

**DETERMINACIÓN DE LA FUERZA CORTANTE NECESARIA PARA SECCIONAR  
LLANTAS USADAS**

**SANTIAGO ANDRES HERNANDEZ PUERTO**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO.**

**ORIENTADO:**

**OSCAR CHAMARRAVI GUERRA**

**INGENIERO MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIRÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA**

**BOGOTÁ D.C**

**2024**

**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

---

---

Firma del director

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. agosto de 2024

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. Mario Posada García-Peña**

Consejero Institucional

**Dr. Luis Jaime Posada García-Peña**

Vicerrectora Académica

**Dra. María Fernanda Vega de Mendoza**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo**

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

**Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo**

Secretario general

**Dr. José Luis Macías Rodríguez**

Decano de la Facultad de Ingenierías

**Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto**

Director del Departamento de Ingeniería Mecánica Ing.

**María Angélica Acosta Pérez**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar el trabajo de grado titulado “*Determinación de la fuerza cortante necesaria para seccionar llantas usadas*” en primer lugar, mi profundo agradecimiento va a mi familia por su apoyo incondicional y amor, han sido pilar durante toda mi carrera profesional como ingeniero mecánico inicialmente a mi familia por acompañarme en todo el proceso del desarrollo de mi carrera profesional como ingeniero mecánico y su gran comprensión; Agradezco de manera especial al profesor Oscar Chamarravi Guerra , por ser mi guía y mentor en este gran proyecto de grado. Su experticia, conocimientos y valiosos consejos que aportaron en mi crecimiento académico y profesional.

También quiero expresar mi gratitud a mi novia, Tatiana. En los momentos de confusión y desafío a lo largo de mi carrera, su apoyo y orientación fueron un faro que iluminó mi camino. Su motivación y aliento me impulsaron a no rendirme y a seguir adelante, alcanzando el éxito en este proyecto de grado.

Finalmente, con orgullo le dedico este logro a los que contribuyeron en mi formación académica, la Universidad de América, que con todas las enseñanzas dadas no solo aportó en mi aprendizaje profesional sino en mis habilidades como persona, ¡Gracias por ser mi mayor motivación y por hacer posible este sueño hecho realidad!

Con mucha gratitud y cariño

***Santiago Andrés Hernández Puerto***

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	13
1.1. Objetivo general	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. PLANTEAMIENTO	14
2.1. Estado del arte	14
2.1.1. <i>Introducción</i>	14
2.1.2. <i>Normativas y métodos</i>	14
2.1.3. <i>Investigaciones y hallazgos</i>	15
2.2. Componentes de las llantas	16
2.3. Generalidades de las llantas	17
2.4. Reciclaje de las llantas	18
3. MARCO TEÓRICO	21
3.1. Morfología de la llanta	21
3.2. Esfuerzo cortante	23
3.3. Anisotropía	26
3.4. Elasticidad del caucho	27
3.5. Extensometría	28
4. METODOLOGÍA	30
4.1. Estimación de tamaño muestral	30
4.1.1. <i>Cálculo de potencia estadística</i>	31
4.1.2. <i>Descripción de la función R</i>	32

4.2.	Definición de probetas a tensión norma ISO 37	37
4.3.	Definición de probetas esfuerzo cortante	42
5.	PROCESO EXPERIMENTAL	46
5.1.	Corte de muestras	46
5.2.	Extensometría por correlación de imágenes	48
5.3.	Preparación de muestras	50
5.4.	Montaje de laboratorio	53
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
6.1.	Código para análisis en R	55
6.2.	Probetas sometidas a tensión uniaxial	57
6.2.1.	<i>Ensayo ISO 45</i>	57
6.2.2.	<i>Ensayo ISO vertical</i>	63
6.2.3.	<i>Ensayo ISO horizontal</i>	68
6.2.4.	<i>Diferencias y consideraciones</i>	72
6.3.	Probetas sometidas a ensayo cortante	75
6.3.1.	<i>Ensayo esfuerzo cortante 45°</i>	76
6.3.2.	<i>Ensayo esfuerzo cortante vertical</i>	81
6.3.3.	<i>Ensayo esfuerzo cortante horizontal</i>	86
6.4.	Graficas Obtenidas	92
7.	CONCLUSIONES	98
	REFERENCIAS	101
	ANEXOS	105

## LISTA DE FIGURAS.

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Estructura de la llanta</i>	22
Figura 2 <i>Esfuerzo cortante</i>	25
Figura 3 <i>Código en programa R para el cálculo de tamaño muestral.</i>	33
Figura 4 <i>Diseño de probeta</i>	38
Figura 5 <i>Guía de medidas ISO 37</i>	39
Figura 6 <i>Probetas ISO37</i>	41
Figura 7 <i>Malla interna de la llanta</i>	42
Figura 8 <i>Referencia para diseño probetas esfuerzo cortante</i>	43
Figura 9 <i>probeta diseñada</i>	44
Figura 10 <i>Corte por CNC</i>	47
Figura 11 <i>Probeta ensayos cortantes</i>	48
Figura 12 <i>Mapeo y grafica de GOM</i>	49
Figura 13 <i>Programa GOM</i>	50
Figura 14 <i>probetas ISO listas para ensayo</i>	51
Figura 15 <i>Probeta ISO 37</i>	52
Figura 16 <i>Fracturas Probetas</i>	53
Figura 17 <i>Maquina universal de ensayos</i>	54
Figura 18 <i>Código R para análisis de resultados</i>	55
Figura 19 <i>Histograma, QQ-Plot de Esfuerzo Rstudio</i>	59
Figura 20 <i>Histograma y QQ-Plot de Fuerza Máxima (N)</i>	60
Figura 21 <i>boxplot esfuerzo</i>	61
Figura 22 <i>Fuerza- Alargamiento probeta 1 ISO 37 45°</i>	62
Figura 23 <i>Graficas R estudio</i>	64
Figura 24 <i>histograma y qq plot fuerza</i>	66
Figura 25 <i>boxplot esfuerzo</i>	67
Figura 26 <i>Histograma y QQ-Plot Ensayo ISO 37 Horizontal</i>	69
Figura 27 <i>Histograma y QQ-plot Fuerza ensayo ISO 37 Horizontal</i>	70
Figura 28 <i>Boxplot de esfuerzo por Muestra Ensayo ISO 37 Horizontal</i>	71



Figura 29 <i>histograma y QQ plot Cortante 45°</i>	78
Figura 30 <i>Boxplot</i>	79
Figura 31 <i>histograma y QQ plot Cortante</i>	81
Figura 32 <i>histogramas y qqplot</i>	83
Figura 33 <i>histogramas y qqplot</i>	84
Figura 34 <i>Estadísticos de prueba</i>	85
Figura 35 <i>box plot</i>	86
Figura 36 <i>histograma y qq plot</i>	88
Figura 37 <i>Histograma y QQ Plot</i>	90
Figura 38 <i>Boxplot</i>	91
Figura 39 <i>grafica esfuerzo vs alargamiento</i>	92
Figura 40 <i>grafica esfuerzo vs alargamiento</i>	93
Figura 41 <i>grafica esfuerzo vs alargamiento</i>	94
Figura 42 <i>Probeta fracturada</i>	95
Figura 43 <i>Graficas esfuerzo deformación</i>	96
Figura 44 <i>capas de probeta fracturada</i>	97
Figura 45 <i>Imagen prueba de laboratorio probetas esfuerzo cortante antes de iniciar</i>	107
Figura 46 <i>Imágenes de procesamiento en GOM</i>	108

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Numero de muestras y Potencia</i>	35
Tabla 2 <i>Medidas según tipo ISO 37</i>	39
Tabla 3 <i>Datos obtenidos del ensayo ISO 37 PROBETAS 45°</i>	58
Tabla 4 <i>Resultado pruebas de normalidad Esfuerzo (<math>\sigma</math>)</i>	59
Tabla 5 <i>Resultados de normalidad para Fuerza Máxima</i>	60
Tabla 6 <i>Valores para análisis ISO Vertical</i>	63
Tabla 7 <i>Estadísticos de prueba</i>	64
Tabla 8 <i>estadísticos de prueba</i>	65
Tabla 9 <i>Resultados ensayo ISO37 Horizontal</i>	68
Tabla 10 <i>Pruebas de normalidad Esfuerzo ensayo ISO37 Horizontal</i>	69
Tabla 11 <i>Ensayo ISO 37 Diagonal</i>	73
Tabla 12 <i>Ensayo ISO 37 Vertical</i>	74
Tabla 13 <i>Ensayo ISO 37 Horizontal</i>	74
Tabla 14 <i>Ensayo Probetas Cortante a 45°</i>	77
Tabla 15 <i>Estadísticos de prueba ensayo cortante</i>	78
Tabla 16 <i>Estadísticos de prueba ensayo cortante</i>	80
Tabla 17 <i>ensayo esfuerzo cortante vertical</i>	82
Tabla 18 <i>Estadísticos de prueba</i>	83
Tabla 19 <i>ensayo cortante horizontal</i>	87
Tabla 20 <i>Estadísticos de prueba</i>	87
Tabla 21 <i>Estadísticos de prueba</i>	89
Tabla 22 <i>Registro de mayores y menores valores de la fuerza reportada</i>	99

## RESUMEN

En la actualidad, se ha tomado gran interés en la reutilización de las llantas debido a su impacto ambiental negativo, debido a que no se descomponen y emiten gases de efecto invernadero como el metano. Según la Unión Internacional para la conservación de la Naturaleza, las llantas representan el 28% de los desechos micro plásticos en los océanos [20]

Este trabajo tiene como objetivo determinar la fuerza de corte requerida para los neumáticos de referencia 205/50/R16 con un índice de carga de 87, con el fin de promover el reciclaje y la recuperación de materiales. Para lograrlo, se diseñaron experimentos utilizando muestras cortadas en diferentes secciones de la banda de rodadura, en dirección perpendicularmente, vertical como horizontalmente, mediante extensometría por correlación de imágenes, técnica usada para evaluar las deformaciones o cambios de las dimensiones en la probeta del material sometido a tensión uniaxial; con el fin de lograr análisis detallados de las fuerzas y tiempos registrados durante el proceso de ensayo.

Esta investigación no solo se enfoca en determinar la fuerza necesaria para el corte, sino que también analiza el comportamiento de las partes internas del neumático, en especial el comportamiento de las capas internas que forman parte de su estructura con el fin de analizar cómo se comporta el neumático durante el proceso de corte y cómo afecta esto a la resistencia y durabilidad del material.

*Palabras claves:* Fuerza de corte, Neumático, reciclaje, elasticidad, extensometría

## INTRODUCCIÓN

Los desafíos globales relacionados con la gestión de residuos y la búsqueda de soluciones sostenibles en el reciclaje de llantas usadas han adquirido una importancia creciente. Según cifras proporcionadas por el ministro de Medio Ambiente, Gabriel Vallejo (2015), cada año se queman aproximadamente cinco millones de neumáticos en Colombia, lo que ha generado un problema de salud pública debido al aumento de afecciones respiratorias, especialmente en Bogotá. La industria de los neumáticos es de constante crecimiento y su impacto ambiental ha puesto de relieve la necesidad de abordar adecuadamente el manejo de estos materiales. Es fundamental promover prácticas que contribuyan a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. En particular, el ODS 12: "Producción y consumo responsables", hace un llamado a implementar prácticas sostenibles en la gestión de residuos y a promover la economía circular, buscando reducir el impacto ambiental de los materiales desechados, como los neumáticos.

La determinación precisa de la fuerza cortante requerida para seccionar llantas de diferentes tipos y tamaños es fundamental para optimizar los procesos de corte. Este estudio experimental tiene como objetivo analizar las variables que afectan el corte de neumáticos, utilizando una máquina universal de ensayos para determinar la fuerza y el esfuerzo cortante en las secciones de llantas usadas en la prueba.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. Objetivo general**

Determinar la fuerza cortante necesaria para seccionar llantas usadas mediante la realización de un estudio experimental para analizar las variables que afectan el corte de neumáticos usando la maquina universal de ensayos.

