dimensiones de las probetas. Tanto el esfuerzo máximo (promedios de 5.4, 6.5, 7.9 MPa, para desplazamientos de 1.0, 1.5 y 2.0 mm, respectivamente) como la deformación plástica (0.22, 0.43, y 0.65 mm para desplazamientos de 1.0, 1.5 y 2.0 mm, respectivamente) fueron significativamente mayores con incrementos en el desplazamiento. Los rangos de módulos de elasticidad circunferencial, esfuerzos máximos, límites elásticos, índice de ductilidad y deformación plástica fueron 159-263 MPa, 4.3-8.3 MPa, 1.4-6.2 MPa, 1.3-2.1 y 16-38%, respectivamente. Se ajustaron los datos experimentales a un modelo de Maxwell generalizado de 3 ramas en serie con un elemento plástico. Se presentaron porcentajes de relajación de 36.6, 28.5, 31.8%, para deformaciones de 1.0, 1.5 y 2.0 mm, respectivamente. Los tiempos de relajación del modelo fueron $\tau_1 = 0.15 \text{ s}$, $\tau_2 = 15 \text{ s}$, $\tau_3 = 150 \text{ s}$. Mediante un algoritmo de optimización se encontraron las constantes del modelo. El modelo presentó ajustes de R^2 entre 0.85 y 0.93, siendo mejores para las deformaciones más bajas; esto debido a la aparición de fracturas repentinas en la estructura interna del material.

Palabras clave: *guadua, visco-elasto-plástico, relajación, modelo de Maxwell.*

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Guadua Angustifolia	4
1.1.1. Descripción general del material.....	4
1.1.2. Beneficios ambientales.....	5
1.1.3. Propiedades mecánicas de la guadua Angustifolia	6
1.1.4. Descripción de la estructura interna	7
1.2. Antecedentes	8
1.3. Comportamiento viscoelástico	10
1.3.1 Modelo de Maxwell	10
1.3.2. Modelo de Maxwell generalizado	13
1.3.3. Integral hereditaria (formulación general)	14
1.4. Plasticidad	15
CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	17
2.1. Materiales y métodos	17
2.1.1 Corte e identificación de las probetas	17
2.1.2 Montaje experimental.....	18
2.1.3. Módulo de elasticidad experimental	19

2.1.6.	Límite elástico experimental	20
2.1.5.	Ductilidad experimental	20
2.2.	Ensayos exploratorios	21
2.2.1.	Protocolo de ensayos	21
2.2.2.	Resultados	22
2.2.3.	Discusión.....	28
2.3.	Ensayos definitivos	29
2.3.1.	Protocolo de ensayos	29
2.3.2.	Resultados	30
2.3.3.	Discusión.....	34
CAPITULO 3. MODELO TEORICO Y AJUSTE.....		35
3.1.	Formulación del modelo teórico	35
3.2.	Determinación de las constantes del modelo	38
3.3.	Resultados	39
CAPITULO 4. CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES		43
CAPITULO 5. CONCLUSIONES		44
BIBLIOGRAFÍA.....		45

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Puente Jenny Garzón (Salas, 2015).....	2
Figura 1.2. Distribución del bambú en el mundo (Hidalgo, 2004).....	4
Figura 1.3 (a) Direcciones principales de un culmo. (b) Esfuerzos admisibles para culmos de guadua (NSR-10, 2010).	6
Figura 1.4 Variación de la densidad de las fibras en dirección del espesor de la pared (Khalil et al., 2012).	7
Figura 1.5 Curva esfuerzo-deformación de la guadua bajo compresión radial cíclica (Orozco et al., 2014).	8
Figura 1.6 (a) Modelo teórico adoptado por Caicedo. (b) relación esfuerzo-deformación en el tiempo encontrada (Caicedo et al., 2021).	9
Figura 1.7 Modelo de Maxwell (Zuluaga, 2022).	10
Figura 1.8 (a) Fluencia en el modelo de Maxwell. (b) Relajación en el modelo de Maxwell (Balart et al., 2011).	12
Figura 1.9 Modelo generalizado de Maxwell (Barnes, 1993).	13
Figura 1.10 Superposición de deformaciones (Kelly, 1993).	14
Figura 1.11 Elemento de fricción para representar las deformaciones plásticas (Olivella, 2000).	15
Figura 1.12 Ciclo de carga y descarga para un elemento friccional (Olivella, 2000).	16
Figura 2.1 (a) Marcaje de las guías de corte de las probetas, (b) Nomenclatura de las probetas en sentido horario.	18
Figura 2.2 Montaje de la maquina universal de ensayos.....	19
Figura 2.3 Curva esfuerzo vs deformación unitaria de la probeta A1_1.	19
Figura 2.4 Medición de la ductilidad estática (Montenegro, 2021).....	20

Figura 2.5 Tipos de fallas observados en las probetas.	22
Figura 2.6 Curva típica (a) Sin fractura (b) con fractura.	23
Figura 2.7 Curva Fuerza vs tiempo para un ensayo de 10 minutos y 4 horas.	24
Figura 2.8 Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria para cada grupo de ensayos.	25
Figura 2.9 (a) Análisis de los resultados de módulo de elasticidad. (b) Análisis de los resultados del límite elástico. (c) Análisis de los resultados de la ductilidad.....	27
Figura 2.10 Curvas esfuerzo vs deformación de cada grupo de ensayos.	31
Figura 2.11 Análisis de varianza de las propiedades con respecto al nivel de deformación.	33
Figura 3.1 Modelo visco-elasto-plástico adoptado. Fuente: propia.....	35
Figura 3.2 Comportamiento típico del modelo en la fase de compactación y relajación.....	36
Figura 3.3 Resultados del análisis de varianza para diferentes deformaciones.....	40
Figura 3.4 Comparación entre el nivel de ajuste en ensayos sin fractura y con fractura	41
Figura 3.5 Resultados del análisis de varianza para diferentes velocidades de deformación.	42

INTRODUCCIÓN

Es ampliamente reconocido que la industria de la construcción tiene un impacto negativo en el medio ambiente; los procesos y materiales usados tienen consecuencias como la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de residuos, la contaminación del agua, entre otros. Muchos esfuerzos se han centrado en reducir este impacto a través de prácticas sostenibles y el uso de materiales alternativos y renovables. Cada edificio y casa en la que vivimos crea una huella ecológica. Su construcción, funcionamiento y eventual demolición, utilizan muchos recursos y generan residuos contaminantes. Por tal motivo, la preocupación por la protección del medio ambiente ha llevado a fomentar el uso de materiales naturales en la construcción, uno de los cuales es la guadua. En 2005 se realizó una comparación de consumos de recursos energéticos en la construcción de vivienda social: guadua vs concreto. Se concluyó que el ahorro de recursos energéticos en la construcción de una casa de guadua vs una vivienda tradicional de concreto es de alrededor del 45% confirmando el sistema como ambientalmente favorable (Villegas, 2005).

El uso de la guadua para fines constructivos es muy amplio en nuestro territorio comparado con otros países. Tradicionalmente este material se usa en proyectos de vivienda rural. Incluye la estructura principal (columnas, vigas y viguetas), la estructura del piso, la estructura del techo y la formación de los muros (tableros con bambú) (Hidalgo, 2004). Con un correcto manejo, la guadua se puede usar en la construcción de estructuras atractivas, livianas y resistentes. En Colombia se han construido grandes estructuras de guadua como el puente Jenny Garzón en Bogotá (Fig. 1), demostrando que tiene un gran potencial estructural; es por ello por lo que se debe aprovechar este material renovable, resistente, duradero, ecológico y sostenible.



Figura 1.1 Puente Jenny Garzón (Salas, 2015).

El desarrollo de estas grandes estructuras complejas requiere un conocimiento preciso del material, tanto de su importancia ambiental como del comportamiento mecánico. La guadua al ser un material anisótropo, su comportamiento cambia cuando se somete a esfuerzos en las diferentes direcciones. Esto debido a que el material está reforzado longitudinalmente por fibras de celulosa, pero transversalmente solo por una matriz de lignina. Estas fisuras pueden conducir a fallas y no se aprovecha la gran resistencia longitudinal (Janssen, 2000). Estas fallas se dan principalmente en las juntas entre culmos, convirtiéndolas en un caso crítico de estudio. Esto es importante especialmente para el diseño de uniones. Tener una caracterización detallada del comportamiento del material en la sección transversal es útil para crear simulaciones de juntas y culmos mediante elementos finitos de manera realista. Ya se ha formulado un modelo viscoelástico para la guadua (García J.J. et al, 2022), válido para deformaciones relativamente menores. A mayores niveles de deformación se presentan deformaciones plásticas (Orozco et al, 2012). Estas deformaciones plásticas pueden ser críticas para las condiciones de servicio de una estructura. Por consiguiente, es necesario caracterizar el comportamiento visco-elasto-plástico de la guadua en el plano transversal.

OBJETIVOS

Objetivo general

Caracterizar el comportamiento visco-elasto-plástico de la guadua en el plano transversal.

Objetivos específicos

1. Caracterizar experimentalmente el comportamiento mecánico de la guadua en el plano transversal.
2. Formular un modelo teórico.
3. Ajustar el modelo teórico con los datos experimentales y presentar recomendaciones.

CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1. *Guadua Angustifolia*

1.1.1. Descripción general del material

El bambú crece principalmente en las regiones intertropicales del mundo (Fig. 1.2), con la siguiente distribución: Asia 67%, América 30% y África 3%. La *Guadua angustifolia Kunth* es una especie de bambú abundante en Colombia, siendo una de las especies más importantes debido a su gran resistencia, durabilidad y un gran potencial como material estructural. Su diámetro varía entre los 10 y 14 cm, su altura varía entre los 17 y 23 metros (Hidalgo, 2004). Sin embargo, tiene algunas restricciones. Una de ellas es la forma hueca y variable en tamaño, grosor y forma. Otra es que se trata de un material anisótropo, es decir, las propiedades en la dirección longitudinal y transversal son diferentes. En la dirección longitudinal está reforzado por fibras de celulosa que son rígidas y resistentes. En la dirección transversal está reforzado por lignina, esto lo hace quebradizo. Por tanto, el bambú es un material reforzado unidireccionalmente con capacidad tangencial comparativamente pequeña (Janssen, 2000). Esto hace que sea un reto construir uniones para estructuras de este material.

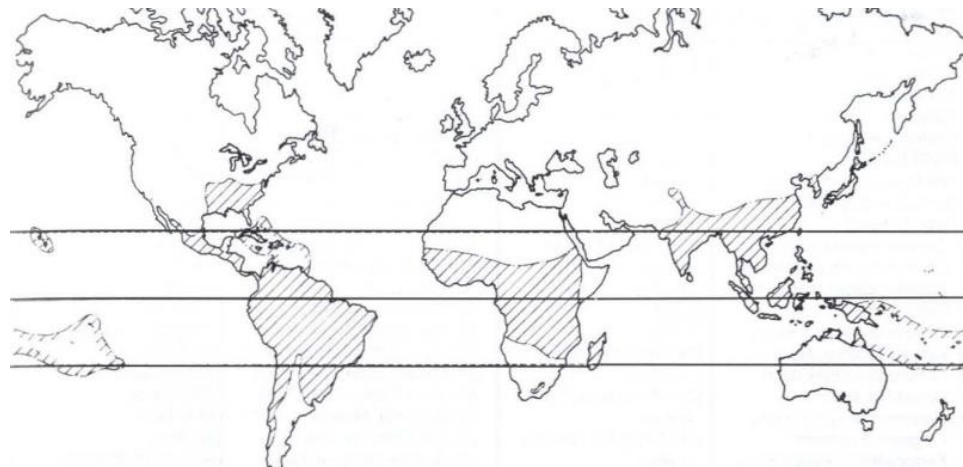


Figura 1.2. Distribución del bambú en el mundo (Hidalgo, 2004).

1.1.2. Beneficios ambientales

La producción de materiales como el cemento contribuye a la contaminación debido al consumo intensivo de recursos naturales, generación de residuos, uso de energía y emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el transporte y el uso de productos químicos tóxicos también son fuentes de contaminación.

Una de las direcciones a la solución de problemáticas ambientales son aplicaciones de materiales constructivos que estén en la capacidad de ser reciclados y reutilizados, capaces de pertenecer a una producción sostenible (Jiménez, 2001). En el medio ecológico la guadua influye en un rol importante, ya que brinda distintos servicios al medio ambiente, por ejemplo: regulación hídrica de microcuencas, protección de riberas de los cursos de agua, protege los suelos de la erosión, genera una reducción en el riesgo de deslizamiento, captura y almacena el dióxido de carbono (Añazco & Rojas, 2015). Actualmente la guadua presenta soluciones innovadoras, ya que posee un crecimiento rápido con un proceso de producción simple, con aplicaciones más efectivas a los materiales estructurales comúnmente utilizados como el hormigón y acero (Linares, 2019).

Linares (2019) estimó la cantidad de carbono captado para una vivienda de 170 m² en Guadua. La vivienda de guadua captó 10336 [Kg.C.cm²] frente a la emisión de 52357 [Kg.C.cm²] de carbono para la misma vivienda construida con materiales convencionales (concreto y acero). La captura de CO₂ se presenta como una excelente solución para reducir los gases de efecto invernadero, lo que se traduce en ahorros y una herramienta eficaz para abordar los problemas ambientales.

La guadua es un recurso ecológico que promueve un estilo de vida más sostenible y en armonía con la naturaleza, mejorando la calidad de vida humana de manera orgánica.

1.1.3. Propiedades mecánicas de la guadua *Angustifolia*

La guadua es un material natural, anisótropo e irregular, por ende, sus propiedades cambian dependiendo de la dirección en la cual se examine. El culmo tiene 3 direcciones principales: axial, radial y circunferencial (Fig. 1.3.a). La dirección axial está asociada a la dirección de las fibras, mientras que las direcciones radial y circunferencial se asocian a la sección transversal del culmo.

Vanegas et al. (2019) determinó las propiedades mecánicas de culmos de guadua *Angustifolia* Kunth. Determinó una resistencia a la compresión promedio de 25 [MPa], una resistencia al corte paralelo a la fibra promedio de 5,6 [MPa], una resistencia a la flexión promedio de 7,5 [MPa] y una resistencia a la tracción promedio de 5,5 [MPa]. También encontró un módulo de elasticidad de 7500 [MPa].

La NSR-10 indica valores de esfuerzo admisible para el diseño de elementos de guadua (Fig. 1.3.b), donde se observan valores comparativamente pequeños para la sección transversal con respecto a la dirección longitudinal.

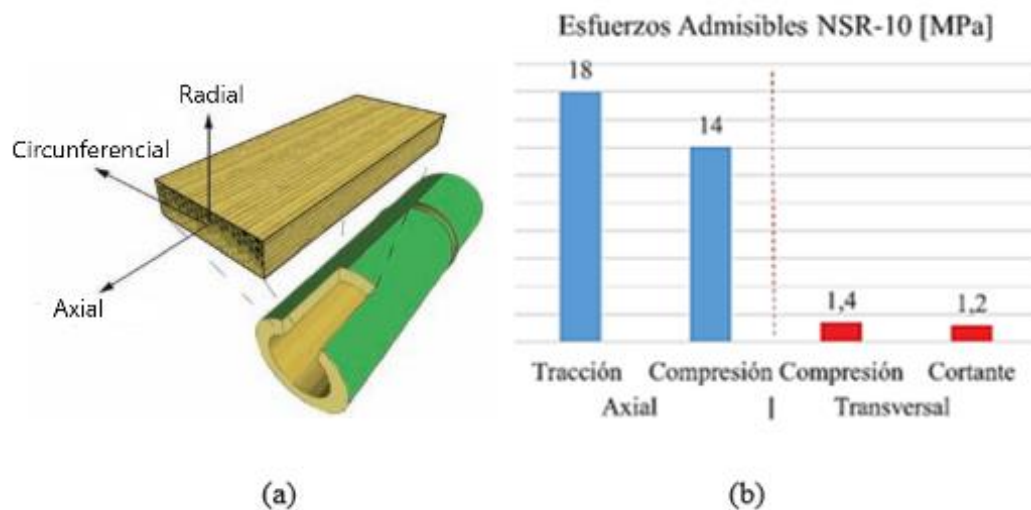


Figura 1.3 (a) Direcciones principales de un culmo (López, 2009). (b) Esfuerzos admisibles para culmos de guadua (NSR-10, 2010).

Las propiedades mecánicas de la sección transversal no han sido ampliamente estudiadas, Sin embargo, en el plano transversal es donde se encuentran las formas de falla habituales. Esto no permite el pleno aprovechamiento de la resistencia longitudinal del material debido a que, “generalmente, las uniones estructurales son propensas a fallar cuando el material es sometido a esfuerzos de tracción circunferencial y cortante paralela a las fibras” (Orozco et al, 2012). En pruebas a compresión en la dirección transversal realizadas por Orozco (2012) se pudo observar que el material presenta deformaciones de entre el 34% y 40% antes de la falla. Esto quiere decir que la Guadua se comporta como un material dúctil bajo compresión circunferencial. Esta propiedad se puede utilizar para mejorar la eficiencia de las juntas estructurales mediante la aplicación de compresión en ese sentido.

1.1.4. Descripción de la estructura interna

La estructura de la sección transversal de la guadua está conformada por fibras longitudinales introducidas en una matriz de lignina. La densidad de fibras va aumentando desde la pared interna hacia la pared externa del culmo (Fig. 1.4).

Osorio et al (2007), determinó que la resistencia a flexión y tracción del culmo se ve afectada directamente por la concentración de fibras en la sección transversal. Una mayor densidad de fibras se relaciona con valores de resistencia más altos que en menores concentraciones.

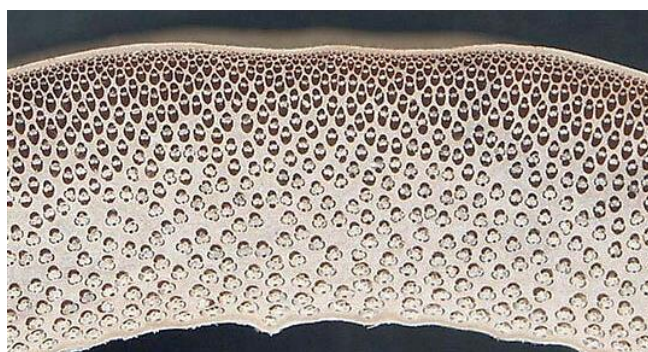


Figura 1.4 Variación de la densidad de las fibras en dirección del espesor de la pared (de Vos, 2010).

1.2. Antecedentes

Los modelos reológicos han sido herramientas valiosas para comprender el comportamiento de los materiales y estructuras. La necesidad de modelos realistas y precisos ha dado pie a investigaciones tanto en materiales convencionales como en los no convencionales. La guadua no ha sido ajena a estas necesidades; la matriz de lignina presente en la estructura interna del material tiene un comportamiento similar al resto de polímeros, los cuales han sido históricamente caracterizados con modelos complejos.

Ya se han realizado modelos viscoelásticos para caracterizar la sección transversal del culmo (Zuluaga, 2022), el cual usa derivadas fraccionarias para analizar su comportamiento. Sin embargo, estos modelos funcionan bien ante deformaciones relativamente bajas. A mayores niveles de deformación se presentan deformaciones permanentes como las mostradas en la Fig. 1.5 (Orozco et al, 2012). Estas deformaciones plásticas pueden ser críticas para las condiciones de servicio de una estructura. Cuando el material está sometido a una condición de esfuerzo constante se presentan deformaciones permanentes debidas al fenómeno de flujo plástico (Chavarro, 2016).

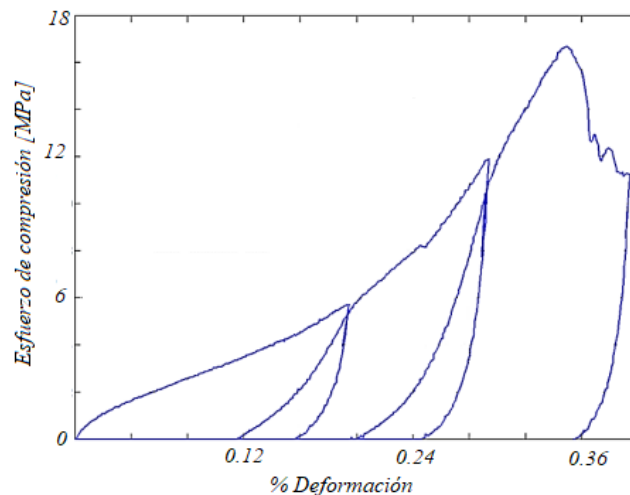


Figura 1.5 Curva esfuerzo-deformación de la guadua bajo compresión radial cíclica (Orozco et al., 2014).

Caicedo et al (2021) realizó un modelo visco-elasto-plástico para caracterizar el comportamiento a compresión de los residuos de caña de azúcar. Para ello, ajustó un modelo teórico (Fig. 1.6.a) a datos experimentales de pruebas de relajación. El modelo teórico propuesto es conocido como un modelo generalizado de maxwell con una rama plástica. Ante un aumento lineal en la deformación, el esfuerzo aumenta hasta un máximo (Fig. 1.6.b). Cuando la deformación se mantiene constante se presenta el fenómeno de relajación, durante el cual el esfuerzo cae de manera exponencial y luego tiende a mantener un esfuerzo constante. Cuando se descarga, se presentan deformaciones permanentes en el material. El modelo de Caicedo presentó un buen ajuste con los datos experimentales ($R^2 > 0.92$).

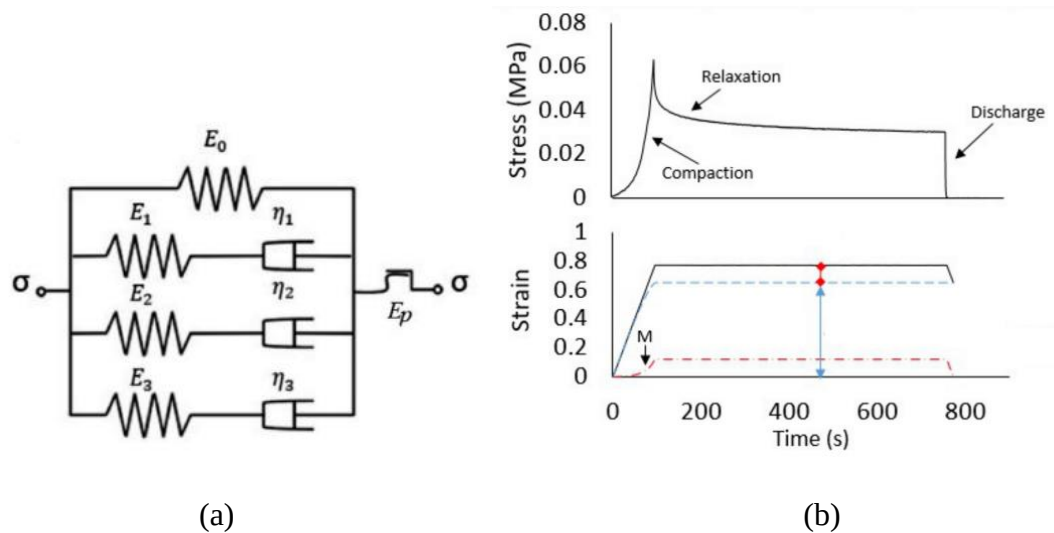


Figura 1.6 (a) Modelo teórico adoptado por Caicedo. (b) relación esfuerzo-deformación en el tiempo encontrada (Caicedo et al., 2021).

Hasta el momento no se ha formulado un modelo que describa el comportamiento visco-elasto-plástico del plano transversal el cual sería útil para realizar simulaciones realistas de estructuras de guadua.

1.3. Comportamiento viscoelástico

El comportamiento viscoelástico se puede observar en muchos materiales, incluyendo polímeros, metales, tejidos biológicos o materiales orgánicos como el bambú. Cuando se aplica una carga a un material viscoelástico, este se deforma elásticamente hasta cierto punto, después de lo cual comienza a fluir viscosamente. La respuesta elástica es reversible y proporcional a la carga aplicada, mientras que la respuesta viscosa es irreversible y depende del tiempo y la historia de deformación. La respuesta viscoelástica se puede caracterizar mediante un modelo reológico, que representa al material como una combinación de elementos elásticos (resortes) y elementos viscosos (amortiguador).

1.3.1 Modelo de Maxwell

Este modelo considera que el material está compuesto por dos elementos en serie: un resorte (elemento elástico) y un amortiguador (elemento viscoso), como se muestra en la Fig. 1.7. Donde ϵ_T es la deformación total aplicada, ϵ_1 y ϵ_2 la deformación elástica y viscosa respectivamente, E el módulo de elasticidad y η es el coeficiente de viscosidad.

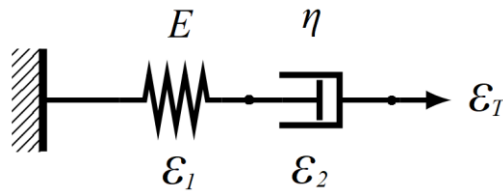


Figura 1.7 Modelo de Maxwell (Zuluaga, 2022).

La respuesta elástica se describe mediante la ley de Hooke, que establece que el esfuerzo es proporcional a la deformación a través del módulo de elasticidad. Por lo tanto, la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal hasta que se alcanza un punto de fluencia. La respuesta viscosa se describe mediante la ley de Newton de la viscosidad; ésta establece la proporcionalidad del esfuerzo aplicado y la velocidad de variación de la deformación a través de un coeficiente de viscosidad.

Teniendo en cuenta la aditividad de deformaciones para el modelo de Maxwell, se establece que la deformación total es igual a la suma de la deformación elástica y la deformación viscosa $\varepsilon_T = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$. De igual manera se puede asegurar que para los dos componentes trabajando en serie el esfuerzo en ambos es el mismo $\sigma_T = \sigma_1 = \sigma_2$.

Partiendo de la expresión básica del elemento elástico (ley de Hook) y diferenciándola respecto al tiempo, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 \rightarrow \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma_1}{dt} \quad (1)$$

De la expresión básica de la viscosidad (ley de Newton) se despeja directamente la variación de la deformación en el amortiguador con respecto al tiempo, resultando la siguiente ecuación:

$$\sigma_2 = \eta \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} \rightarrow \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_2 \quad (2)$$

La propiedad de aditividad de deformaciones se puede expresar de manera diferencial de la siguiente forma:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (3)$$

Remplazando las ecuaciones (1) y (2) en la ecuación (3) se establece la expresión general del modelo de Maxwell de la siguiente forma:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (4)$$

Esta ecuación describe el fenómeno de fluencia lenta (creep) cuando se aplica un escalón de esfuerzo descrito por la función de Heaviside $\sigma = \sigma_0 \cdot H(t)$. Sustituyendo en la ecuación (4) y resolviendo la ecuación diferencial resultante, se obtiene la variación de la deformación en función del tiempo:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \cdot H(t) \left(\frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right) \quad (5)$$

Esta expresión indica que la fluencia se produce de manera lineal en el tiempo y con una deformación inicial instantánea en el resorte (Fig. 1.8.a).