### **1.2. Objetivos específicos**

1. Definir las variables que afectan el corte en los neumáticos usados en una maquina universal de ensayos y determinar el tamaño muestral, mediante el lenguaje de programación R
2. Realizar pruebas experimentales que permitan evaluar las variables que afectan el corte de neumáticos, partiendo de los resultados obtenidos de la maquina universal de ensayos.
3. Determinar la fuerza y el esfuerzo cortante aplicados a diferentes ángulos en las pruebas de los neumáticos usados.

## 2. PLANTEAMIENTO

### 2.1. Estado del arte

#### 2.1.1. *Introducción*

La acumulación y manejo inadecuado de los neumáticos usados representan un grave problema ambiental a nivel global y local. Según la organización internacional del trabajo, se estima que cada año se desechan más de mil millones de neumáticos en todo el mundo contribuyendo significativamente a la contaminación ambiental y la propagación de enfermedades [10] estos residuos no solo ocupan espacio en los vertederos, sino que su lenta degradación y potencial para liberar sustancias tóxicas complican aún más su manejo [2].

En Colombia, la situación no es diferente, La ciudad de Bogotá, por ejemplo, enfrenta graves desafíos relacionados con la gestión de llantas usadas. A pesar de los esfuerzos del gobierno para implementar políticas de manejo adecuado, la eficacia de estas medidas ha sido limitada y la ciudad sigue lidiando con la disposición inadecuada de estos residuos [1]

#### 2.1.2. *Normativas y métodos*

Normas internacionales aplicables: la norma ISO 37 establece los métodos estándar para evaluar las propiedades de tracción de los cauchos vulcanizados, asegurando la consistencia y comparabilidad de los resultados entre diferentes estudios [11]. En el contexto de la evaluación de los neumáticos usados, esta norma es fundamental para garantizar que los ensayos sean válidos y reproducibles. Además, la norma ASTM B831-22 proporciona un marco para realizar ensayos de esfuerzo cortante en productos de aleación de aluminio, lo que también puede aplicarse en la evaluación de materiales como el caucho de neumáticos

Metodología de ensayo de esfuerzo cortante: los ensayos de esfuerzo cortante se realizan siguiendo estrictamente los procedimientos de la norma ISO 37 para asegurar la integridad y validez de los resultados, se preparan probetas específicas de caucho extraído de neumáticos usados y se someten a pruebas bajo condiciones controladas. Esto permite una evaluación precisa de las propiedades mecánicas del material, lo cual es crucial para diseñar sistemas de reciclaje eficientes [11].

### ***2.1.3. Investigaciones y hallazgos***

Estudios de fuerza de corte en neumáticos: diversos estudios han abordado la determinación de la fuerza de corte en neumáticos usados, revelando una considerable variabilidad en los resultados. Por ejemplo, Erazo et al. en la universidad técnica del norte, Ecuador, realizaron ensayos para estimar la fuerza de corte en neumáticos Rin 14, encontrando que la banda de rodadura tiene una resistencia al corte aproximadamente un 50% mayor que la cara lateral, Basándose en un estudio de mercado, se identificaron las marcas más vendidas y se recopilieron datos sobre las características de cada llanta, como el tamaño del rin, índice de carga y las dimensiones [2]. Se cortaron probetas del costado de la llanta y de la banda de rodadura, cada una de 100 x 200 mm, y se dividieron en 8 partes iguales. Utilizando una prensa hidráulica y un punzón de HSS de 8 mm de diámetro, se realizaron perforaciones en cada una de las secciones de la probeta [9].

Como resultado de los ensayos de perforación, se determinó que la resistencia al corte de la banda de rodadura es aproximadamente un 50% mayor que la resistencia de los costados de la llanta. Esto indica que la banda de rodadura es la parte con mayor resistencia a la tracción [9]. Los datos obtenidos concluyen que la fuerza promedio necesaria para cortar los neumáticos es de 2630 N para la banda de rodadura y de 1100 N para la cara lateral [9].

Estos resultados son consistentes con otros estudios que también han reportado variaciones significativas en las fuerzas de corte necesarias, lo que subraya la necesidad de datos específicos y detallados para mejorar los procesos de reciclaje [9]

Comparación de métodos y resultados: la revisión de la literatura revela que las metodologías de ensayo y las condiciones específicas pueden influir considerablemente en los resultados de las pruebas de fuerza de corte. La norma ASTM B831-22 por ejemplo, resalta la importancia de seguir procedimientos estandarizados para asegurar la comparabilidad de los datos obtenidos, lo que es esencial para el diseño y la optimización de equipos de reciclaje [11]. Aplicaciones de los resultados: los datos obtenidos de los ensayos de esfuerzo cortante son fundamentales para el diseño de máquinas trituradoras de neumáticos y para la selección de métodos de procesamiento adecuados. Estos avances no solo mejoran la eficiencia del reciclaje de neumáticos, sino que también abren nuevas oportunidades para utilizar caucho reciclado en aplicaciones industriales, como la fabricación de pavimentos y productos de construcción [7].

Beneficios económicos y ambientales: la mejora en los métodos de reciclaje de neumáticos puede traer significativos beneficios económicos y ambientales. Por un lado, se reduce la cantidad de residuos que terminan en los vertederos y se promueve el desarrollo de nuevos productos reciclados que pueden generar ingresos adicionales y reducir la dependencia de materiales vírgenes [7].

Desafíos en la determinación de la fuerza de corte: la determinación precisa de la fuerza de corte presenta varios desafíos, incluyendo la variabilidad en la composición de los neumáticos y la complejidad de los métodos de ensayo. Es esencial seguir investigando para desarrollar técnicas más precisas y fiables que permitan una mejor caracterización del caucho reciclado y optimizar los procesos de reciclaje [8].

Direcciones futuras de investigaciones: las futuras investigaciones deben centrarse en mejorar la eficiencia de los métodos de reciclaje y en desarrollar estándares más rigurosos para la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales reciclados. También es crucial investigar nuevas aplicaciones industriales para el caucho reciclado y explorar formas de reducir aún más el impacto ambiental de los neumáticos usados [8].

## **2.2. Componentes de las llantas**

Los componentes de un neumático son estructurados por una combinación de un elastómero termoplástico y acero como elementos principales. Los neumáticos son clasificados de acuerdo con su tipo de construcción como: de capas diagonales, de diagonal con cinturones y de capas radiales; se conforman de refuerzo cubiertos con caucho, los refuerzos tienen una elasticidad más reducida que el caucho para controlar su comportamiento. La principal diferencia entre los tipos de neumáticos es la dirección y los tipos de refuerzo.

Las llantas para utilizar en la investigación son de capas radiales, de refuerzos provistos por los neumáticos de capas diagonales y de diagonal con cinturones, tienen capas de cinturones orientadas radialmente [21].

En cuanto a las partes principales que forman un neumático se pueden citar la banda de rodadura, el flanco, el aro de talón y el hombro



La banda de rodadura es la capa exterior del neumático, está en contacto directo con la superficie de la carretera, está diseñado con un patrón de surcos y bloques que brindan tracción y agarre, asegurando un buen desempeño en diversas condiciones como lluvia o nieve.

Los cinturones están hechos de materiales como acero o fibras sintéticas y brindan estabilidad estructural al neumático, mejorando la dirección y el control.

La carcasa es la estructura interna del neumático y consta de varias capas, normalmente de materiales textiles o acero, da la fuerza y soporte a la banda de rodadura y las correas, mantiene la forma del neumático y absorbe los impactos.

La parte inferior del neumático que se ajusta y se sujeta firmemente a la llanta, es la membrana que es necesaria para asegurar una correcta conexión entre la llanta, evitando que se deshaga durante el uso. Las paredes laterales son las superficies del neumático que conectan la banda de rodadura.

Los talones son unos refuerzos de goma situados en el interior de la llanta, protegen la carcasa de posibles daños por impactos en las ruedas o contra bordillos.[22]

### **2.3. Generalidades de las llantas**

El manejo de los neumáticos usados ha sido una problemática creciente ya que estos son considerados como un residuo peligroso dado que cumple con mucha de las características que están estipuladas en la normativa de gestión de residuos peligrosos[1], la acumulación de neumáticos usados ha generado problemáticas sociales y ambientales, en el caso de la ciudad de Bogotá se ha evidenciado que estas son dispuestas de manera inadecuada a pesar de que se tengan políticas públicas para el manejo de estas, la acumulación en bodegas o como se observa en la mayoría de la ciudad han sido desechadas en espacio público.

Como se ha podido evidenciar un crecimiento del parque automotor, genera que este residuo también aumente de manera desmedida, por esto se debe evaluar cómo se efectúa la disposición de estos neumáticos usados y que medios de transporte están generando la mayor parte de los neumáticos usados, por medio de encuestas aplicadas a los establecimientos con el fin de recolectar información sobre la disposición de los neumáticos usados donde se ha detectado circunstancias que aportan a la problemática presente del manejo de este residuo. [2]

Las consecuencias del manejo inadecuado de estos residuos peligrosos han sido evaluadas, los neumáticos tienden a generar efectos negativos en la parte social, ambiental y en la salud pública, su presencia significa un deterioro en el aspecto de la zona, su geometría tiende a acumular agua lo que puede ser un vector de enfermedades y plagas, ya que estos son guardados en grandes superficies que puedan estar a cielo abierto, es considerado un residuo peligroso una de las características es que es un elemento que es altamente inflamable si se dispone de manera inadecuada, como se ha evidencia en el estudio de la calidad del agua en la quebrada de piedras blancas, muchos de los métodos inadecuados que han usado para la recuperación de materia prima de los neumáticos ha sido la quema de estos, para remover los elementos metálicos que se usan como refuerzo, ha provocado un deterioro en la calidad del agua de la quebrada debido a la contaminación que genera la quema de estos.[3]

#### **2.4. Reciclaje de las llantas**

La economía circular es fundamental en la reutilización de neumáticos, ya que se centra en fomentar la reutilización y el reciclaje para finalizar los ciclos de vida del producto, evitar el desperdicio y maximizar la utilización de los recursos. En el contexto de los neumáticos usados, la economía circular tiene como objetivo transformar el modelo lineal de uso y eliminación en un modelo circular. Allí, los materiales y componentes de los neumáticos se reintegran en un nuevo ciclo de producción, lo que reduce la dependencia de los recursos y el medio ambiente, también está impulsando la innovación en el diseño de neumáticos, lo que requiere materiales y procesos de fabricación más sostenibles que fomenten la reutilización y el reciclaje. Se están desarrollando materiales más ecológicos, como caucho biodegradable y compuestos reciclados que tienen un menor impacto en el medio ambiente. También se están explorando nuevos enfoques de diseño para facilitar el desmontaje de los neumáticos para una gestión más eficiente de los neumáticos al final de su vida útil

La reutilización de neumáticos es una estrategia importante para reducir el impacto ambiental de estos residuos y promover la gestión sostenible de los recursos. Al reutilizar, reciclar y remanufacturar llantas, ayudamos a terminar el ciclo de vida del producto y pasar a un modelo más circular y sostenible en la industria automotriz y del transporte.[23]

La disposición adecuada de las llantas usadas se ha convertido en un tema ambiental prioritario debido al impacto negativo que las llantas usadas tienen sobre el medio ambiente. Para afrontar

este reto se han desarrollado diversas políticas y estrategias con el objetivo de reducir la cantidad de materiales no reutilizables y maximizar el aprovechamiento de los residuos.

Estas directrices se basan en una implementación de cuatro pasos que permite la gestión responsable de los neumáticos usados, priorizando la reutilización y el uso secundario de componentes en nuevos procesos.

La primera fase se centrará en recuperar material de los neumáticos para que pueda ser reprocesado y utilizado para crear nuevos materiales y elementos con propiedades similares al material original. En otras palabras, el objetivo es cerrar el ciclo de vida del neumático para crear nuevos productos con un alto nivel de sostenibilidad y evitar la producción de nuevos materiales.

El recauchutado o remanufacturado es una tecnología común en la economía circular aplicada a los neumáticos. Esto incluye reemplazar las bandas desgastadas por otras nuevas y mantener las carcasas y las correas en buenas condiciones. Esto aumenta la vida útil del neumático y reduce la cantidad de material nuevo necesario para fabricar el neumático. Los recauchutados se utilizan a menudo en camiones y transporte comercial

El segundo paso es aprovechar el material del neumático, que no necesariamente tiene las mismas propiedades que el material original, en el producto. Esto significa explorar usos alternativos y creativos para los componentes de los neumáticos, como la fabricación artesanal, los pisos de caucho reciclado y los proyectos de infraestructura vial.

La tercera etapa se enfoca en la reducción química de los materiales, descomponiéndolos en moléculas más pequeñas que pueden incorporarse a nuevos materiales y productos a través de métodos como la despolimerización. Esto abre oportunidades para el desarrollo de materiales de alto valor agregado, como polímeros reciclados de alta calidad utilizados en diversas industrias.

La cuarta etapa se centra en recuperar la energía propia del neumático mediante un proceso de combustión, la denominada pirólisis. Este proceso se somete el material a altas temperaturas en ausencia de oxígeno para producir gases y productos líquidos que pueden utilizarse como combustibles o materias primas en la industria química.

La trituración de llantas juega un papel importante en todas estas etapas, ya que es un método comúnmente utilizado para reducir el tamaño de las llantas usadas y facilitar su manejo y procesamiento durante las distintas etapas de reciclaje.

La introducción de estas pautas y pasos para la eliminación de neumáticos usados es de gran importancia para promover la sostenibilidad en la industria automotriz y minimizar el impacto ambiental de estos residuos. La reutilización y el reciclaje responsables hacen un uso más eficiente de los recursos naturales y ayudan a reducir la contaminación y los desechos. Además, estas prácticas fomentan la innovación y el desarrollo de tecnologías más sostenibles, fomentando una economía circular orientada a cerrar los ciclos de vida de los productos y promover un futuro más verde. [4]

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Morfología de la llanta

Los neumáticos son partes esenciales de los automóviles y se componen de varios elementos para garantizar el rendimiento y la durabilidad requeridos durante todo el ciclo de vida. El caucho es el componente principal en la fabricación de neumáticos, pero se agregan capas y refuerzos para mejorar la durabilidad y optimizar la función. Estos refuerzos son esenciales para asegurar la integridad estructural del neumático y aumentar su resistencia a diversas fuerzas y condiciones de uso.

Primero, el caucho es el material básico que constituye la mayor parte del neumático. El caucho utilizado para fabricar neumáticos suele ser una mezcla de cauchos naturales y sintéticos, con propiedades como flexibilidad, elasticidad y resistencia a la abrasión. La elección adecuada de la composición del caucho es fundamental para lograr el equilibrio adecuado entre agarre, tracción y durabilidad en diferentes condiciones de manejo.

Se agregan capas de refuerzo a la estructura interna para mejorar la resistencia y el rendimiento del neumático. Estas capas están hechas de materiales como fibras tejidas como el poliéster o mallas metálicas como el acero. Los cinturones de acero, en particular, se utilizan a menudo en neumáticos de alto rendimiento y de trabajo pesado, ya que proporcionan mayor rigidez y estabilidad, mejorando la dirección y el manejo del vehículo.

Además del cinturón y las fibras textiles, otras capas de refuerzo pueden incluir materiales como nailon o aramida; Estos materiales también ayudan a mejorar la durabilidad y el rendimiento de los neumáticos en una variedad de condiciones de conducción.

La incorporación de estos refuerzos a la estructura de la llanta depende del tipo de llanta y de la aplicación. Por ejemplo, los neumáticos diseñados para vehículos de alta velocidad y terrenos irregulares requieren cinturones de acero y refuerzos adicionales para garantizar su capacidad para soportar altas velocidades y cargas.

Es importante señalar que, aunque las propiedades específicas del refuerzo pueden diferir, su propósito sigue siendo el mismo. Eso significa mejorar la integridad estructural de sus neumáticos y extender su vida útil. Además, el uso de estos refuerzos tiene como objetivo minimizar la posibilidad de fallas prematuras como pinchazos y grietas, asegurando una operación segura y

confiable. En otras palabras, los neumáticos están compuestos por varios elementos con el caucho como componente principal. Sin embargo, se agregan capas o refuerzos hechos de materiales como fibras tejidas o mallas metálicas para mejorar el rendimiento y la durabilidad. Estos refuerzos juegan un papel importante en la fabricación de neumáticos, asegurando la integridad y durabilidad del neumático a lo largo de su ciclo de vida. La selección adecuada de estos refuerzos según el tipo de neumático y las características de uso permite proporcionar neumáticos con características y rendimiento óptimos en una variedad de condiciones de conducción. [24]

**Figura 1**

*Estructura de la llanta*



**Nota.** estructura del neumático y sus secciones, imagen tomada de Neumáticos KM0, [Online]. Available: <https://www.neumaticoskm0.com/estructura-de-un-neumatico/>. [Accessed: Aug. 05, 2024].

**Banda de rodadura:**

Esta parte está conformada por una gruesa capa de caucho, debido a que entra en contacto directo con el suelo, con el fin de reforzar la capa de caucho se le agregan componentes que le den algunas propiedades anti abrasivas.

**Protector o correa:**

Este elemento es parte fundamental de la rueda ya que se añade como refuerzo a su parte estructural con el fin de proteger a la llanta, se encarga de absorber parte de los golpes externos y mantener una protección ante los pinchazos, parte de su función también es mantener una separación de la capa de caucho de la carcasa.

Hombro del neumático:

Parte más gruesa de la llanta que conecta el flanco con la banda de rodadura, esta parte suele ser más gruesa ya que se busca mejorar la dispersión del calor.

Flanco:

Parte lateral de la llanta, esta consta de una alta flexibilidad esta se encuentra entre el talón y el hombro, en esta parte se encuentra la nomenclatura e información de cada llanta.

Talón:

Esta parte se encuentra compuesta con elementos como alambre y caucho, con el fin de aportar una fijación del neumático al rin, teniendo en cuenta que normalmente este sello que se genera es de alta resistencia y hermético.

Carcasa:

Parte fundamental del neumático, muchas veces compuesto de diferentes elementos que le agregan propiedades para poder resistir la presión de la llanta, el peso del vehículo también es parte encargada de aguantar los impactos que se puedan generar durante la marcha del vehículo.

Aislamiento interior:

Es un compuesto que se encarga de generar la hermeticidad del neumático, ya que se encarga de no dejar poros por donde puedan generar pérdidas de presión. [25]

### **3.2. Esfuerzo cortante**

El esfuerzo cortante es un concepto fundamental en la mecánica de materiales y se refiere a la distribución interna de fuerzas que ocurren dentro de un material cuando se carga perpendicularmente a su eje longitudinal. [26] Estas fuerzas internas deforman el material, provocando un desplazamiento relativo entre partículas adyacentes. Este fenómeno es causado por

la tendencia natural de los materiales a resistir el desplazamiento relativo de las partículas cuando se someten a cargas.

Cuando se aplica una fuerza perpendicular a la superficie de un material, la fuerza se transmite de una partícula del material a una partícula adyacente a través de enlaces moleculares o interacciones entre partículas. Una distribución interna de fuerzas tangenciales ocurre cuando una fuerza se transmite a través de un material. Una fuerza tangencial es una fuerza que actúa paralelamente a la superficie sobre la que actúa la carga. Estas fuerzas tangenciales crean un esfuerzo cortante en el material.

El esfuerzo cortante se expresa como la magnitud de la fuerza tangencial dividida por el área sobre la cual actúa la fuerza tangencial. Es decir, la fuerza por unidad de área en la dirección tangencial. Expresado en unidades de presión, como Pascales (Pa) y libras por pulgada cuadrada (psi).

En un material homogéneo, las partículas permanecen en relativo equilibrio porque no se deforman por fuerzas externas. Esto significa que el material está en equilibrio estático sin desplazamiento relativo entre partículas. Sin embargo, cuando se aplica una carga normal, las fuerzas cortantes internas causan deformación en el material, lo que hace que las partículas se muevan y se asienten para mantener el equilibrio.

La capacidad de un material para resistir el esfuerzo cortante se denomina resistencia al corte. Esta propiedad mecánica es importante en muchas aplicaciones de ingeniería, como el diseño estructural, mecánico y de componentes, ya que puede evaluar la estabilidad y seguridad de los materiales sujetos a cargas laterales.[5].

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Donde:

$\tau$  : esfuerzo cortante, se expresa en unidades de presión como Pascales o PSI

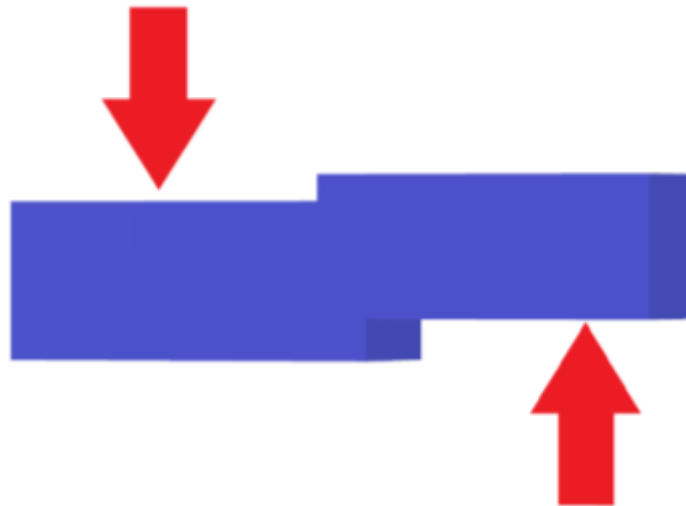
F: fuerza aplicada en Newton o libra

A: área transversal sobre la que actúa la fuerza la fuerza



## Figura 2

*Esfuerzo cortante*



*Nota.* representación de la dirección de las fuerzas para ejercer un esfuerzo cortante, Imagen generada por programa de dibujo

El esfuerzo cortante del neumático es un fenómeno mecánico importante que ocurre cuando un neumático se carga perpendicularmente a su eje longitudinal. Esta distribución de la fuerza interna juega un papel importante en el comportamiento y el rendimiento de los neumáticos en diversas condiciones de carga y es fundamental para garantizar la seguridad y la durabilidad de los neumáticos.

Cuando un neumático está en contacto con la superficie de la carretera, está sujeto a fuerzas externas que actúan perpendicularmente a su eje longitudinal. Estas fuerzas se transmiten desde la superficie del neumático hacia el interior a lo largo de líneas tangenciales. Al igual que con otros materiales, estas fuerzas internas distribuyen los esfuerzos cortantes dentro de la llanta. El esfuerzo cortante es la magnitud de la fuerza tangencial por unidad de área en la dirección tangencial. Es una medida de la resistencia de un material a la deformación debido a las fuerzas de corte. Cuando se aplica una carga perpendicular a la llanta, se generan fuerzas internas que tienden a deformar el material y provocan un desplazamiento relativo entre los granos adyacentes.

La tendencia de los materiales a resistir este desplazamiento relativo se debe a las interacciones moleculares y los enlaces internos presentes en la estructura de los materiales de los neumáticos.