De manera análoga, el modelo puede describir el comportamiento en una prueba de relajación, en la cual se aplica una deformación $\varepsilon = \varepsilon_0 H(t)$. Sustituyendo en la ecuación (4) y resolviendo la ecuación diferencial se obtiene la siguiente expresión:

$$\sigma_{(t)} = E \cdot \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{E}{\eta} \cdot t} \quad (6)$$

Esta expresión indica que cuando se aplica una deformación constante en el material, se produce una liberación de esfuerzos de manera exponencial decreciente con el paso del tiempo (Fig. 1.8.b). Al momento de generar la deformación constante se genera un esfuerzo inicial σ_0 .

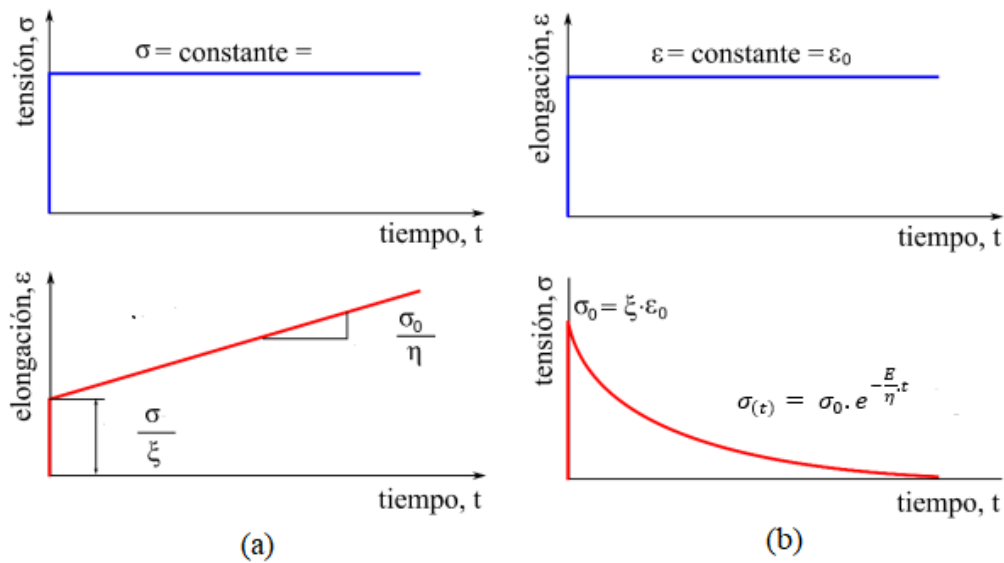


Figura 1.8 (a) Fluencia en el modelo de Maxwell. (b) Relajación en el modelo de Maxwell
(Balart et al., 2011).

1.3.2. Modelo de Maxwell generalizado

En la mayoría de los casos el uso de un modelo sencillo no es suficiente para modelar de manera realista el comportamiento de un material. Una generalización del modelo viscoelástico estándar es el modelo generalizado de Maxwell (también llamado modelo de Wiechert) Fig. 1.9. Este modelo está compuesto por un número ilimitado de ramas. La complejidad de la respuesta del material es la que define cual es el número de ramas apropiado para el modelamiento.

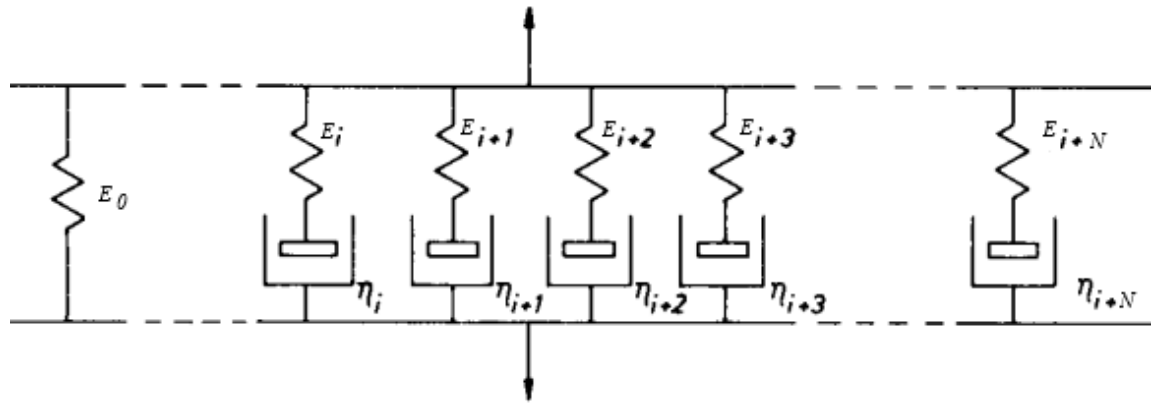


Figura 1.9 Modelo generalizado de Maxwell (Barnes, 1993).

Para este modelo la función de relajación está dada en términos de la siguiente serie de Prony, (Zuluaga, 2022):

$$E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \cdot e^{\frac{-t}{\tau_i}} \quad (7)$$

Donde t es el tiempo, n el numero de ramas del modelo, E_0 es el módulo de equilibrio, E_i es el modulo de elasticidad de cada rama, η_i es el coeficiente de viscosidad y $\tau_i = \eta_i/E_i$ es el tiempo de relajación de cada rama.

De este modo, cuando el material es sometido a una deformación instantánea constante, el material presenta una respuesta inmediata en esfuerzo en donde cada rama del modelo contribuye de igual forma. Con el paso del tiempo la contribución de cada rama

vuelve a cero, esto depende del tiempo de relajación de la rama τ_i . Cuando la contribución de todas las ramas del modelo llega a cero, el único aporte que queda es el del módulo de equilibrio E_0 .

1.3.3. Integral hereditaria (formulación general)

La relación entre el esfuerzo y la deformación se puede expresar en forma integral, esta es conocida como la integral hereditaria. Esta representación se basa en el principio de que la respuesta actual del material depende de la historia del esfuerzo o la deformación de esta (Kelly, 2013). El esfuerzo debido a una deformación constante aplicada en el tiempo $t = 0$ es, por definición $\sigma(t) = \varepsilon_{(0)} \cdot E(t)$, donde $E(t)$ es la función de relajación. El esfuerzo debido a una deformación $\Delta\varepsilon$ aplicada en un tiempo posterior t' es $\sigma(t) = \Delta\varepsilon \cdot E(t - t')$ (Fig. 1.10), entonces el esfuerzo total es:

$$\sigma(t) = \varepsilon_{(0)} \cdot E(t) + \Delta\varepsilon \cdot E(t - t') \quad (8)$$

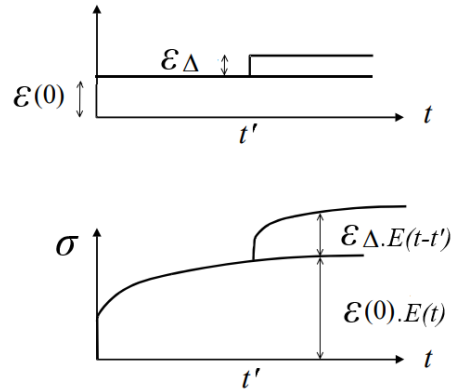


Figura 1.10 Superposición de deformaciones (Kelly, 1993).

De esta forma, aplicando un numero indefinido de escalones de deformación y expresándolo de forma integral, se tiene que:

$$\sigma(t) = \varepsilon(0) \cdot E(t) + \int_0^t E(t-t') \frac{d\varepsilon(t')}{dt'} dt' \quad (9)$$

Esta es la integral hereditaria en términos de la función de relajación. Es particularmente útil para determinar las relaciones de esfuerzo – deformación en ensayos de relajación (o fluencia) ya que la función se puede determinar a partir de datos experimentales.

1.4. Plasticidad

La plasticidad introduce dos modificaciones en comparación con la Elasticidad lineal. Una es la pérdida de linealidad, donde los esfuerzos y las deformaciones no son proporcionales. Otras es el concepto de deformación plástica o permanente, donde una parte de la deformación generada durante la carga no se recupera durante el proceso de descarga.

Para representar el fenómeno de plasticidad se usan modelos de fricción (Fig. 1.11). Estos representan la deformación permanente cuando se sobrepasa un esfuerzo límite σ_e .



Figura 1.11 Elemento de fricción para representar las deformaciones plásticas (Olivella, 2000).

En la Fig. 1.12 se muestra la curva de esfuerzo vs deformación para un elemento plástico en un ciclo de carga – descarga descompuesto en tramos. En el tramo 0-1 el esfuerzo aumenta hasta alcanzar el valor límite $\sigma = \sigma_e$, en este proceso no se produce deformación. En el tramo 1-2 el esfuerzo no puede aumentar por tanto el material fluye, produciendo una deformación ε_p que crece indefinidamente mientras se sostenga la tensión (proceso de carga). En el tramo 2-3 el esfuerzo empieza a disminuir ($\sigma < \sigma_e$), por tanto, automáticamente deja de producirse deformación, esto se puede prolongar hasta que el esfuerzo sea nulo $\sigma = 0$.

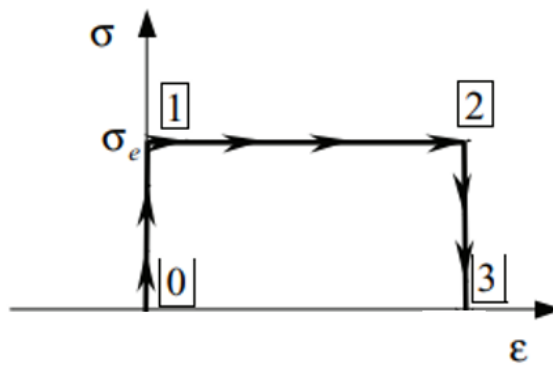


Figura 1.12 Ciclo de carga y descarga para un elemento friccional (Olivella, 2000).

CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

2.1. Materiales y métodos

El propósito de los ensayos fue caracterizar el módulo de elasticidad, límite elástico y un parámetro de ductilidad. Para esto se construyeron arcos de guadua a partir de anillos los cuales fueron sometidos a una deformación en el sentido circunferencial. Se controló la altura de la probeta, velocidad de aplicación de la deformación y el nivel de deformación para encontrar diferencias significativas en los experimentos. Se realizaron dos tipos de experimentos: experimentos pilotos para tener un primer acercamiento a la relación entre las variables de la prueba y los resultados, experimentos definitivos más detallados que definen las propiedades de manera precisa.

Las probetas se obtuvieron de culmos provenientes de la zona del eje cafetero con edad de cultivo de entre 4 y 5 años, almacenados en condiciones ambientales dentro del laboratorio.

2.1.1 Corte e identificación de las probetas

Se cortaron anillos de guadua *Angustifolia Kunth* de 200 mm de ancho, mediante el procedimiento indicado en la norma ISO 22157. Se marcó la silueta del anillo en una hoja de papel y se usó el método de la mediatriz de dos cuerdas para encontrar el centro de la circunferencia externa (Fig. 2.1.a). En la hoja se marcaron 4 ejes y se trazaron líneas paralelas a una distancia de 20 mm, 15 mm y 10 mm según la altura de la probeta. Se remarcaron estas líneas sobre el anillo; Esto con el fin de garantizar paralelismo entre las caras de cada probeta. El corte se realizó con un bisturí y se lijaron las caras para garantizar la uniformidad entre las dos superficies de corte. Las probetas se nombraron desde la superior en sentido horario como se muestra en la Fig. 2.1.b de la siguiente forma: $[AB_i, j]$. Donde AB corresponde al tipo de ensayo, A para ensayos exploratorios y B para ensayos definitivos, i corresponde al número

de anillo de origen y j corresponde a la posición de la probeta en el anillo en sentido horario. Se midieron todas las dimensiones de cada probeta usando un calibrador pie de rey con una precisión de 0.05mm.

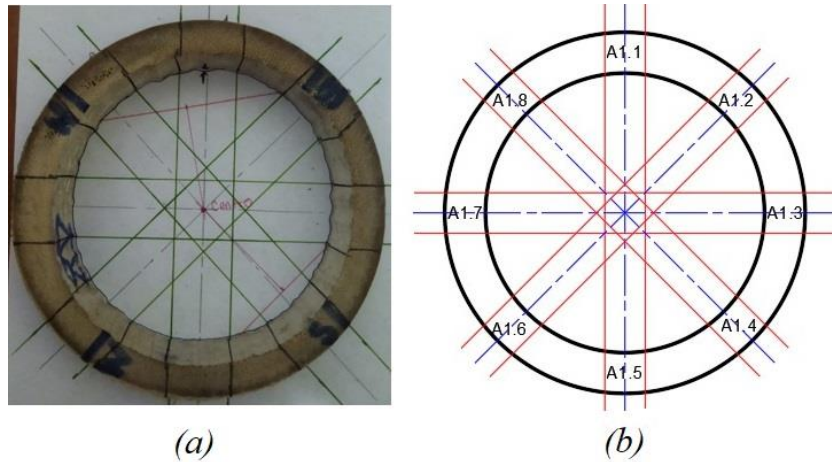


Figura 2.1 (a) Marcaje de las guías de corte de las probetas, (b) Nomenclatura de las probetas en sentido horario.