Estos enlaces moleculares actúan como el "pegamento" entre las partículas, resistiendo el deslizamiento relativo bajo las cargas aplicadas, lo que da como resultado una resistencia al corte. La distribución del esfuerzo cortante es particularmente importante en los neumáticos debido a su estructura y función especiales. Los neumáticos son una parte importante de la tracción, el agarre y la estabilidad en movimiento de su vehículo. Por lo tanto, es importante que los neumáticos puedan soportar las fuerzas de cizallamiento que se producen cuando entran en contacto con la carretera, lo que afecta directamente su capacidad para mantener una conducción segura y estable.

Al diseñar y fabricar llantas, las propiedades mecánicas del material se consideran cuidadosamente para que la llanta pueda soportar cargas de corte adecuadas. Esto incluye seleccionar materiales apropiados con suficiente resistencia y propiedades elásticas, optimizar el diseño del perfil y las estructuras internas para distribuir eficientemente las fuerzas y minimizar la deformación. [25].

### **3.3. Anisotropía**

La anisotropía es una propiedad importante de los materiales, lo que significa que las propiedades físicas y mecánicas pueden variar mucho según la dirección de medición. Esto significa que los materiales anisotrópicos pueden comportarse de manera diferente en diferentes direcciones. Esta propiedad es muy importante para una variedad de materiales y tiene un impacto significativo en su desempeño y aplicaciones en ingeniería y otras industrias.[27]

La anisotropía puede ocurrir por varias razones. Una de las principales razones es la estructura cristalina del material. Para materiales cristalinos, las propiedades pueden variar dependiendo de la orientación del cristal. Por ejemplo, los materiales metálicos pueden tener una alta resistencia porque sus cristales están orientados en ciertas direcciones.

Otra fuente de anisotropía es la microestructura del material. La distribución de fases, inclusiones y dislocaciones dentro de un material puede afectar sus propiedades mecánicas en diferentes direcciones. Además, la orientación de las fibras y la geometría de los elementos estructurales dentro del material pueden dar lugar a respuestas no uniformes a las fuerzas y estímulos externos. Un ejemplo común de anisotropía material es el coeficiente de expansión o contracción térmica. Algunos materiales pueden expandirse o contraerse en diferentes direcciones ya diferentes velocidades con los cambios de temperatura. Esta propiedad es particularmente relevante para aplicaciones donde la estabilidad dimensional es importante.

En el caso específico de los neumáticos, la anisotropía es una propiedad relevante y deseada. Los neumáticos están diseñados para soportar cargas y fuerzas multidireccionales constantes durante el uso. Sometido a cargas y deformaciones variables según la dirección del impacto. La capacidad de un neumático para responder de manera eficiente y segura a estas fuerzas depende en gran medida de su estructura anisotrópica.

Los neumáticos se consideran materiales anisotrópicos debido a su compleja estructura y composición. Esta estructura anisotrópica se debe a factores como la disposición de las capas internas, la orientación de las fibras y la presencia de refuerzos en direcciones específicas. Estos elementos están especialmente diseñados para garantizar una resistencia óptima y una distribución equilibrada de las fuerzas en diferentes direcciones, lo que permite que el neumático funcione de forma eficiente y segura en una amplia variedad de condiciones de conducción.

Estas propiedades de los neumáticos han llevado a investigar su comportamiento mecánico, dado que estas características anisotrópicas pueden ser un elemento fundamental para ser usado en otras áreas como la construcción, usados como relleno se observó que se alinean con una dirección predominante debido a la compactación y acción de la gravedad, lo que resultó en una estructura estratificada, esto implica que sus propiedades van a variar dependiendo de la dirección, cuando son sometidos a cargas de tráfico su comportamiento podría moldearse como un material elástico anisotrópico[7].

### **3.4. Elasticidad del caucho**

. La elasticidad del caucho de los neumáticos es una propiedad mecánica fundamental que describe la capacidad de un material para deformarse bajo carga y volver a su forma original cuando se elimina la fuerza. Esta propiedad es muy importante para los neumáticos, ya que les permite adaptarse y reaccionar a las diferentes condiciones de conducción, proporcionar un agarre positivo en la superficie de la carretera, absorber los impactos y garantizar una conducción cómoda.

El caucho utilizado en los neumáticos es un tipo de polímero llamado elastómero y se caracteriza por el entrelazamiento de cadenas moleculares largas y flexibles. Cuando se aplica una carga al caucho, estas cadenas moleculares se estiran y se alinean en la dirección de la fuerza, causando deformación. Esta deformación es reversible dentro de los límites elásticos del caucho. Después de la relajación, el caucho vuelve a su forma original debido a la fuerza restauradora de las cadenas

moleculares. El módulo de Young, también conocido como módulo de elasticidad, es una medida de la rigidez de un material a lo largo de la dirección de la fuerza aplicada. Describe la relación entre el estrés (fuerza por unidad de área) y la deformación (alargamiento por unidad de longitud original) dentro del límite elástico del material. El caucho de los neumáticos tiene un módulo de elasticidad relativamente bajo en comparación con los materiales duros, lo que lo convierte en un material muy flexible que puede soportar grandes deformaciones sin sufrir daños.

Además del módulo, la relación de Poisson también es un parámetro importante para la elasticidad del caucho. Este factor describe la relación entre la extensión en la dirección de la fuerza y la extensión perpendicular a ella. Para el caucho de los neumáticos, la relación de Poisson suele ser positiva. Esto significa que, si estira el material en una dirección, se adelgazará. Esta propiedad se conoce como efecto Poisson y es común en muchos materiales elastoméricos.

La elasticidad del caucho del neumático es muy importante para el rendimiento del neumático en diversas condiciones de conducción. A medida que el automóvil viaja por la carretera, la goma del neumático se deforma para adaptarse a las superficies irregulares, proporcionando tracción y agarre. Además, la elasticidad de la goma permite que los neumáticos absorban impactos, como cuando se conduce sobre baches en la carretera, mejorando la comodidad de conducción. Es importante señalar que la elasticidad de la goma de los neumáticos no es infinita, tiene un límite. El estrés excesivo más allá del límite elástico puede causar una deformación permanente o falla del material. Por ello, es importante diseñar y fabricar neumáticos que puedan soportar las cargas y condiciones de conducción a las que se ven sometidos sin sobrepasar sus límites elásticos. [28].

### **3.5. Extensometría**

La medición del alargamiento es una técnica de medición para evaluar la deformación y el cambio dimensional de materiales bajo la influencia de fuerzas mecánicas. Esta técnica se basa en el uso de un dispositivo llamado extensómetro. Un extensómetro es un sensor de deformación diseñado para detectar pequeños cambios en la longitud, el ancho o el grosor de los materiales. [29]

El objetivo principal de las mediciones de elongación es obtener datos precisos sobre las deformaciones experimentadas por los materiales bajo diversas condiciones de carga. Este dato es de gran importancia en ingeniería y ciencia de materiales ya que nos permite entender el comportamiento mecánico de los materiales y evaluar su resistencia y durabilidad.

Se coloca un extensómetro directamente sobre la superficie del material de interés y se conecta a un dispositivo de medición como un extensómetro eléctrico o un registrador de datos. Los medidores de tensión detectan y registran cambios en la longitud o la forma cuando se aplican fuerzas mecánicas como tensión, compresión, corte o torsión a un material.

Hay muchos tipos diferentes de extensómetros, cada uno adecuado para diferentes aplicaciones y tipos de materiales. Algunos de los extensómetros más comunes incluyen galgas extensométricas que utilizan una malla metálica fina o un cable de resistencia adherido a la superficie del material. A medida que el material se deforma, la resistencia eléctrica de la rejilla o los cables cambia, lo que da como resultado una señal eléctrica proporcional a la deformación; Extensómetros ópticos que utilizan principios ópticos para medir la deformación del material. Estos pueden basarse en interferometría, muaré o técnicas de imagen digital. Estos sistemas son especialmente adecuados para medir deformaciones en materiales transparentes y lugares de difícil acceso.

Extensómetros de alambre extensométrico, medidores de tensión consisten en alambres delgados que se estiran cuando se aplica una fuerza al material. El alargamiento del cable se mide mediante una señal eléctrica que varía con el alargamiento.

Los datos obtenidos de las mediciones de elongación se utilizan para construir curvas de tensión-deformación que describen cómo responde mecánicamente un material a las fuerzas aplicadas. Estas curvas son la base para la caracterización de materiales y el diseño y análisis de estructuras y componentes en ingeniería.

## **4. METODOLOGÍA**

En la presente investigación “Determinación de la fuerza cortante necesaria para seccionar llantas usadas”, por la modalidad corresponde a un proyecto experimental y analítico, encaminado a resolver la pregunta problema ¿Cuál es la fuerza cortante necesaria para cortar la secciones de llanta seleccionadas en el ensayo experimental?, la metodología se desarrolló bajo el siguiente esquema: inicialmente una revisión bibliográfica de, por concerniente se plantea desarrollar de manera analítica y experimental, una investigación cuantitativa y cualitativa de lo que corresponde los resultados de los modelos realizados, para demostrar las propiedades mecánicas de llanta en relación a la deformación sobre la fuerza aplicada para su corte. Los datos obtenidos corresponden a datos reales de la extensiométrica visual realizada en Universidad de América (Colombia). Posteriormente se plantea un análisis y comparativo, de acuerdo con los resultados obtenidos.

### **4.1. Estimación de tamaño muestral**

El tamaño de la muestra es una consideración crucial al diseñar estudios experimentales, ya que tiene un impacto significativo en el poder estadístico de un estudio. El poder estadístico es una medida de la capacidad de un estudio para detectar efectos significativos o diferencias reales entre los grupos evaluados. Se expresa como un número entre 0 y 1, donde 1 indica una alta probabilidad de que se detecte el impacto y 0 indica una probabilidad nula.

Un tamaño de muestra pequeño puede llevar a una potencia baja, lo que significa que los estudios pueden tener dificultades para detectar diferencias significativas entre los grupos evaluados, incluso cuando existen diferencias en la población. Esto se debe a que cuando el tamaño de la muestra es pequeño, los datos tendrán más variabilidad y disminuirá la precisión para detectar los efectos del mundo real. Por el contrario, un tamaño de muestra más grande mejora o aumenta el poder de un estudio. Cuanto mayor sea el tamaño de la muestra, más precisos serán los datos, menor será la variabilidad y más fácil será detectar grandes diferencias entre grupos cuando existan.

#### 4.1.1. Cálculo de potencia estadística

El cálculo de la potencia estadística es crucial para evaluar la capacidad de un estudio para detectar efectos significativos o diferencias reales entre los grupos evaluados. La fórmula general para calcular la potencia es:

$$\text{Potencia} = 1 - P(F_{\{\text{crítico}\}} < F_{\{\text{observado}\}} | H_0 \text{ es verdadera})$$

Esta fórmula se interpreta de la siguiente manera:

F crítico: es el valor crítico de la distribución F que corresponde al nivel de significancia Alpha, es el punto más allá del cual rechazamos la hipótesis nula

F observado: es el valor de la estadística F calculado a partir de los datos muestrales. Si este valor es mayor que F crítico indicara que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula.

H0: es la hipótesis nula que plantea que no hay diferencias significativas entre los grupos evaluados.

Las hipótesis del estudio en el contexto de este análisis, se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula (H0): No existen diferencias significativas entre los grupos evaluados en el estudio.

Hipótesis Alternativa (H1): Existen diferencias significativas entre los grupos evaluados en el estudio

La fórmula de potencia nos proporciona una forma teórica de calcular la probabilidad de detectar un efecto real en nuestros datos. Para implementar esta fórmula en R, necesitamos traducir cada componente de la fórmula en términos de código. Aquí se detalla cómo cada elemento de la fórmula se refleja en el código en R:

Cálculo de lambda ( $\lambda$ ): es una medida del tamaño del efecto. En el código, se calcula como `lambda[i] <- (k[i] / 2)` donde k representa la desviación estándar significativa. Esto se deriva del hecho de que el tamaño del efecto influye en la potencia.