2.1.2 Montaje experimental

Se usó una máquina universal de ensayos a la cual está acoplado un motor eléctrico capaz de inducir desplazamientos verticales. El motor es controlado mediante una tarjeta controladora vinculada a un software capaz de variar la velocidad del ensayo. Para verificar los desplazamientos se usó un sensor LVDT LD610-15 (Omega, USA) y para registra la fuerza se usó una celda de carga Omega LC703-1000 (Omega, USA). Ambos sensores entregaron la señal análoga a un nodo Lord V-link-200 (Lord Corporation, USA) y se digitalizó mediante el software SensorConnect. La frecuencia de muestreo fue de 16Hz. Se pusieron dos cabezales de acero en forma de disco para transmitir el desplazamiento a la probeta como se muestra en la Fig. 2.2.

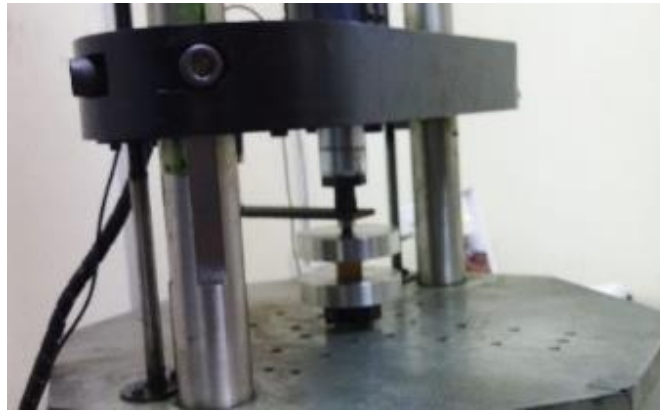


Figura 2.2 Montaje de la maquina universal de ensayos.

2.1.3. Módulo de elasticidad experimental

Se calculó el módulo de elasticidad a partir de las curvas experimentales, mediante el procedimiento descrito por la norma ASTM E111. Este procedimiento normalmente se usa para determinar el módulo de elasticidad de materiales metálicos, sin embargo, se pueden aplicar los principios generales a otros materiales. Se aplicó un desplazamiento uniaxial al espécimen de prueba y se midió tanto la fuerza como la deformación. El esfuerzo axial se determinó dividiendo la fuerza registrada entre el área inicial de la sección transversal de la probeta. Se calculó la pendiente mediante el método de mínimos cuadrados, como se muestra en la Fig. 2.3.

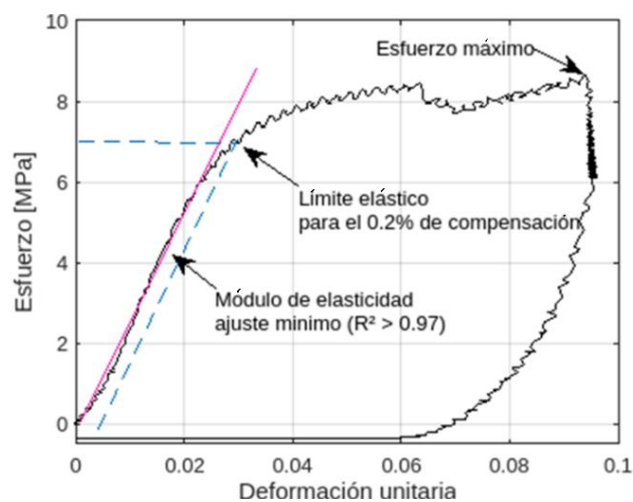


Figura 2.3 Curva esfuerzo vs deformación unitaria de la probeta A1_1.

El método propone que el coeficiente de variación del ajuste de la recta que determina la zona elástica de la curva no supere el 2%, esto quiere decir que el ajuste requiere un $R^2 > 0.97$.

2.1.6. Límite elástico experimental

Se obtuvo el límite elástico mediante el método de la recta paralela descrito en la norma ASTM – A370 el cual considera como límite elástico el esfuerzo al cual el material tiene una deformación plástica del 0.2% (o también $\varepsilon = 0.002$) como se muestra en la Fig. 2.3.

2.1.5. Ductilidad experimental

La ductilidad se midió a partir de la curva esfuerzo – deformación unitaria. Para esto se proyectó una línea recta en la parte elástica de la curva, también se trazó una línea horizontal que corta la curva en el esfuerzo máximo como se muestra en la Fig. 2.4. La ductilidad se definió como la relación entre el desplazamiento ultimo (U_u) y el desplazamiento al final de la zona elástica (U_y), como se muestra en la Ecuación 10:

$$Ds = \frac{U_u}{U_y} \quad (10)$$

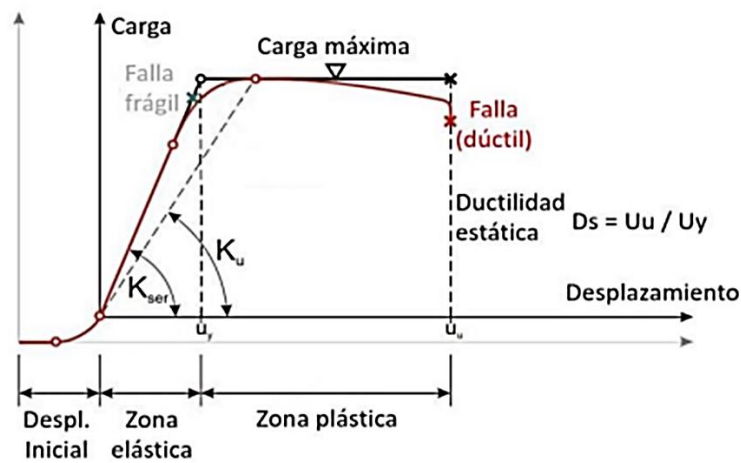


Figura 2.4 Medición de la ductilidad estática (Montenegro, 2021).

2.2. Ensayos exploratorios

Se llevaron a cabo 34 ensayos exploratorios donde se tuvieron en cuenta la velocidad de aplicación del desplazamiento, el nivel de deformación, la altura inicial y el tiempo de relajación. El objetivo es comprender las relaciones entre los resultados y los parámetros controlables de los ensayos, para lo cual se realizó un análisis de varianza ANOVA.

2.2.1. Protocolo de ensayos

Se hicieron 30 ensayos exploratorios donde se variaron las velocidades de desplazamiento vertical (v) en 6, 4 y 2 [mm/min]. Se variaron los niveles de deformación (Δ) en 2, 1.5 y 1 [mm] y las alturas de las probetas (h) en 20 y 15 [mm]. Las probetas se dividieron en 6 grupos de ensayos de 5 probetas cada uno definidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Definición de los grupos para ensayos exploratorios (5 probetas por grupo).

Grupo	Probetas	v [mm/min]	Δ [mm]	h [mm]
A	A1.1, A1.2, A1.3, A1.4, A1.5	6	2.0	20
B	A1.5, A1.6, A1.7, A2.1, A2.2	4	2.0	20
C	A2.3, A2.5, A2.6, A2.7, A3.1	2	2.0	20
D	A4.1, A4.2, A4.4, A4.5, A5.3	6	1.5	20
E	A4.6, A4.7, A4.8, A5.1, A5.2	6	1.0	20
F	A6.1, A6.2, A6.3, A6.4, A6.5	6	1.0	15

Antes de iniciar cada día de ensayos se midieron las probetas y se realizó un proceso de calibración de la máquina universal colocando un peso conocido sobre la celda de carga y verificando la señal en software SensorConnct. De la misma forma se calibró el LVDT usando una arandela metálica con un espesor conocido y midiendo el desplazamiento que esta generó.

Cada ensayo se realizó aplicando el desplazamiento en el sentido circunferencial del arco. Este desplazamiento induce una fuerza de compresión en el elemento que fue medida con la celda de carga. Se recopilaron los datos de la celda y del LVDT mediante el software, el cual devuelve un archivo de extensión .csv con la información del ensayo.

Inmediatamente después de que terminara el ensayo se midió la altura final de la probeta para determinar el porcentaje de deformación. El nivel de recuperación de la altura se midió a los 10, 30, 60, 360, 720 y 1440 [min]. La recuperación solo se midió para el grupo A y B por temas logísticos.

De la misma forma se realizaron 4 ensayos de mayor duración: 3 ensayos de 10 minutos (probetas A7.1, A7.2, A7.3) y 1 ensayo de 4 horas (probeta A8.3). El objetivo de estos es determinar la tendencia de la curva de relajación de los ensayos y definir el tiempo de los ensayos definitivos.

Mediante el software MATLAB se construyeron las curvas de desplazamiento vs tiempo, fuerza vs tiempo y esfuerzo vs deformación unitaria, a partir de las cuales se encontraron las propiedades mecánicas.

2.2.2. Resultados

Todas las probetas presentaron fallas debido al desprendimiento de fibras en de la pared interna del arco como se muestra en la Fig. 2.5. Las fallas se generaron en distintos lugares. El primero se presentó en las fibras centrales como se observa en la probeta A1.1 (Fig. 2.5); Esto se genera por la tracción indirecta que le proporciona la flexión del arco a la pared interna. El segundo se dio por desprendimiento de las fibras en las orillas de la probeta como se muestra en la A3.1; Esto puede ocurrir por imperfecciones en la probeta o por los cabezales no adheridos. En la probeta A1.8, la falla se dio en forma de pliegues, esto es una forma típica de falla debido a la compresión pura.



Figura 2.5 Tipos de fallas observados en las probetas.

Se presentaron dos tipos de curvas esfuerzo-tiempo, tal como se muestra en la Fig. 2.6. En el primer tipo se observa un esfuerzo aproximadamente lineal hasta el pico (Fig. 2.6.a), mientras que en el segundo tipo se observan caídas y recuperaciones antes del máximo (Fig. 2.6.b). En ambos casos cuando inicia el desplazamiento, la fuerza sube rápidamente de manera lineal hasta llegar al límite elástico. En la curva (b) inmediatamente se presenta una zona de deformación no lineal. Antes de llegar a su primer pico de carga se escucharon ruidos de fracturas en las probetas, correspondientes a desprendimientos de fibras internas, las cuales fueron seguidos por una caída repentina de la carga. Estas caídas representan menos del 5% de la carga que reporta antes de caer. En algunos casos las probetas presentaron más de una caída de carga debido al desprendimiento de fibras. Cuando el desplazamiento del pistón alcanza el límite establecido, se presenta una caída no lineal en la carga correspondiente a la zona de relajación. En la zona de relajación la curva se comienza a estabilizar y a reportar valores de carga aproximadamente constantes. Al devolver el pistón a la posición inicial se reporta una caída rápida de la carga hasta cero. Se puede observar que la fuerza vuelve a cero antes de que el pistón vuelva a la posición inicial, esto es debido a las deformaciones inelásticas en la probeta.

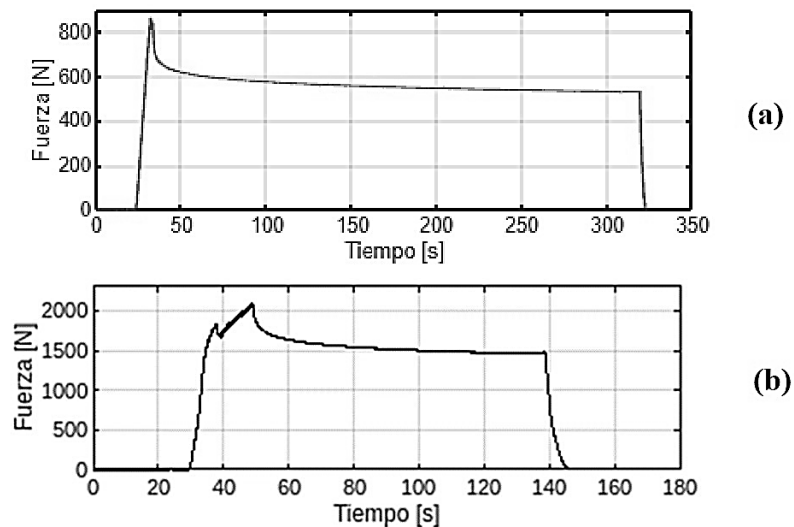


Figura 2.6 Curva típica **(a)** Sin fractura **(b)** con fractura.

A partir de las curvas de esfuerzo vs deformación unitaria (Fig. 2.6), se obtuvieron los valores de E módulo de elasticidad, σ_y límite elástico, DS ductilidad y σ_{max} esfuerzo máximo para cada probeta. Un resumen de estos datos organizados por los promedios de cada grupo se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades promedio de cada grupo experimental (5 probetas por grupo), entre paréntesis se incluye el coeficiente de variación.

Grupo	% Def.	σ máx. [MPa]	E [MPa]	σ_y [MPa]	Ductilidad
A	3.4 (17.1)	7.9 (10.8)	213.2 (23.5)	6.9 (8.7)	2.5 (19.9)
B	4.1 (9.2)	8.4 (34.2)	299.4 (39.8)	6.6 (31.3)	3.3 (16.6)
C	4.1 (6.0)	7.6 (20.6)	175.8 (11.8)	6.2 (21.1)	1.8 (25.2)
D	2.8 (23.4)	10.7 (32.2)	370.0 (54.3)	8.3 (36.4)	2.5 (33.5)
E	1.7 (51.8)	7.7 (14.5)	215.6 (15.7)	6.4 (2.8)	1.4 (14.2)
F	2.4 (20.7)	7.6 (10.5)	225.0 (26.3)	6.3 (5.8)	1.4 (18.2)

Se realizaron pruebas adicionales a 10 minutos y 4 horas (Fig. 2.7) para analizar la tendencia de la curva de relajación. Se encontró en la curva que el material sigue relajándose con una tendencia lineal y no se estabiliza incluso después de 4 horas. Esto indica que la curva de relajación se estabiliza a intervalos de tiempo más grandes que los propuestos en este trabajo.