Grados de libertad: los grados de libertad para el numerador y el denominador de la distribución F se calculan como `v2 <- nt - 1` y `v1 <- nt * (ft - 1)`, respectivamente. Estos valores son necesarios para determinar el valor crítico de F y evaluar la distribución F observada.

Cálculo del valor crítico de F: utilizando la función `qf()`, el código determina el valor crítico de F (`ftcritico[i] <- qf(1 - alpha, ft, v2)`) para el nivel de significancia especificado. Este valor es el umbral más allá del cual rechazamos la hipótesis nula.

Cálculo de la potencia: se calcula con la función `pf()` que evalúa la probabilidad acumulativa de la distribución F (`potencial[i] <- 1 - pf(ftcritico[i], nt, v1, v2, lambda[i])`). Esta fórmula computa la probabilidad de que el valor observado de F sea mayor que el valor crítico dado el tamaño del efecto (`lambda`) y los grados de libertad.

#### ***4.1.2. Descripción de la función R***

El cálculo de la potencia estadística en R se basa en la fórmula de potencia de la prueba F para el análisis de varianza (ANOVA) con un diseño completamente aleatorizado. Esta fórmula considera varios factores como el tamaño de la muestra, la variabilidad de los datos y el nivel de significancia deseado.



**Figura 3**

Código en programa R para el cálculo de tamaño muestral.

```
1 #cálculo de potencia
2 #nt= número de tratamientos
3 #alpha nivel de significancia
4 #k desviaciones significativas
5 potencia <- función(nt, alpha, k)
6 potencia <- NULL
7 lambda <- NULL
8 fcritico <- NULL
9 n <- 2:10
10
11 for (i in 1:length(n)) {
12   lambda[i] <- (n[i] + k^2) / 2
13   v2 <- nt * (n[i] - 1)
14   fcritico[i] <- qf(1-alpha, nt-1, v2)
15   potencia[i] <- 1 - pf(fcritico[i], nt-1, v2, lambda[i])
16 }
17
18 potencias <- potencia
19 tamaño <- n
20 return(data.frame(potencias, tamaño))
21 }
22
23 potencias(3, 0.05, 4)
24
25 # llamada a la función potencia con diferentes valores de k
26 potencia_k1 <- potencia(3, 0.05, 1)
27 potencia_k2 <- potencia(3, 0.05, 2)
28 potencia_k3 <- potencia(3, 0.05, 3)
29 potencia_k4 <- potencia(3, 0.05, 4)
30
31 # Creación de una tabla con los resultados
32 tabla_potencia <- data.frame(K = c(1, 2, 3, 4),
33                               Potencia_k1 = potencia_k1$potencias,
34                               Potencia_k2 = potencia_k2$potencias,
35                               Potencia_k3 = potencia_k3$potencias,
36                               Potencia_k4 = potencia_k4$potencias)
37
38 # Imprimir la tabla
39 print
```

**Nota.** captura de pantalla del código que se utilizó para generar el tamaño de muestras

La función 'potencia()' en R calcula la potencia estadística para diferentes tamaños de muestra y niveles de significancia. Aquí se explica cómo cada parte del código se relaciona con la fórmula de potencia estadística.

Parámetros de la función:

nt: Número de tratamientos o grupos en el estudio.

alpha: Nivel de significancia (probabilidad de cometer un error tipo I).

k: Factor de desviación estándar, que mide la variabilidad en los datos.

Cálculo de Lambda:

$\text{lambda}[i] <- (k[i] / 2)$ : Calcula el valor de lambda, que es una medida del tamaño del efecto basado en k.

Grados de Libertad:

`v2 <- nt - 1`: Grados de libertad para el denominador de la distribución F.

`v1 <- nt * (ft - 1)`: Grados de libertad para el numerador de la distribución F.

Cálculo del Valor Crítico de F:

`ftcritico[i] <- qf(1 - alpha, ft, v2)`: calcula el valor crítico de la distribución F para el nivel de significancia especificado.

Cálculo de la Potencia:

`potencial[i] <- 1 - pf(ftcritico[i], nt, v1, v2, lambda[i])`: calcula la potencia estadística utilizando la función de distribución acumulativa F (pf), que evalúa la probabilidad de obtener un valor F menor que el crítico dado lambda y los grados de libertad.

Devolución de Resultados:

`return(data.frame(potencias, tamaño))`: Crea un dataframe con los resultados de potencia y el tamaño de la muestra.

Tipos de errores: en el análisis estadístico, es importante considerar dos tipos de errores:

Error Tipo I (Alpha): Rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera, esto es controlado por el nivel de significancia alpha.

Error Tipo II (Beta): No rechazar la hipótesis nula cuando es falsa, la potencia del estudio (1 - Beta) nos indica la probabilidad de no cometer este error.

La tabla generada por el código en R muestra la relación entre el número de muestras, la desviación estándar (k) y la potencia estadística. Aquí se detalla cada sección de la tabla 1:

**Tabla 1**

*Numero de muestras y Potencia*

Potencia				
	valor K			
# de muestras	1	2	3	4
2	0,08297034	0,1850618	0,3491431	0,5417771
3	0,12683241	0,3808947	0,7128627	0,9221438
4	0,17328242	0,5596310	0,8980537	0,9915526
5	0,22113986	0,7015083	0,9682921	0,9992753
6	0,26963098	0,8053172	0,9682921	0,9999467
7	0,31808850	0,8770087	0,9976336	0,9999965
8	0,36593917	0,9243714	0,9994111	0,9999998
9	0,41270352	0,9545659	0,9998603	1
10	0,45799228	0,9732551	0,9999681	1

*Nota.* número de muestras necesarias para obtener una potencia estadística representativa, tabla generada por R

La tabla destaca que a medida que aumenta el tamaño de la muestra, también lo hace la potencia estadística, lo que indica una mayor capacidad para detectar diferencias significativas entre los grupos evaluados. La columna de desviación estándar refleja cómo la variabilidad en los datos afecta la potencia del estudio. Un mayor número de muestras y un control adecuado de la variabilidad permiten una mejor detección de efectos significativos, lo que resulta en conclusiones más robustas y confiables.

El resultado del análisis en R muestra la relación entre el tamaño de la muestra y el poder estadístico para un nivel de significancia de 0.05 (alpha) y valores de hasta 4 desviaciones estándar. Esta información es fundamental para los investigadores, ya que les permite elegir un tamaño de muestra adecuado y asegurar un poder estadístico óptimo, mejorando la calidad y robustez de los resultados obtenidos en sus estudios.

Número de muestras: esta columna indica el tamaño de la muestra, es decir, el número de observaciones en cada grupo del estudio.

Potencia para  $k=1$ ,  $k=2$ ,  $k=3$ ,  $k=4$ :

Estas columnas muestran la potencia estadística para diferentes valores de  $k$ , que representan las desviaciones estándar significativas. Cada  $k$  indica un nivel diferente de variabilidad en los datos:

$k=1$ : Variabilidad baja.

$k=2$ : Variabilidad media.

$k=3$ : Variabilidad alta.

$k=4$ : Variabilidad muy alta.

La potencia es la probabilidad de detectar un efecto significativo si realmente existe. Se espera que la potencia sea alta (generalmente se considera adecuada una potencia de al menos 0.8) para que el estudio tenga una buena probabilidad de detectar diferencias significativas.

Relación entre el número de muestras y la potencia, a medida que el número de muestras aumenta, la potencia también aumenta. Esto se debe a que un mayor tamaño de muestra reduce la variabilidad y mejora la precisión de las estimaciones, aumentando la probabilidad de detectar diferencias reales entre los grupos.

Relación entre  $k$  y la potencia: a medida que  $k$  aumenta, la variabilidad en los datos también aumenta, lo que generalmente requiere un tamaño de muestra mayor para mantener una potencia alta. Sin embargo, en la tabla se observa que incluso con valores altos de  $k$ , un tamaño de muestra de 10 es suficiente para alcanzar una potencia cercana a 1 (potencia perfecta).

La tabla muestra que, con 10 muestras, la potencia estadística alcanza valores muy cercanos a 1 para todas las desviaciones estándar ( $k$ ). Esto indica una alta probabilidad de detectar efectos significativos si realmente existen.

Minimización de la variabilidad: un mayor tamaño de muestra reduce la variabilidad en los datos, mejorando la precisión de las estimaciones y la fiabilidad de los resultados.

Robustez y confiabilidad: tener 10 muestras asegura que los resultados del estudio sean robustos y confiables, minimizando el riesgo de errores tipo II (no detectar un efecto significativo cuando realmente existe).

Cumplimiento de requisitos estadísticos: en muchos estudios, se considera que un tamaño de muestra de 10 es suficiente para cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas necesarios para realizar ANOVA y otras pruebas estadísticas.

#### **4.2. Definición de probetas a tensión norma ISO 37**

Definir el tamaño y la forma de la muestra a analizar es de suma importancia en cualquier estudio o investigación experimental. Estas especificaciones son la base para asegurar la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos, así como la comparabilidad y reproducibilidad de los datos entre diferentes investigadores y laboratorios.

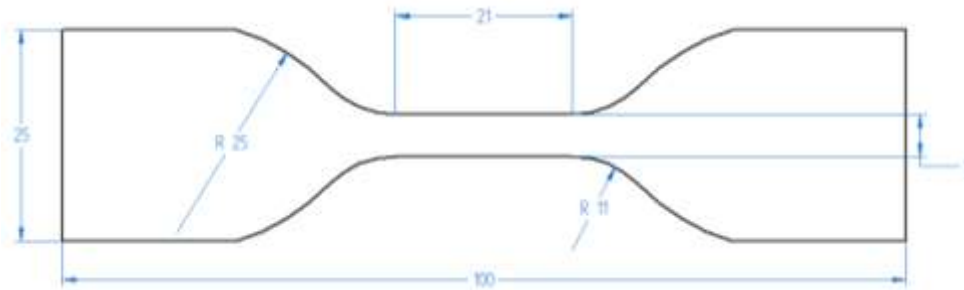
Especificar un tamaño y una geometría específicos para la muestra estandariza el proceso de prueba y garantiza que todas las muestras estén expuestas a condiciones de prueba idénticas. Esto es importante para reducir la variabilidad experimental y minimizar las fuentes de error que pueden afectar los resultados. Esto asegura que los resultados obtenidos reflejen el comportamiento real del material o componente bajo investigación. Además, las definiciones de tamaño y forma de la muestra están estrechamente relacionadas con las normas y estándares internacionales establecidos por organizaciones como ASTM e ISO. Estos estándares brindan pautas detalladas y específicas sobre cómo preparar especímenes, dimensiones de especímenes y métodos de prueba. El cumplimiento de estos estándares garantiza que los resultados sean reconocidos internacionalmente y que los datos sean comparables con los de otros laboratorios y estudios.

La elección correcta del tamaño y la forma de la probeta de ensayo puede afectar directamente la precisión de los resultados y la capacidad de detectar efectos significativos. Por ejemplo, un tamaño de muestra insuficiente puede reducir el poder estadístico y no detectar diferencias significativas en los estudios. Por el contrario, un tamaño de muestra demasiado grande puede desperdiciar recursos y tiempo innecesariamente.

En algunos casos, la elección del tamaño y la forma de la probeta de ensayo puede verse influida por las propiedades específicas del material o componente que se está estudiando, así como por los objetivos y el alcance del proyecto. Algunas pruebas requieren tamaños de muestra más grandes para obtener resultados confiables, mientras que otras requieren muestras más pequeñas debido a la disponibilidad limitada de material o debido a consideraciones prácticas.