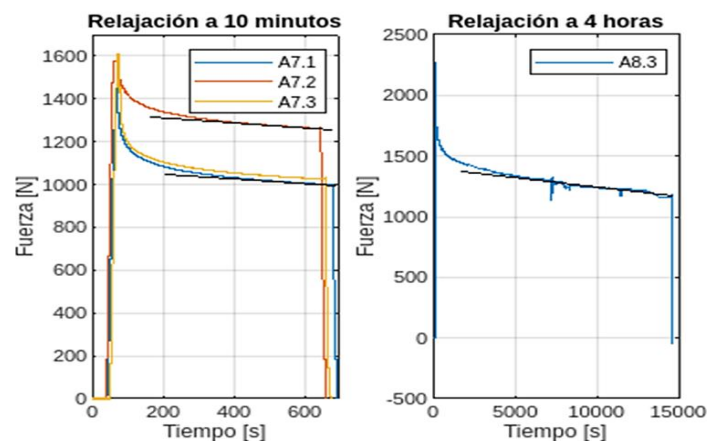


Figura 2.7 Curva Fuerza vs tiempo para un ensayo de 10 minutos y 4 horas.

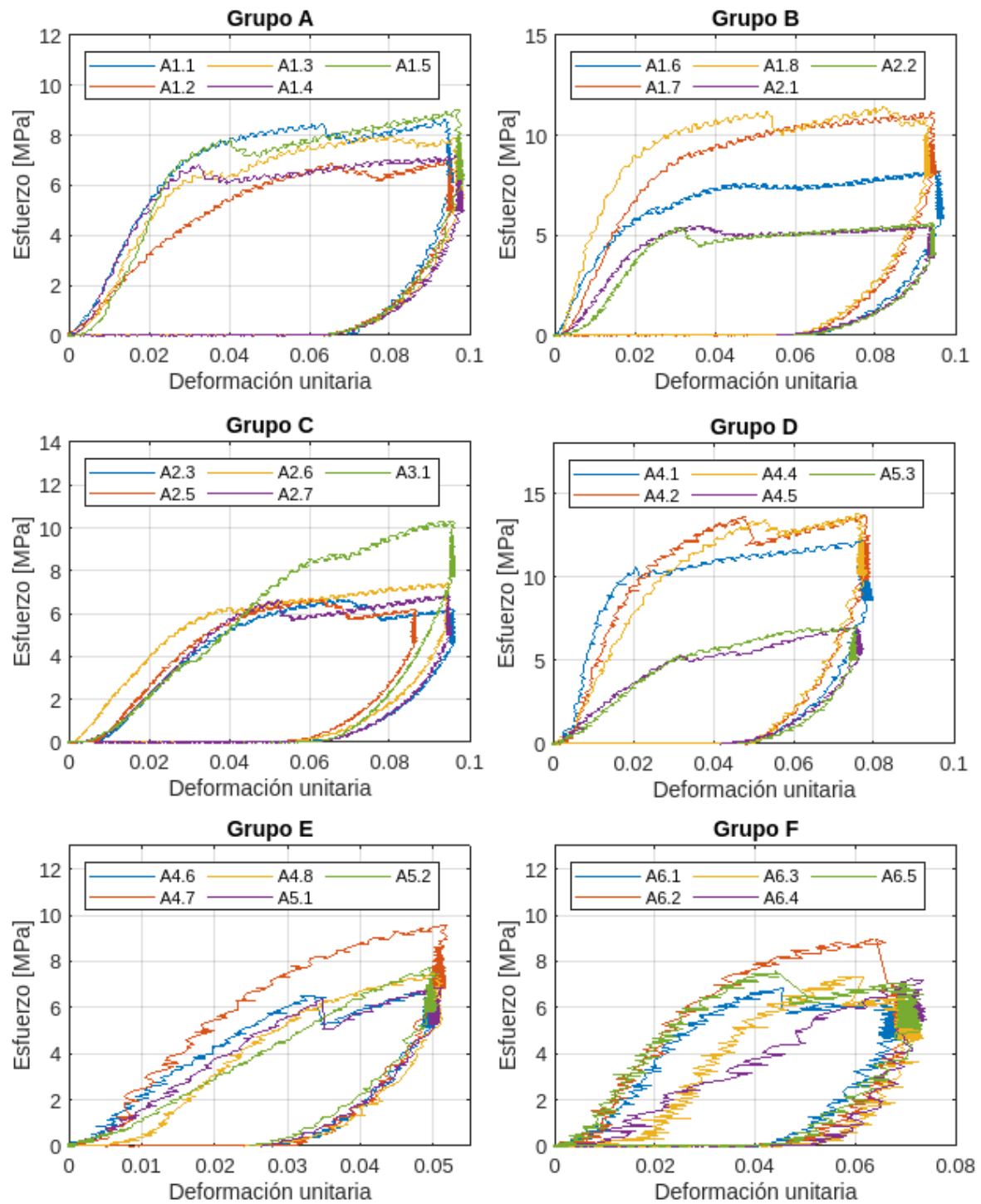


Figura 2.8 Curvas de esfuerzo vs deformación unitaria para cada grupo de ensayos.

La mayoría de las curvas de esfuerzo vs deformación unitaria (Fig. 2.8) presentan un comportamiento similar. En el comportamiento inicial se puede observar una región aproximadamente lineal que se relaciona con la zona elástica. Esta zona elástica sube hasta un determinado punto en la curva (Limite elástico) a partir del cual empieza a tener una deformación significativa sin aumento proporcional del esfuerzo. En algunas probetas del grupo E el límite elástico es difícil de ver a simple vista, sin embargo, se definió usando los criterios de la norma ASTM E111. Después de este punto todas las probetas tuvieron caídas de esfuerzo debidas al colapso de las fibras de la probeta y desprendimiento en las paredes internas del arco (Fig. 2.5). El esfuerzo máximo varió de manera significativa en los grupos B y D, esto es debido a que es un material heterogéneo, sin embargo, la curva presentó un comportamiento similar en todos los grupos. Durante la fase de descarga, las curvas se recuperaron en deformación de manera no lineal hasta que todas llegaron a un esfuerzo cero. En la fase de descarga, el punto a donde llega la curva a cero es la deformación final de la probeta durante el ensayo, sin embargo, no es la deformación final de la probeta ya que se presenta una recuperación con el tiempo debido a los efectos viscoelásticos.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) donde se comparó el módulo de elasticidad, limite elástico y ductilidad (Fig. 2.9). Se encontró que el módulo de elasticidad no presenta diferencias significativas cuando se varía la velocidad del desplazamiento (grupos A, B y C); Tampoco presenta diferencias significativas variando los niveles de deformación (grupos A, D y E); ni variando la altura de la probeta (grupos E y F).

De manera análoga se realizó el análisis de varianza para los mismos grupos analizando el límite elástico (Fig. 2.9.b). Se encontró que no existen diferencias significativas en el límite elástico cuando se varían los mismos parámetros.

La ductilidad presenta variación cuando se aplican diferentes velocidades de aplicación del desplazamiento ($p < 0,05$). Los materiales sometidos a cargas lentas pueden tener mayor ductilidad, sin embargo, no existe una correlación clara entre las velocidades y la ductilidad en estos ensayos (Fig. 2.9.c). La ductilidad aumenta significativamente a medida que se va aumentando la deformación aplicada, en este caso la correlación es clara y si hay diferencias significativas.

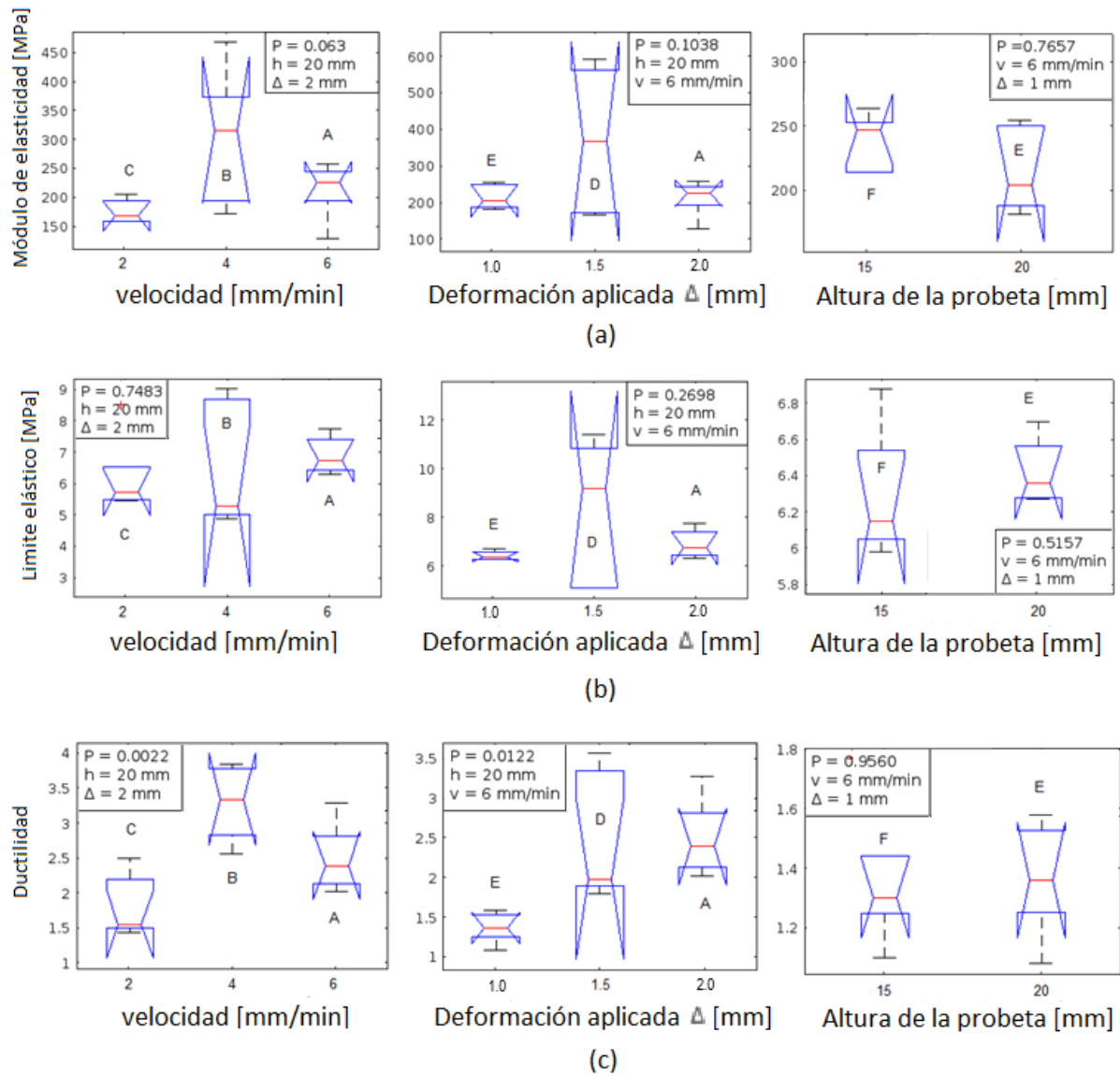


Figura 2.9 Variaciones del (a) módulo de elasticidad. (b) límite elástico. (c) y ductilidad con velocidad de aplicación, deformación y altura de la probeta.

2.2.3. Discusión.

En el primer tipo de curva típica se observa un esfuerzo aproximadamente lineal hasta el pico (Fig. 2.6.a) lo que indica que el material no presentó daños, mientras que en el segundo tipo las caídas y recuperaciones durante la fase de aplicación del desplazamiento se pueden atribuir a las fracturas y desprendimiento de fibras en el material.

En estos ensayos preliminares se usaron tiempos de relajación entre 1.5 min y 3.0 min (a excepción de los ensayos a largo plazo). Con el paso del tiempo la curva de esfuerzo en el tiempo se hace aproximadamente lineal y la variación de esfuerzos es relativamente pequeña ($< 1\%$). Para garantizar la precisión en los ensayos es recomendable usar un tiempo de relajación de mínimo 5 minutos.

A pesar de que no hubo diferencias significativas en el módulo de elasticidad para diferentes velocidades de aplicación de la deformación, estuvo cerca del $P = 0.05$ que se establece como límite. Al ser altamente probable que el ensayo sea sensible a la velocidad de aplicación, vale la pena incluir diferentes velocidades para verificar este resultado.

No se midió de manera precisa la recuperación de cada probeta, lo cual es indispensable para calcular la deformación final y por ende las deformaciones permanentes. Debido a la falta de estos datos, no se incluyó en el análisis de las pruebas piloto, sin embargo, es importante realizarlo en las pruebas definitivas.

No se incluyó en el análisis la influencia de la humedad de la probeta y la humedad relativa del ambiente en el momento de realizar los experimentos. Los efectos de la humedad pueden llegar a ser significativos en la prueba.

En las probetas de los grupos E y F se puede apreciar ruido en los datos; este ruido pudo ser generado por diversas fuentes, sin embargo, es recomendable corregir la situación y de ser necesario, repetir ensayos. El ruido en los datos puede aportar incertidumbre a los resultados.

2.3. Ensayos definitivos

Con base en los resultados anteriores se construyó un protocolo de ensayos para caracterizar las propiedades mecánicas de la guadua bajo compresión circunferencial. Las pruebas piloto indicaron una sensibilidad de los experimentos al nivel de deformación y la velocidad de aplicación, por lo cual fue necesario realizar ensayos más exhaustivos. Los datos de estos ensayos se usaron para ajustar el modelo teórico ya que cuentan con una mayor precisión.

2.3.1. Protocolo de ensayos

Se hicieron 90 ensayos definitivos divididos en 9 grupos (Tabla 3). Se varió la velocidad de aplicación de la deformación (v) en 2, 4 y 6 [mm/min]. El nivel de deformación (Δ) se varió en 1, 1.5 y 2 [mm]. Todas las probetas fueron de 200 mm de alto. Antes de los experimentos se realizó la calibración de la máquina de la misma forma descrita en el capítulo 2.2. El tiempo de cada prueba fue de 5 minutos.

Tabla 3. Definición de grupos para los ensayos definitivos (10 probetas por grupo).

Grupo	Probetas	v [mm/min]	Δ [mm]
A	B1.1, B1.2, B1.3, B1.4, B1.5, B1.6, B2.1, B2.2, B2.3, B2.4	6	2.0
B	B2.5, B2.6, B2.7, B2.8, B3.1, B3.2, B3.3, B3.4, B3.5, 3.6		1.5
C	B3.7, B3.8, B4.1, B4.2, B4.3, B4.4, B4.5, B4.6, B4.7, B4.8		1.0
D	B5.1, B5.2, B5.3, B5.4, B5.5, B5.6, B5.7, B5.8, B6.1, B6.2	4	2.0
E	B6.3, B6.4, B6.5, B6.6, B6.7, B6.8, B7.1, B7.2, B7.3, B7.4		1.5
F	B7.5, B7.6, B7.7, B7.8, B8.1, B8.2, B8.3, B8.4, B8.5, B8.6		1.0
G	B8.7, B8.8, B9.1, B9.2, B9.3, B9.4, B9.5, B9.6, B9.7, B9.8	2	2.0
H	B10.1, B10.2, B10.3, B10.4, B10.5, B10.6, B10.7, B10.8, B11.1, B11.2		1.5
I	B11.3, B11.4, B11.5, B11.6, B11.7, B11.8, B12.1, B12.2, B12.3, B12.4		1.0

Los ensayos se hicieron aplicando un desplazamiento controlado en el sentido circunferencial del arco. La fuerza de compresión inducida por el desplazamiento se midió con una celda de carga. A manera de guía se midió el desplazamiento con un LVDT. Se recopilaron los datos digitales de la celda y del LVDT para su procesamiento y análisis.

En el momento inmediatamente posterior al ensayo se midió la altura final de la probeta para determinar el porcentaje de deformación. Se midió la humedad relativa de la probeta con un medidor de humedad para madera. El nivel de recuperación de la altura se midió a los 10, 30, 60, 360, 1440 y 7200 [min] de haberse hecho el ensayo, esta medida es necesaria para determinar la deformación permanente.

Toda la información se procesó mediante el software MATLAB. Se construyeron las curvas de desplazamiento vs tiempo, fuerza vs tiempo y esfuerzo vs deformación unitaria, a partir de las cuales se encontraron las propiedades mecánicas.

2.3.2. Resultados

Las curvas de esfuerzo vs deformación de cada grupo de probetas se muestran en la Fig. 2.10. Se observó una forma de la curva similar en la mayoría de los ensayos, empezando con una región inicial aproximadamente lineal, indicando un comportamiento elástico. El módulo de elasticidad (E) en esta zona varía entre 159 y 263 [MPa] en promedio. A medida que se incrementa el esfuerzo se alcanza el límite elástico (σ_y) que varía entre 4.35 y 6.21 [MPa]. A partir del límite elástico se presenta una región donde se pierde la linealidad y predominan las deformaciones plásticas. En esta zona aparecieron caídas repentinas de la carga seguidos de sonidos de fractura correspondientes a colapsos en la corteza de la pared interna. Después de la fractura las probetas siguieron resistiendo, mostrando un comportamiento dúctil. Con el aumento del esfuerzo se llega a un pico máximo de esfuerzo (σ_{max}) que varía entre los 6.05 y 8.32 [MPa] en promedio. Durante la fase de relajación se muestra una caída en el esfuerzo para el mismo nivel de deformación. Cuando empieza la fase de descarga se muestra una curva inversa en la que se recupera parte de la deformación, con esta se puede calcular la altura final de la probeta, sin embargo, esta deformación no es la deformación plástica total ya que se presenta el fenómeno de recuperación. Se puede

observar que en las mediciones a largo plazo las probetas pueden volver a compactarse, sin embargo, esto es debido a cambios volumétricos por la humedad relativa (Zuluaga, 2022). Se presentaron deformaciones plásticas (ε_p) después de 5 días de entre 0.16 y 0.77 [mm]. El porcentaje de deformación plástica ($\%\varepsilon_p$) está entre el 16 y 38%. Se calculó el índice de ductilidad (DU) con forma a la metodología descrita en el capítulo 2.1.5. encontrando valores de entre 1.35 y 2.42. En la Tabla 4 se presentan los promedios de las propiedades por grupo y el coeficiente de variación entre paréntesis.

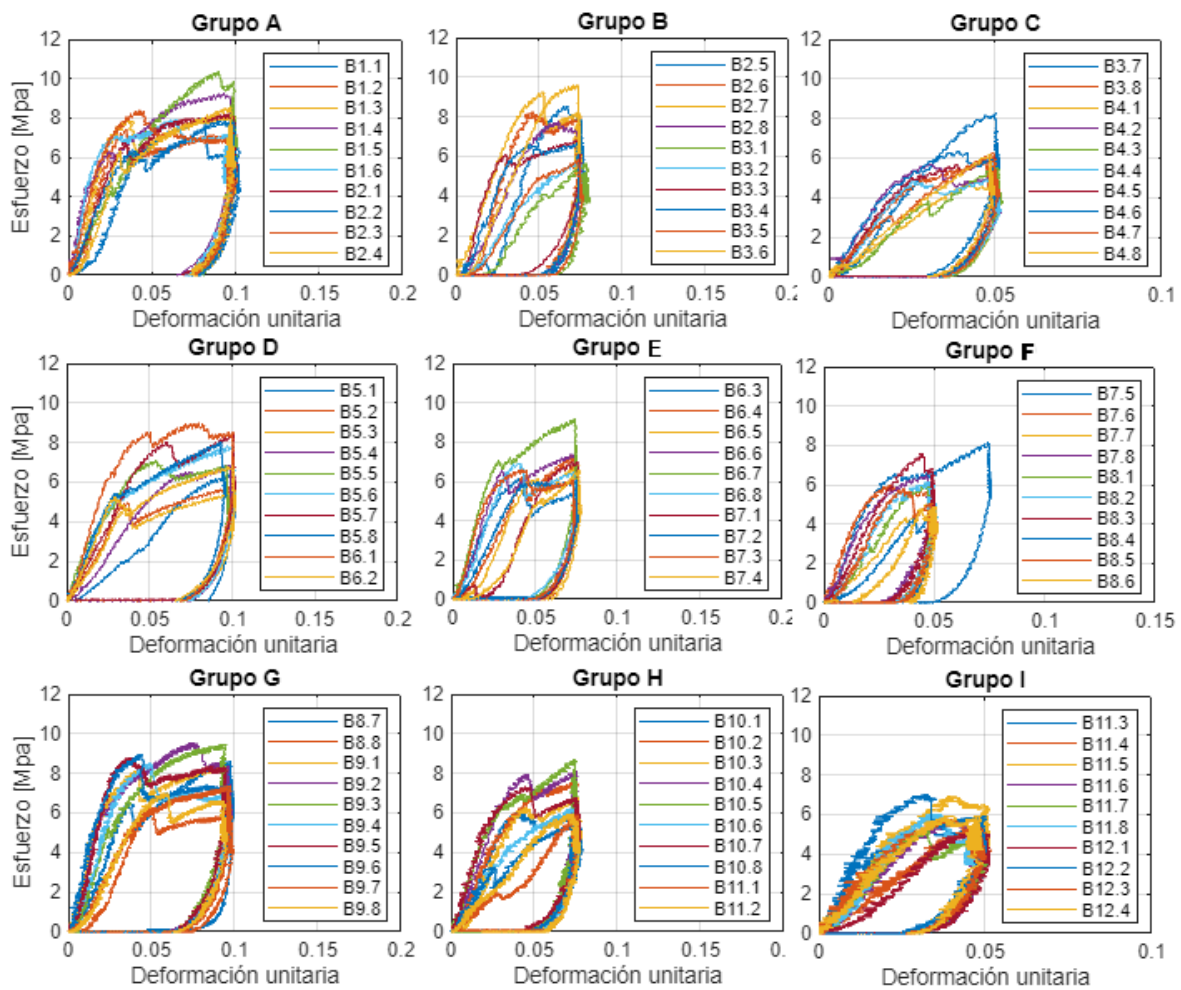


Figura 2.10 Curvas esfuerzo vs deformación de cada grupo de ensayos.

Tabla 5. Propiedades mecánicas promedio para cada grupo, entre paréntesis se incluye el coeficiente de variación. Se señalan con fondo gris los coeficientes de variación mayores a 0.4.

Grupo	V [mm/min]	Δ [mm]	E [MPa]	σ_{max} [MPa]	σ_y [MPa]	DU	% relax	ϵ_p [mm]	% ϵ_p
A	6	2.0	262.7 (29.3)	8.3 (10.1)	5.8 (14.3)	2.4 (50.3)	37.9 (15.3)	0.8 (13.1)	38.5
B		1.5	216.8 (33.5)	5.9 (20.0)	5.9 (27.4)	1.5 (35.4)	37.8 (25.8)	0.5 (40.5)	33.3
C		1.0	211.5 (23.3)	4.3 (16.2)	4.3 (21.0)	1.5 (19.9)	25.2 (21.4)	0.3 (47.5)	26
D	4	2.0	159.0 (33.5)	7.2 (16.1)	4.6 (32.6)	2.1 (24.7)	41.2 (25.8)	0.5 (43.6)	27.5
E		1.5	236.3 (24.4)	7.0 (12.7)	5.6 (12.2)	1.6 (28.2)	37.4 (18.2)	0.4 (25.5)	26
F		1.0	216.2 (30.4)	6.1 (19.1)	4.8 (16.5)	1.5 (33.1)	41.4 (27.6)	0.2 (97.5)	16
G	2	2.0	263.6 (33.5)	8.3 (13.4)	6.2 (13.5)	2.0 (42.6)	30.5 (16.3)	0.6 (17.2)	31.5
H		1.5	171.5 (37.0)	6.8 (16.2)	1.4 (29.7)	1.7 (22.3)	10.5 (20.4)	0.4 (27.6)	26.6
I		1.0	199.0 (24.9)	5.9 (11.1)	4.7 (14.0)	1.4 (15.8)	28.8 (17.9)	0.3 (79.4)	25

El esfuerzo máximo σ_{max} y limite elástico σ_y presentan coeficientes de variación relativamente bajos, mientras que el coeficiente de variación es mayor para los otros parámetros mecánicos, lo que podría considerarse aceptable para materiales naturales. No obstante, algunos grupos presentan coeficientes de variación mayores para la ductilidad DU y deformación plástica ϵ_p , por tanto, los promedios no son representativos. El módulo de elasticidad E presentó coeficientes de variación cercanos al 30% (limite aceptable en materiales naturales).

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y se encontraron diferencias significativas entre los resultados y las variables de control. Existe una proporcionalidad entre

los niveles de deformación y el esfuerzo máximo σ_{max} , límite elástico σ_y , índice de ductilidad DU y deformación plástica ε_p cómo se observa en la Fig. 2.11. A medida que la deformación disminuye, los valores de las propiedades también disminuyen. Esta correlación es más clara en el esfuerzo máximo y la deformación plástica los cuales tienen valores de p significativamente mas bajos. Comparando el módulo de elasticidad bajo diferentes velocidades de aplicación de la carga y un mismo nivel de deformación se encontró un valor de $p = 0.0528$, cercano al mínimo nivel de significancia, sin embargo, no se encontró una correlación directa entre los valores y la velocidad.

No se encontraron diferencias significativas en las propiedades mecánicas variando las velocidades de aplicación de la carga para un mismo nivel de deformación.

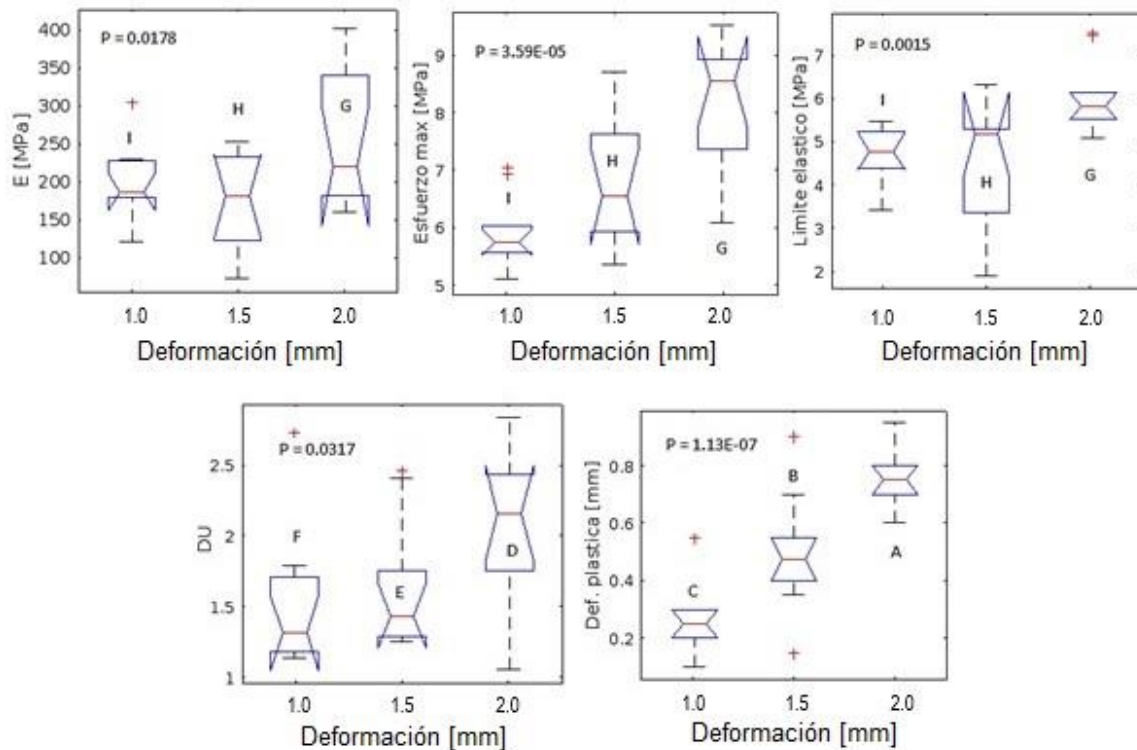


Figura 2.11 Análisis de varianza de las propiedades con respecto al nivel de deformación.