**Figura 4**

*Diseño de probeta*



*Nota.* diseño de probeta en programa CAD según norma ISO 37

En el primer experimento, se usa una máquina de prueba universal para probar una muestra de control para evaluar la resistencia a la tracción del vulcanizado. Para asegurar la validez y comparabilidad de los resultados, se realizó una consulta detallada y se determinó el tamaño y la forma del tubo según la norma ISO 37.

La norma ISO 37 es ampliamente reconocida y utilizada en la industria para determinar las propiedades mecánicas de los vulcanizados. Brinda pautas detalladas sobre cómo preparar especímenes, medir y realizar pruebas de tracción para obtener datos confiables y representativos.

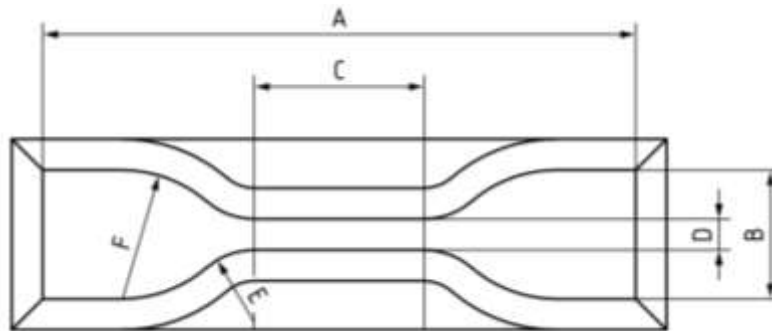
La estandarización de las pruebas según ISO 37 es muy importante para garantizar la coherencia y la reproducibilidad de las condiciones de prueba. Esto permite comparar los resultados obtenidos en diferentes laboratorios y estudios, aumentando la confiabilidad y validez de los datos.

Además, seguir las pautas establecidas en el estándar minimiza las fuentes de error y reduce el sesgo experimental que puede afectar los resultados. Esto permite una medición precisa y consistente de la resistencia a la tracción en el caucho vulcanizado. Esto es esencial para la caracterización y evaluación del rendimiento en aplicaciones del mundo real.

Las propiedades específicas del material y las condiciones de prueba también se consideran en la cuidadosa selección del tamaño y la geometría del espécimen ISO 37 para representar adecuadamente el comportamiento mecánico del vulcanizado.

**Figura 5**

Guía de medidas ISO 37



**Nota.** ajuste de medidas según la norma ISO 37, imagen tomada de Iso, “ISO 37:2017”, 2017. [En línea]. Disponible en: [www.iso.org](http://www.iso.org)

**Tabla 2**

Medidas según tipo ISO 37

Dimension mm	Type 1	Type 1A	Type 2	Type 3	Type 4
A Overall length (minimum) <sup>a</sup>	115	100	75	50	35
B Width of ends	25 ± 1	25 ± 1	12,5 ± 1	8,5 ± 0,5	6 ± 0,5
C Length of narrow portion	33 ± 2	21 ± 1	25 ± 1	16 ± 1	12 ± 0,5
D Width of narrow portion	6,2 ± 0,2	5 ± 0,1	4 ± 0,1	4 ± 0,1	2 ± 0,1
E Transition radius outside	14 ± 1	11 ± 1	8 ± 0,5	7,5 ± 0,5	3 ± 0,1
F Transition radius inside	25 ± 2	25 ± 2	12,5 ± 1	10 ± 0,5	3 ± 0,1

<sup>a</sup> A greater overall length might be necessary to ensure that only the wide end tabs come into contact with the machine grips, thus avoiding "shoulder breaks".

**Nota.** Medidas establecidas para los modelos de probetas en la norma ISO, fuente Iso, “ISO 37:2017”, 2017. [En línea]. Disponible en: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Se consideró una geometría base conforme a la especificación Tipo 1A tal como se define en la norma ISO 37 al determinar qué usar en el estudio. Este estándar proporciona una imagen de referencia de una muestra de Tipo 1A a partir de la cual se determinan valores específicos para las dimensiones de los tubos de ensayo utilizados en la prueba.

Según la norma, las dimensiones de una muestra Tipo 1A son:

$$\text{Longitud total (A)} = 100 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho } (An) = 25\text{mm}$$

$$\text{Espesor } (C) = 21 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud del radio de transición } (D) = 5 \text{ mm}$$

$$\text{Radio de transición inferior } (E) = 11 \text{ mm}$$

$$\text{Radio de transición superior } (F) = 25 \text{ mm}$$

Estas dimensiones se eligieron cuidadosamente para garantizar que las muestras fueran representativas y adecuadas para las pruebas de acuerdo con las necesidades y los requisitos específicos de la investigación.

El uso de formatos de base estandarizados, como la probeta de ensayo Tipo 1A como se define en ISO 37, es esencial para garantizar la coherencia y la comparabilidad de los resultados entre diferentes estudios y laboratorios. El cumplimiento de este estándar garantiza dimensiones y geometría consistentes para todas las muestras utilizadas en las pruebas, reduce la variabilidad experimental y garantiza la confiabilidad y representatividad de los datos. Además, el uso de probetas de dimensiones estandarizadas permite la comparación directa con otros estudios y establece correlaciones entre los resultados de diferentes estudios. Esto es especialmente importante en la industria y la investigación científica, donde la consistencia y la reproducibilidad de los datos son fundamentales para validar los resultados y tomar decisiones informadas.[8]



**Figura 6**

*Probetas ISO37*



*Nota.* foto tomada de los especímenes de prueba

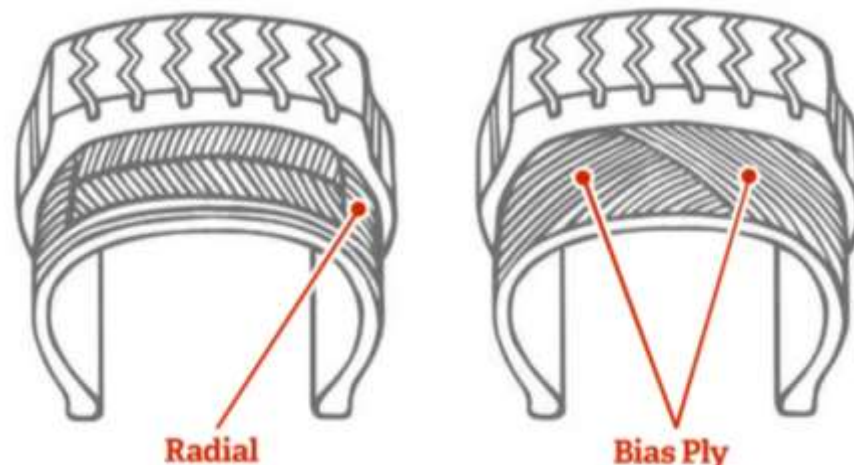
Las dimensiones de la probeta de ensayo utilizadas en la prueba se toman directamente del material del neumático. El tipo de rueda utilizado 205/50 R16, que es un tamaño común para los coches particulares. Estas medidas específicas se refieren a las siguientes dimensiones: 205 mm de ancho. Esto representa la medida de la banda de rodadura. La banda de rodadura es la parte del neumático que se somete a prueba por ser la zona de mayor resistencia. Debido a la morfología del perfil y la presencia de refuerzo adicional en esta zona, la selección del perfil como objeto de ensayo es fundamental. La banda de rodadura es la parte del neumático que entra en contacto directo con la carretera y es responsable de la tracción y el agarre del vehículo. Debido a esto, mientras usa neumáticos, está sujeto a una gran tensión y estrés. [9]

La presencia de refuerzos en la banda de rodadura es muy importante para la resistencia y durabilidad del neumático. Estos refuerzos incluyen fibras tejidas y malla metálica que ayudan a mantener la integridad estructural del neumático y mejoran la resistencia a la tracción y la compresión. Al realizar una prueba de resistencia de la banda de rodadura, podemos evaluar cómo estos refuerzos ayudarán al neumático a soportar las fuerzas encontradas durante el uso normal.

Según la norma técnica Colombiana las llantas tiene que cumplir con una nomenclatura para poder ser comercializadas, aparte de los estándares mínimos que se deben cumplir, esta nomenclatura permite que identificar datos como fecha de fabricación, medidas, índice de carga y de velocidad[10], la información que proporciona el neumático a ser usado en las pruebas define una medida de 205/50/R16, el primer número es la medida del ancho de la llanta en mm, en este caso 205mm, el segundo número indica la medida del flanco en relación a un porcentaje del ancho de esta llanta, lo que define que esta rueda tiene 102,5 mm de flanco, corresponde al 50 % de los 205 mm que tiene de ancho, la letra R es la referencia de la estructura de la llanta que es radial como se aprecia en la (Figura7), el último número es el indicativo del tamaño de la rueda conocido como rin 16.

**Figura 7**

*Malla interna de la llanta*



**Nota.** disposición de la estructura interna de las llantas, imagen tomada de "Neumáticos radiales contra convencionales," Importadora Guillén, [Online]. Available: [www.importadoraguillen.com/neumaticos-radiales-contra-convencionales](http://www.importadoraguillen.com/neumaticos-radiales-contra-convencionales). [Accessed: Aug. 05, 2024].

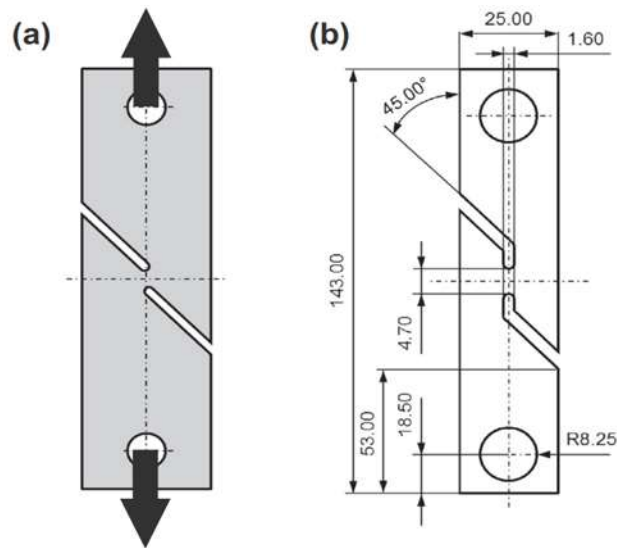
### **4.3. Definición de probetas esfuerzo cortante**

Para garantizar la precisión y validez de la prueba de esfuerzo cortante en los especímenes seleccionados, se hizo referencia a estándares específicos para métodos de prueba de aluminio, mencionados en detalle en [11].

El uso de estándares establecidos es esencial en investigación e ingeniería, ya que brindan pautas y procedimientos estandarizados que aseguran la consistencia y la reproducibilidad de los resultados. Para las pruebas de corte, el estándar elegido para el aluminio proporciona información importante para preparar y probar muestras de acuerdo con las mejores prácticas reconocidas internacionalmente.

**Figura 8**

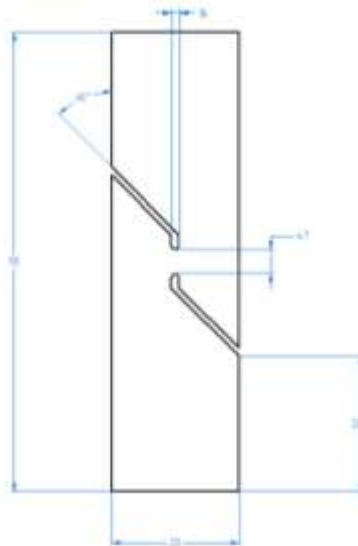
*Referencia para diseño probetas esfuerzo cortante*



*Nota.* referencia de probeta para esfuerzo cortante , norma ASTM 831 figura tomada del articulo” Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products 1”, doi: 10.1520/B0831-22.”