2.3.3. Discusión

Consistente con los estudios preliminares se presentaron dos tipos de curva esfuerzo-tiempo, donde el primer tipo de curva se observa un esfuerzo aproximadamente lineal en la fase de aplicación del desplazamiento, mientras que en el segundo tipo las caídas y recuperaciones durante la fase de aplicación del desplazamiento se pueden atribuir a las fracturas y desprendimiento de fibras en el material.

No se incluyó en el análisis la influencia de la humedad de la probeta y la humedad relativa del ambiente en el momento de realizar los experimentos. Los efectos de la humedad pueden llegar a ser significativos en la prueba.

Existe una correlación entre las propiedades mecánicas de la guadua y los niveles de deformación. A mayor nivel de deformación (entre 1 y 2 mm), los valores de σ_{max} , σ_y , DU , ε_p aumentan 30%, 20%, 33% y 60% respectivamente.

Para los niveles de velocidad propuestos en este trabajo, las propiedades mecánicas no dependen de la velocidad de aplicación de la carga, lo cual es consistente con los resultados de las pruebas piloto. Para detectar si los resultados son sensibles a la velocidad se deben hacer más experimentos a distintas velocidades que las propuestas en este trabajo.

A partir de los cinco días de recuperación, algunas probetas presentaron cambios volumétricos inducidos por la humedad del ambiente. Las probetas tuvieron una recuperación de entre el 16 y 39% de la deformación aplicada.

CAPITULO 3. MODELO TEORICO Y AJUSTE

3.1. Formulación del modelo teórico

Se adoptó un modelo generalizado de Maxwell con 3 ramas en serie con un elemento plástico (Fig. 3.1). Al estar en serie se considera que los esfuerzos en el elemento plástico σ_p y del elemento viscoelástico σ_v son iguales (Ecuación 11). La deformación total es la suma de la deformación plástica ε_p y la deformación viscoelástica ε_v (Ecuación 12).

$$\sigma_p = \sigma_v \quad (11)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_p + \varepsilon_v \quad (12)$$

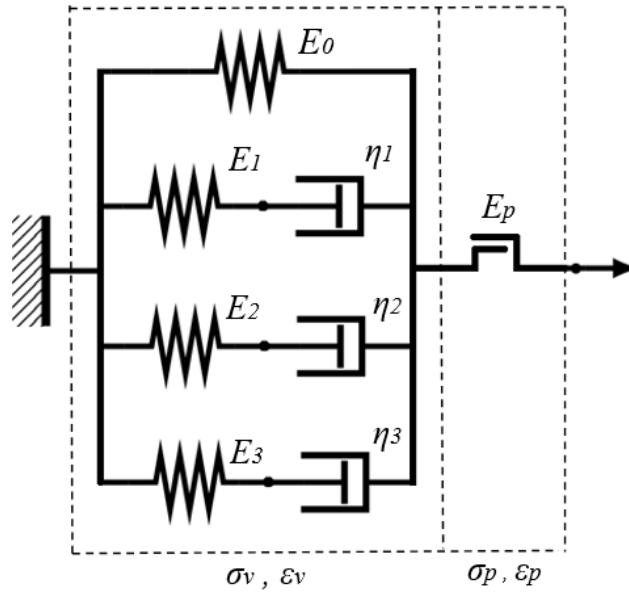


Figura 3.1 Modelo visco-elasto-plástico adoptado. Fuente: propia

Donde E_0 es el módulo de equilibrio, E_1, E_2, E_3 son los módulos de elasticidad de cada rama, η_1, η_2, η_3 son los coeficientes de viscosidad de cada rama y E_p es la constante que caracteriza al elemento plástico.

El módulo de relajación del modelo viscoelástico se presentó en la Ecuación 7. De este modo remplazando los datos, tenemos que la función de relajación está dada por:

$$E(t) = E_0 + E_1 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}} + E_2 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_2}} + E_3 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_3}} \quad (13)$$

Donde τ_i son los tiempos de relajación de cada rama, los cuales fueron fijados en $\tau_1 = 0.15 \text{ s}$, $\tau_2 = 15 \text{ s}$, $\tau_3 = 150 \text{ s}$, con la intención de para capturar adecuadamente tanto la respuesta a corto plazo como a largo plazo del material (Caicedo, J., 2021).

El comportamiento típico del modelo en la fase de compactación y relajación se muestra en la Fig. 3.2. La deformación total está compuesta por la deformación plástica y viscoelástica. Determinar experimentalmente las contribuciones de cada componente durante toda la historia de carga es complejo. Sin embargo, en los ensayos se registró la máxima deformación plástica (ε_p) alcanzada al final de la recuperación. Con el fin de establecer un procedimiento sencillo, se supuso que la deformación plástica sólo se produce cuando se aplica la carga y se mantiene constante durante las fases de sostenimiento y descarga. Además, se supuso un comportamiento lineal en la fase de compactación.

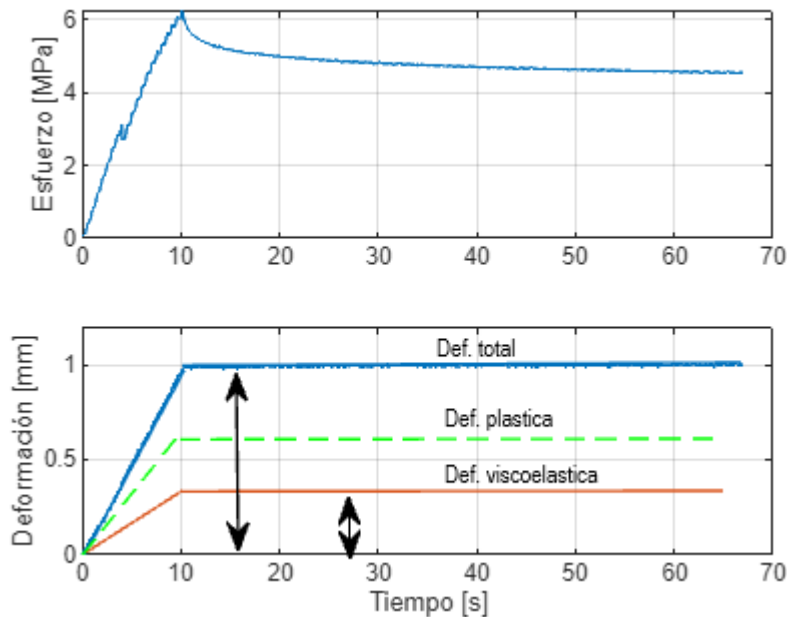


Figura 3.2 Comportamiento típico del modelo en la fase de compactación y relajación.

En este caso la curva de deformación viscoelástica se propone como una recta ascendente durante la fase de compactación hasta alcanzar el pico de esfuerzo, a partir del cual permanece constante (Fig. 3.2). Se puede expresar como una combinación de funciones de Heaviside de la siguiente forma:

$$\varepsilon_v(t) = V \cdot t \cdot H(t) - V \cdot (t - t_1) \cdot H(t - t_1) \quad (15)$$

Donde t es el tiempo, t_1 es el tiempo donde se alcanza la máxima deformación viscoelástica, V es la velocidad de la deformación viscoelástica y $H(t)$ es la función de Heaviside. Conociendo la máxima deformación plástica (ε_p) y el tiempo donde ocurre el pico de esfuerzo (t_1), se puede calcular la pendiente de la recta que corresponde al valor de la velocidad de deformación viscoelástica (V). Si se calcula la derivada de la función de deformación viscoelástica se tiene que:

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = V * [H(t) - H(t - t_1) + t \cdot \delta(t) - (t - t_1) \cdot \delta(t - t_1)] \quad (16)$$

Donde $\delta(t)$ es la función delta de Dirac.

Reemplazando la Ecuación 13 y la Ecuación 16 en la integral hereditaria (Ecuación 9) y resolviendo la integral, asumiendo la deformación inicial cero; se tiene que la función de esfuerzo vs tiempo está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \sigma(t) = H(t - t_1) \cdot \left[\sum_{i=1}^3 E_i \cdot V \cdot \left(e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_i}} - 1 \right) - E_0 \cdot V \cdot (t - t_1) \right] \\ - H(t) \cdot \left[\sum_{i=1}^3 E_i \cdot V \cdot \tau_i \left(e^{-\frac{t}{\tau_i}} - 1 \right) - E_0 \cdot V \cdot t \right] \end{aligned} \quad (17)$$

3.2. Determinación de las constantes del modelo

A partir de los resultados experimentales y las consideraciones del modelo. Las velocidades de deformación viscoelástica se calculan como la división entre la máxima deformación viscoelástica y el tiempo t_1 . Los datos conocidos se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Desplazamiento aplicado (Δ), desplazamiento plástico (ε_p), desplazamiento viscoelástico (ε_v), y constantes V y t_1 en las pruebas definitivas.

Grupo	Δ [mm]	ε_p [mm]	ε_v [mm]	t_1 [s]	V [mm/s]
A	2.00	0.77	1.23	20.00	0.0615
B	1.50	0.50	1.01	15.00	0.0670
C	1.00	0.26	0.74	10.00	0.0745
D	2.00	0.55	1.46	30.00	0.0485
E	1.50	0.39	1.11	22.50	0.0493
F	1.00	0.16	0.84	15.00	0.0560
G	2.00	0.63	1.37	60.00	0.0228
H	1.50	0.40	1.10	45.00	0.0244
I	1.00	0.25	0.75	30.00	0.0250

Los tiempos de relajación τ_i se fijaron en $\tau_1 = 0.15s$, $\tau_2 = 15s$, $\tau_3 = 150s$, con la intención de para capturar adecuadamente tanto la respuesta a corto plazo como a largo plazo del material (Caicedo, J., 2021). De este modo Las variables a determinar en el modelo son E_0, E_1, E_2, E_3 . Se programó un algoritmo de optimización en el software MATLAB implementando la función *fminsearch* el cual minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores experimentales y teóricos.

La calidad del ajuste se determinó utilizando el coeficiente de determinación calculado como:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SS_{tot}} \quad (18)$$

Donde SSE es la suma de cuadrados del error entre los valores experimentales y ajustados y SS_{tot} es la suma total de cuadrados de los valores experimentales.

3.3. Resultados

Los promedios de las constantes a optimizar se presentan en la Tabla 7. Las constantes η_1, η_2, η_3 se calculan a partir de la relación entre los tiempos de relajación τ_i y los valores de E_i encontrados.

Tabla 7. Constantes del modelo de Maxwell obtenidas, El coeficiente de variación está incluido entre paréntesis.

Grupo	E0 [MPa]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	η_1 [MPa.s]	η_2 [MPa.s]	η_3 [MPa.s]	R ²
A	6.81 (12.78)	300.39 (45.34)	3.78 (37.79)	0.90 (14.81)	45.06 (45.34)	56.75 (37.79)	135.17 (14.81)	0.85 (9.74)
B	9.44 (17.02)	252.20 (46.44)	3.73 (32.04)	1.33 (18.90)	37.83 (46.44)	56.02 (32.04)	199.70 (18.90)	0.87 (6.64)
C	14.91 (18.13)	189.97 (40.27)	4.51 (27.77)	2.40 (17.32)	28.50 (40.27)	67.64 (27.77)	359.79 (17.32)	0.93 (5.17)
D	8.87 (15.96)	384.80 (51.22)	5.96 (15.96)	1.24 (17.73)	57.72 (51.22)	89.36 (29.14)	185.97 (17.73)	0.88 (8.71)
E	11.64 (14.97)	418.64 (46.90)	5.93 (23.49)	1.59 (18.40)	62.80 (46.90)	89.01 (23.49)	239.07 (18.40)	0.89 (4.34)
F	25.14 (17.00)	297.35 (59.49)	8.84 (39.12)	3.78 (30.83)	44.60 (59.49)	132.63 (39.12)	566.28 (30.83)	0.93 (4.47)
G	8.62 (14.12)	678.46 (52.10)	14.83 (17.93)	0.39 (76.17)	101.77 (52.10)	101.77 (17.93)	59.10 (76.17)	0.84 (9.39)
H	11.57 (16.84)	464.57 (48.00)	12.46 (17.67)	1.44 (25.25)	69.69 (48.00)	186.87 (17.67)	215.62 (25.25)	0.90 (7.38)
I	15.19 (9.86)	437.28 (62.95)	11.40 (14.51)	1.81 (27.06)	65.59 (62.95)	171.06 (14.51)	272.22 (27.06)	0.92 (3.50)

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para encontrar diferencias significativas entre las variables ajustadas y las variables de control. Se encontró que el módulo de equilibrio E_0 depende directamente del nivel de deformación. Para deformaciones menores los valores de E_0 aumentan, como se muestra en la Fig. 3.3. Esto indica que el material después de que todas las ramas viscoelásticas se han relajado, ofrece una mejor resistencia a la deformación que una probeta que haya sido sometida a una mayor deformación.

El modulo E_3 presentó diferencias significativas como se muestra en la Fig. 3.3, mostrando una relación directa. Entre menores sean las deformaciones el valor de E_3 va a aumentar. Esto indica que la rama 3 presenta una respuesta inicial más alta. E_1 y E_2 no presentaron diferencias significativas respecto a la deformación. El ajuste de los modelos mejoró de manera significativa en niveles de deformación más bajos (Fig. 3.3). Esto ocurre porque en los niveles de deformación altos aumenta la probabilidad de que hubiera caídas repentinas de esfuerzo debido al colapso de fibras internas.

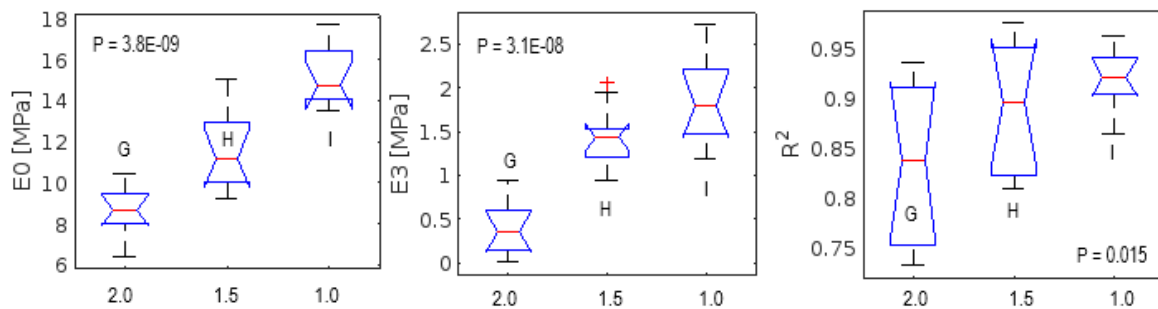


Figura 3.3 Resultados del análisis de varianza para diferentes deformaciones.

El nivel de ajuste estuvo condicionado a la aparición de fracturas en la estructura interna del material. Las fracturas inducen caídas repentinas de esfuerzo, esto es negativo para el ajuste debido a que induce incertidumbre a los datos experimentales. En la fig. 3.4 se observa la comparación de un ajuste de un ensayo en el que no se presentó fracturas y uno en el que sí. Se observa que el ensayo que no tuvo fracturas presentó un nivel de ajuste de $R^2 = 0.9872$, muy elevado comparado al $R^2 = 0.7686$ en el modelo que si se presentaron. Las fracturas hacen que el ensayo llegue a su pico máximo antes de que empiece la relajación lo cual es incompatible con este modelo, por eso presenta un ajuste pobre.

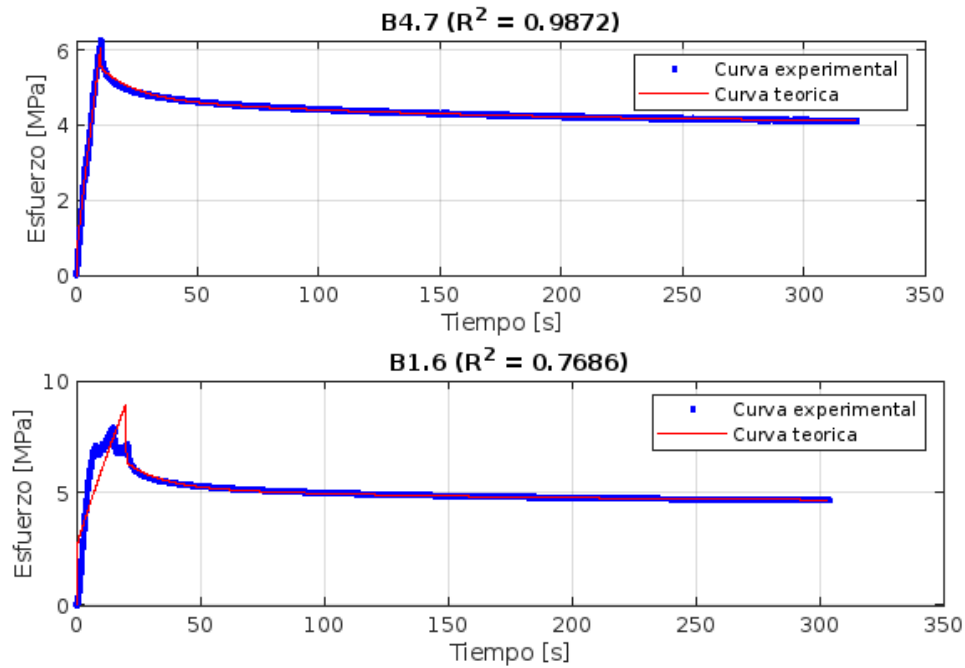


Figura 3.4 Comparación entre el nivel de ajuste en ensayos sin fractura y con fractura

También se realizó el análisis de varianza (ANOVA) para encontrar relación entre las variables de control y la velocidad de aplicación de la carga. Se encontró que el módulo E_0 presenta diferencias significativas como se muestra en la Fig. 3.5, sin embargo, no se establece una correlación clara. Estas diferencias significativas pueden darse por la heterogeneidad del material. En el caso de los módulos E_1 y E_2 sus valores dependen de la velocidad. Entre menor es la velocidad de aplicación estos valores aumentan. En velocidades bajas las ramas 1 y 2 contribuyen significativamente a la resistencia inicial del material a la deformación. Esto se traduce en una respuesta inmediata fuerte a la aplicación de carga. Por su parte E_3 presenta diferencias significativas, pero no existe correlación entre los valores y la velocidad de aplicación.

El ajuste R^2 no presenta diferencias significativas con respecto a la velocidad.

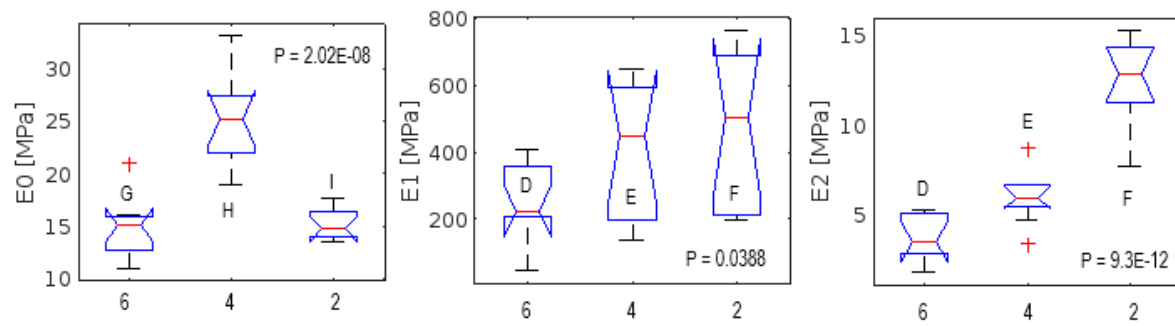


Figura 3.5 Resultados del análisis de varianza para diferentes velocidades de deformación.

CAPITULO 4. CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo presenta resultados precisos ($0.85 < R^2 < 0.93$) para rangos de entre el 5% y el 10% de deformación, a partir del 10% la precisión del modelo puede disminuir. Estas limitaciones se deben a la mayor aparición de grietas en las fibras internas que se traducen en incertidumbre del comportamiento del material. Este agrietamiento es de naturaleza aleatoria por tanto es altamente complejo modelarlo y este modelo no es suficiente.

El modelo es eficaz bajo condiciones de carga en el sentido circunferencial, las cuales son comunes en uniones tipo abrazadera. Este tipo de uniones reúne las condiciones de carga necesarias para que el modelo funcione ya que presentan una fase de carga (ajuste de la abrazadera) y una fase de relajación cuando la abrazadera ya fue ajustada.

El modelo no se ha probado en condiciones ambientales diferentes a las de laboratorio. Tampoco ha sido probado bajo cargas dinámicas. Por tanto, no se garantiza la eficacia bajo otras condiciones distintas a las presentadas en este trabajo.

Este modelo se podría extrapolar a otros materiales con un comportamiento similar al de la guadua siguiendo el mismo procedimiento propuesto para caracterizar las constantes. También podría ser útil para caracterizar el comportamiento visco-elasto-plástico de la guadua en cualquier otro sentido de carga. Es recomendable la realización de ensayos adicionales en caso de que el modelo se use para nuevas aplicaciones o en diferentes condiciones de carga.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una correlación alta entre las curvas del modelo y los datos experimentales, con coeficientes de correlación R^2 entre 0.85 y 0.94, lo que indica capacidad alta del modelo para representar el comportamiento visco-elasto-plástico de la guadua de manera realista.

Tanto el esfuerzo máximo (promedios de 5.4, 6.5, 7.9 MPa, para deformaciones de 1.0, 1.5 y 2.0 mm, respectivamente) como la deformación plástica (0.22, 0.43, y 0.65 mm para deformaciones de 1.0, 1.5 y 2.0 mm, respectivamente) mostraron diferencias significativas con respecto al incremento de la deformación.

Los rangos de módulos de elasticidad circunferencial, esfuerzos máximos, límites elásticos, índice de ductilidad y porcentaje de deformación plástica fueron 159-263 [MPa], 4.3-8.3 [MPa], 1.4-6.2 [MPa], 1.3-2.1 y 16-38%, respectivamente. El esfuerzo máximo σ_{max} y límite elástico σ_y presentan coeficientes de variación relativamente bajos, mientras que el coeficiente de variación es mayor para los otros parámetros mecánicos, lo que podría considerarse aceptable para materiales naturales. No obstante, algunos grupos presentaron coeficientes de variación mayores para la ductilidad DU y deformación plástica ε_p , por tanto, los promedios no son representativos. El módulo de elasticidad E presentó coeficientes de variación cercanos al 30% (límite aceptable en materiales naturales).

Se encontraron rangos para los valores del modelo. El módulo de equilibrio E_0 presentó entre 6.8 – 25.1 [MPa], para los valores E_1, E_2, E_3 , rangos de 189.9–678.5 [MPa], 3.7-14.8 [MPa] y 0.9-3.8 [MPa] respectivamente. Los tiempos de relajación τ_1, τ_2, τ_3 de cada rama fueron fijados en 0.15, 15 y 150 [s] respectivamente.

Aunque el modelo es robusto, existen limitaciones inherentes debido a la naturaleza no lineal y dependiente del tiempo de los materiales compuestos como la guadua. El nivel de ajuste estuvo condicionado a la aparición de fracturas en la estructura interna del material. Las fracturas inducen caídas repentinas de esfuerzo, esto es negativo para el ajuste debido a que induce incertidumbre a los datos experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

Añazco, M. & Rojas, S. (2015). Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú (*Guadua angustifolia*) en Perú. Ecuador.

Balart, R., Montañez, N., Quiles, L. (2011). Viscoelasticidad. Modelo básico de Maxwell. Valencia – España.

Barnes, H., Hutton, J., Walters, K. (1993). "An introduction to rheology", Tercera ed. Ámsterdam – Neederlands.

Caicedo, J., Casanova, F., Garcia, JJ. (2021). Visco-elastic-plastic model to represent the compression behaviour of sugarcane agricultural residue. Cali – Colombia.

Chavarro, S. (2016). Deflexiones de la *Guadua angustifolia* Kunth para culmos sometidos a esfuerzos por flexión con cargas permanentes en el ambiente de Bogotá. Modelo de Burger y modelo de Findley. Bogotá – Colombia

De Vos, V. (2010). Comparing Mechanical Properties of Bamboo: *Guadua* vs *Moso*. Leeuwarden – Netherlands.

García J.J., Luis F. Zuluaga, Daniel Gomez, 2022. Relaxation tests on rings and part of rings to assess the behavior of *Guadua angustifolia* under sustained transverse loading.

Hidalgo Lopez, Oscar (2004). *Bamboo The gift of the gods*, ediciones villegas editores, Bogotá Colombia.

Janssen, Jules J. A. (2000). *Designing and building with bamboo*. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan.

Jiménez, R., 2001. Investigaciones sobre *Guadua angustifolia Kunth* realizadas en Colombia. Bogotá Colombia.

Kelly, P. (2013). Solid mechanics part I: An introduction to solid mechanics. Auckland – New Zeland.

Linares, J.D. 2019. Beneficios Ecológicos de la guadua como material de construcción. Bogotá – Colombia.

Lopez, L., Correal, J. 2009. Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua angustifolia* como material estructural. Bogotá – Colombia.

Orozco, G., Villegas, L., García, J.J., 2012. Mechanical behavior of bamboo species *Guadua angustifolia* under compression along the thickness of the culm.

Osorio, J., Vélez, J., Ciro, H. (2007). ESTRUCTURA INTERNA DE LA GUADUA Y SU INCIDENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS. Medellín – Colombia.

Salas Delgado, Eduardo (2015). Puentes de Bambú – *Guadua* Innovación tecnológica e Ingeniería de la guadua. Madrid – España.

Vanegas, O., Días, F., Cendales, M. (2019). Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la guadua *Angustifolia Kunth*. Bogotá – Colombia.

Villegas González, F. (2005). Comparación consumos de recursos energéticos en la construcción de vivienda social: guadua vs. concreto.

Zuluaga, L. (2022). Derivadas fraccionarias para analizar la viscoelasticidad de la guadua en el plano transversal. Cali – Colombia.