## Figura 9

*probeta diseñada*



*Nota.* probeta modificada para ensayo, imagen de programa CAD,

El esfuerzo cortante es una fuerza que actúa en una dirección perpendicular a un área determinada. Para la muestra elegida para este estudio, está diseñado para que este esfuerzo se pueda aplicar a una región de 4,7 mm, dado el espesor de la muestra. [12].

Este estudio previo fue de gran ayuda para determinar la geometría y dimensiones de la muestra final sometida a la prueba de esfuerzo cortante en este estudio. Al aplicar un esfuerzo cortante en un área específica de la muestra, el objetivo es obtener resultados más precisos y representativos sobre el comportamiento mecánico del material. Esta configuración particular permite que la fuerza se aplique de manera controlada y dirigida, lo que facilita la medición y el análisis del comportamiento de la muestra bajo esfuerzo cortante.

Para el modelo final se analiza la probeta de la ilustración 7, con el fin de mantener los ensayos dentro de la mayor precisión posible se modificó para poder hacer los cortes de la misma llanta y así tener valores similares ya que se sacan del mismo elemento a evaluar, para esta se hizo una reducción aproximada de 5 cm, dado que esta sección solo será para sujetar el material, en la probeta original tenía agujeros para pasadores, esto permitió la reducción de la probeta final, ya que el método de sujeción de la máquina universal utiliza mordazas lo que hace innecesario

mantener estos agujeros, se mantiene el corte de  $45^\circ$  y la sección transversal entre los cortes de 4,7 mm.

## **5. PROCESO EXPERIMENTAL**

### **5.1. Corte de muestras**

En este estudio, las muestras se cortaron con una máquina de corte por chorro de agua CNC (Figura 10). La elección de esta técnica de corte se basó en su alta precisión, que es una parte importante del desempeño confiable y preciso de las pruebas.

El método elegido, el corte por chorro de agua, ofrece varias ventajas al proceso de corte de muestras de neumáticos. Una de las principales razones para elegir esta técnica es que no expone las muestras al calor ni a elementos que puedan cambiar las propiedades del material. Esta característica es importante para preservar la integridad y las propiedades originales de las muestras durante el proceso de corte, asegurando así la representación de los resultados obtenidos. En el pasado, se hicieron intentos para cortar neumáticos utilizando métodos de corte mecánico; sin embargo, hubo dificultades para lograr un corte preciso de este material. La estructura de la rueda, con sus refuerzos internos y diferentes capas, requiere un corte preciso y controlado para obtener muestras de alta calidad que reflejen correctamente las propiedades del material.

El corte por chorro de agua, un método no térmico, evita la generación de calor que pueda afectar la integridad del material y permite realizar cantos limpios y precisos. Además, la tecnología CNC (Computer Numerical Control) garantiza una alta automatización y repetibilidad, asegurando que todas las muestras se corten con la misma precisión y que se mantengan resultados de prueba consistentes.

**Figura 10**

*Corte por CNC*



*Nota.* evidencia fotográfica tomada en el taller de corte

Cada muestra se cortó con un chorro de agua utilizando como material el neumático seleccionado. La elección de este método de corte se basó en la necesidad de conseguir la mayor precisión posible y de que la forma del material no afectara al corte de las muestras. Para lograr esto, cada muestra se montó cuidadosamente en una placa de metal delgada durante el proceso de corte.

El uso de una placa de metal delgada hizo posible mantener la muestra plana y estable durante el corte. Esto fue necesario para evitar movimientos que afectaran la precisión del corte y para asegurar que las muestras permanecieran dentro de los rangos de medición de la norma ISO 37. En el estudio se seleccionó la probeta de ensayo de tracción tipo 1A, que se define en la Tabla 2 de la norma ISO 37. La selección se centró en la idoneidad de este tipo de probeta para los ensayos de tensión y esfuerzo cortante, que tienen lugar en el estudio

Para las muestras expuestas a esfuerzo cortante, se utilizó el mismo método de corte por chorro de agua, pero se modificó la boquilla de la máquina para producir un chorro de 0,7 mm. Esta corrección fue necesaria porque las muestras contenían piezas con un diámetro promedio de 1,6 mm, como se muestra en la Figura 10. Al ajustar el chorro de corte, se aseguró que las muestras cumplieran con los requisitos de la norma y pasaran los procedimientos requeridos. para la prueba. La precisión del corte de la muestra es un factor crítico en este estudio, porque los cambios en la

forma o el tamaño de la muestra pueden afectar los resultados y la interpretación de los experimentos. Siguiendo estrictamente los requisitos de la norma ISO 37 y utilizando un método de corte por chorro de agua con una boquilla adecuada, se obtuvieron muestras de alta calidad que cumplieron con los estándares de las pruebas de tensión y esfuerzo cortante

**Figura 11**

*Probeta ensayos cortantes*



*Nota.* evidencia fotográfica, probeta para esfuerzo cortante.

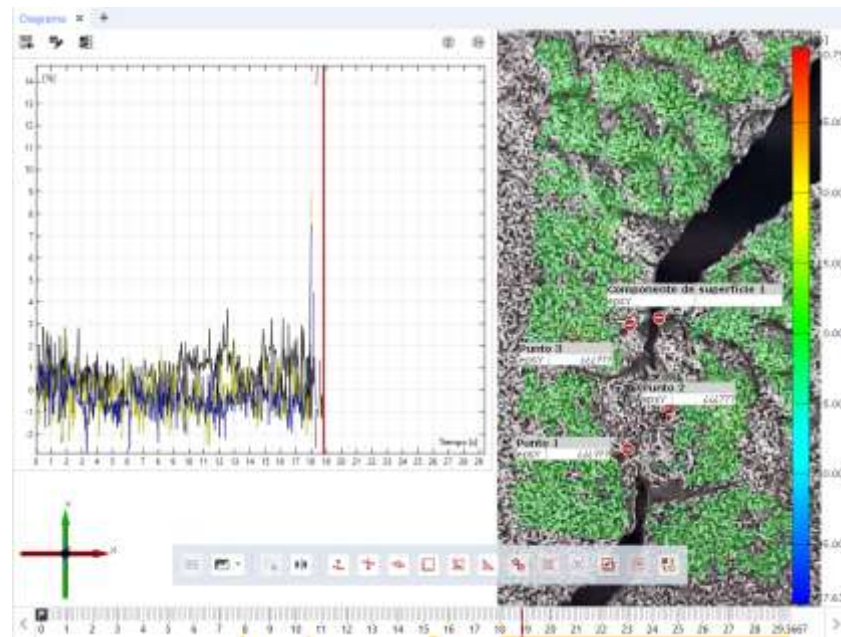
## **5.2. Extensometría por correlación de imágenes**

La correlación de imágenes es una técnica usada en la extensométrica visual para medir las deformaciones de un material u objeto, basada en el análisis de las variaciones de intensidad de píxeles en una imagen digital del objeto antes y después de ser sometido al ensayo.



**Figura 12**

*Mapeo y grafica de GOM*

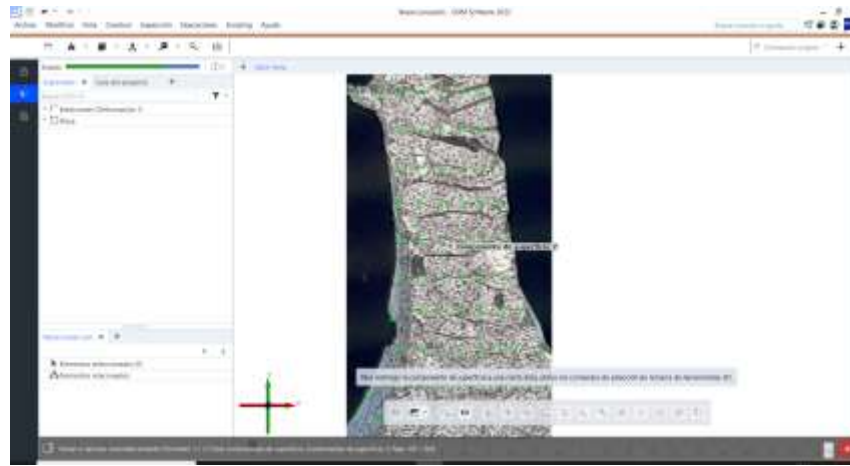


*Nota.* imagen del mapeo y escala generada por el programa GOM

El software GOM aplica esta técnica para medir las deformaciones en objetos mediante el análisis de las imágenes digitales, la correlación de imágenes es utilizada para comparar las imágenes de referencia del objeto son carga con la misma región después de aplicar la carga, mediante los videos que se toman durante el ensayo el programa lo separa en imágenes para ser estudiadas y comparadas a medida que estas van avanzando, en la imagen proporcionada por el software se evidencia la escala de colores del porcentaje de deformación que se debe evidenciar sobre las imágenes una vez comience a correr el programa, este mapa va cambiando de verde a rojo o azul dependiendo del desplazamiento que se logre capturar, también permite la generación de imágenes donde se puede observar el estiramiento de acuerdo con el tiempo que transcurre.

**Figura 13**

*Programa GOM*



*Nota.* preparación de videos para realizar correlación de imágenes

El software permite seleccionar el tamaño del mapeo que está generando, ver como se detecta la zona a evaluar, escalar la imagen con las medidas originales aumentando la precisión del estudio realizado y selección de zonas críticas donde se quiere mantener la información específica de estos puntos.

### **5.3. Preparación de muestras**

Esta etapa es crucial para garantizar la uniformidad y la validez de los resultados obtenidos en las pruebas posteriores en la máquina universal de ensayos, a través de un proceso cuidadoso de preparación, se busca garantizar la selección aleatoria de las muestras de cada uno de los grupos cortados, así como obtener mediciones precisas de las probetas.

La selección aleatoria se hace para mantener la imparcialidad de selección de las muestras, teniendo en cuenta que se separaron en grupos de 10, según la disposición del corte de la banda de rodadura, esta garantiza que las muestras sean repetitivas del conjunto de llantas y minimizar la posibilidad de cualquier sesgo en los resultados.

**Figura 14**

*probetas ISO listas para ensayo*



*Nota.* preparación de los grupos de ensayo., evidencia fotográfica

Con el fin de facilitar las mediciones y el análisis posterior se aplicó una capa de pintura blanca, esto permite una mejor visualización de las dimensiones y características durante las pruebas, los puntos negros agregados con un spray actúan como referencias visuales que permiten rastrear los cambios de forma y dimensión durante el ensayo en la máquina universal de ensayos, permitiendo el análisis por correlación e imágenes.

## Figura 15

*Probeta ISO 37*



*Nota.* probeta preparada para toma de imágenes, evidencia fotográfica.

Durante el proceso de preparación, se llevan a cabo medidas de las dimensiones clave de cada probeta, estas mediciones incluyen la longitud de galga, que es la distancia entre dos puntos de referencia en la superficie de la probeta, el ancho y el espesor, estas medidas son esenciales para un análisis mecánico preciso para obtener resultados significativos de las pruebas en la máquina universal de ensayos.

Se marca cada probeta al momento de ser medida, cada marca indica el grupo al que pertenece la probeta ya que se tomaron tres direcciones de corte, también se marca cada probeta del 1 al 10 para saber qué condiciones de ensayo se ingresan en la máquina, recordando que se tiene en cuenta la longitud de galga, ancho y espesor.

**Figura 16**

*Fracturas Probetas*



*Nota.* Evidencia fotográfica tomada en laboratorio.

#### **5.4. Montaje de laboratorio**

Los ensayos a tracción son fundamentales en el campo de la ingeniería mecánica, permiten evaluar las propiedades mecánicas de los materiales, la maquina universal de ensayos es la herramienta utilizada para el desarrollo de estos, debido a su capacidad de aplicar cargas controladas a los materiales y medir su respuesta mecánica

**Figura 17**

*Maquina universal de ensayos*



*Nota.* montaje laboratorio para ensayos ISO, foto tomada en universidad de América

Para obtener resultados precisos y con una alta confiabilidad es necesario seguir un procedimiento adecuado de montaje y considerar la metrología de las probetas utilizadas, la metrología se refiere al estudio de las mediciones y su precisión, así como las normas y estándares aplicados.

Para realizar los ensayos a tracción es esencial tener en cuenta las dimensiones y ciertas características específicas de las probetas, las cuales están basadas en normas establecidas por los organismos de normalización reconocidos en este caso siendo las normas ASTM e ISO, definiendo parámetros como la longitud, ancho y espesor de las probetas, así como los métodos de medición y los requisitos de precisión.

Con el objetivo de proporcionar información sobre el comportamiento de las probetas de caucho de llantas usadas en ensayos a tracción uniaxial se prepara el montaje de laboratorio, se realiza a verificación de la máquina que se encuentre en condiciones para el ensayo y se calibra antes de ser montadas la probetas, una vez calibrada la maquina se prepara el ensayo en el programa, se asegura de establecer una velocidad de 200mm/min que está indicada en la norma ISO 37, se ajusta y se verifica los límites de carga y desplazamiento del ensayo.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se presenta el análisis de los resultados obtenidos a partir de los ensayos de tensión uniaxial realizados en probetas de caucho de llantas usadas. La investigación se dividió en dos secciones, cada una diseñada para explorar aspectos específicos del comportamiento mecánico de los materiales bajo condiciones controladas

### 6.1. Código para análisis en R

Para el análisis de los datos obtenidos en los ensayos, se utilizó el software R con el fin de realizar diversas pruebas estadísticas y generar gráficos que permitan evaluar la normalidad de los datos y las diferencias entre las muestras. A continuación, se describen los pasos llevados a cabo y el propósito de cada uno:

Figura 18

*Código R para análisis de resultados*

```
# Análisis de normalidad para Esfuerzo
cat("\nHistograma y QQ-Plot de Esfuerzo (σ):\n")
par(mfrow=c(1,2)) # Dividir la ventana gráfica para mostrar dos gráficos
hist(esfuerzo, main="Histograma de Esfuerzo - ENSAYO ISO 37 HORIZONTAL", xlab="Esfuerzo (σ)")
qqnorm(esfuerzo, main="QQ-Plot de Esfuerzo - ENSAYO ISO 37 HORIZONTAL")
qqline(esfuerzo, col="red")

shapiro_test_esfuerzo <- shapiro.test(esfuerzo)
ad_test_esfuerzo <- ad.test(esfuerzo)

# Mostrar resultados de las pruebas de normalidad para Esfuerzo
cat("\nResultados de la prueba de Shapiro-Wilk para Esfuerzo:\n")
print(shapiro_test_esfuerzo)

cat("\nResultados de la prueba de Anderson-Darling para Esfuerzo:\n")
print(ad_test_esfuerzo)

# Análisis de normalidad para Fuerza Máxima
cat("\nHistograma y QQ-Plot de Fuerza Máxima (N):\n")
par(mfrow=c(1,2)) # Dividir la ventana gráfica para mostrar dos gráficos
hist(fuerza_maxima, main="Histograma de Fuerza Máxima - ENSAYO ISO 37 HORIZONTAL", xlab="Fuerza Máxima (N)")
qqnorm(fuerza_maxima, main="QQ-Plot de Fuerza Máxima - ENSAYO ISO 37 HORIZONTAL")
qqline(fuerza_maxima, col="red")

shapiro_test_fuerza <- shapiro.test(fuerza_maxima)
ad_test_fuerza <- ad.test(fuerza_maxima)

# Mostrar resultados de las pruebas de normalidad para Fuerza Máxima
cat("\nResultados de la prueba de Shapiro-Wilk para Fuerza Máxima:\n")
print(shapiro_test_fuerza)

cat("\nResultados de la prueba de Anderson-Darling para Fuerza Máxima:\n")
print(ad_test_fuerza)

# Transformar datos para ANOVA
datos_long <- datos %>%
  pivot_longer(cols = "Esfuerzo (σ)",
              names_to = "Variable",
              values_to = "Esfuerzo")
```

*Nota.* código utilizado en R para hacer análisis estadístico de normalidad para los seis grupos de ensayo

Carga de Librerías Necesarias

Se utilizaron las siguientes librerías en R:

readxl: Para leer archivos Excel.

ggplot2: Para crear gráficos.

nortest: Para realizar pruebas de normalidad.

tidyr: Para manipulación y transformación de datos.

Estas librerías son esenciales para el procesamiento y análisis de los datos experimentales.

Lectura de datos desde excel

El archivo excel que contiene los resultados de los ensayos se especifica y se carga en R. La hoja específica del ensayo a analizar se verifica y se extraen los datos correspondientes:

Asignación de columnas de interés

Se seleccionan las columnas relevantes para el análisis: Esfuerzo ( $\sigma$ ) y Fuerza maxima (N).

Análisis de normalidad

Para evaluar si los datos siguen una distribución normal, se generan histogramas y gráficos QQ-Plot para Esfuerzo ( $\sigma$ ) y Fuerza maxima (N). Además, se realizan pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y Anderson-Darling para cada variable. Estos análisis ayudan a determinar la adecuación de los datos para pruebas estadísticas posteriores:

Análisis de varianza (ANOVA)

Para comparar el esfuerzo ( $\sigma$ ) entre diferentes muestras, se realiza un análisis de varianza (ANOVA). Los datos se transforman para adecuarse al formato requerido por el ANOVA y se lleva a cabo el análisis, cuyos resultados indican si hay diferencias significativas entre las muestras:

Visualización de resultados

Finalmente, se generan gráficos para visualizar los resultados del análisis, incluyendo boxplots que muestran la distribución del esfuerzo ( $\sigma$ ) entre las diferentes muestras. Estos gráficos facilitan la interpretación visual de las diferencias observadas:



## 6.2. Probetas sometidas a tensión uniaxial

En la primera fase de ensayos, las probetas a tensión uniaxial siguiendo las directrices establecidas por la norma ISO 37. Esta normativa internacional proporciona un marco estandarizado para evaluar las propiedades mecánicas de materiales elastoméricos especificando parámetros clave como la velocidad de deformación y las condiciones ambientales, Durante estos ensayos, se aplicó una carga uniaxial gradual sobre las probetas de caucho, permitiendo estudiar su respuesta frente a esfuerzos de tracción.

En la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales, es crucial entender la distribución de las fuerzas y los esfuerzos que se aplican. En este análisis, se realizan pruebas de normalidad sobre el esfuerzo ( $\sigma$ ) y la fuerza máxima (N) obtenidos del experimento a tracción. La normalidad de los datos es un supuesto clave para la aplicación de muchos métodos estadísticos, como el análisis de varianza (ANOVA). Por lo tanto, validar este supuesto es esencial para asegurar la validez de los análisis. Los datos analizados son los obtenidos en la tabla 3 que corresponden a los obtenidos del ensayo de las probetas ISO 37 cortadas a 45° con respecto a la banda de rodadura, estos datos son proporcionados por la maquina universal de ensayos y posteriormente interpretados en Excel.

Aplicando la fórmula de esfuerzo, se calcula el esfuerzo máximo, teniendo en cuenta la fuerza máxima reportada por la maquina universal de ensayos.

$$\sigma \text{ max(Mpa)} = \frac{F_{\text{max}}(N)}{\text{Area}(mm)^2}$$

Donde

$\sigma$  : Esfuerzo normal que se expresa en unidades de presión como los Megapascales

F: fuerza aplicada en Newton o libra

A: área transversal sobre la que actúa la fuerza, expresada en milímetro cuadrado o pulgadas.

### 6.2.1. Ensayo ISO 45

Los datos fueron obtenidos de la hoja "ENSAYO ISO 37 DIAGONAL" de un archivo Excel, e incluyen mediciones de Esfuerzo ( $\sigma$ ) y Fuerza Máxima (N) para 10 muestras diferentes. Los datos fueron procesados y analizados usando el software estadístico R.

Para evaluar la normalidad de los datos, se aplicaron dos pruebas estadísticas:

Test de Shapiro-Wilk: Adecuado para pequeños conjuntos de datos, evalúa la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Test de Anderson-Darling: Es una prueba más robusta que se enfoca en las colas de la distribución, proporcionando un complemento a la prueba de Shapiro-Wilk.

**Tabla 3**

*Datos obtenidos del ensayo ISO 37 PROBETAS 45°*

MUESTRA	GROSOR (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)	Fuerza máxima (N)
1	11,13	5,03	55,9839	4,31	241,55
2	6,64	5,033	33,41912	4,67	156,26
3	6,97	5,233	36,47401	5,62	205,29
4	6,97	5,23	36,4531	2,68	97,88
5	11,06	5	55,3	4,03	223,17
6	6,99	5,36	37,4664	5,37	201,51
7	6,2	4,78	29,636	4,72	139,95
8	6,28	4,956	31,12368	6,77	210,71
9	9,1	4,89	44,499	5,26	234,13
10	9,11	4,89	44,5479	3,36	149,79

*Nota.* datos registrados y interpretados en excel

### 6.2.1.a. Evaluación de la Normalidad para Esfuerzo ( $\sigma$ )

**Tabla 4**

*Resultado pruebas de normalidad Esfuerzo ( $\sigma$ )*

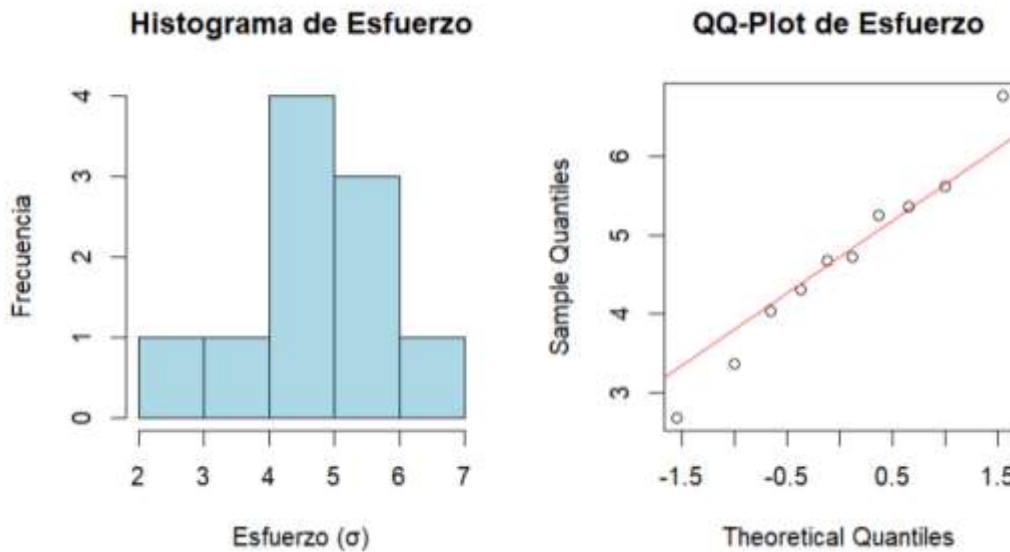
Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.98814	0.994
Anderson-Darling	0.14533	0.95

*Nota.* resultados Obtenidos en R estudio

Los valores p (0.994 para Shapiro-Wilk y 0.95 para Anderson-Darling) son mayores a 0.05, lo que indica que no se rechaza la hipótesis de normalidad.

**Figura 19**

*Histograma, QQ-Plot de Esfuerzo Rstudio*



*Nota.* Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

**En el Histograma** la distribución de los datos de Esfuerzo ( $\sigma$ ) es aproximadamente simétrica, con la mayoría de los valores concentrados alrededor de un punto central

Los puntos del gráfico QQ se alinean bien con la línea de referencia, lo que sugiere que los datos no presentan desviaciones significativas de la normalidad.

6.2.1.b. Evaluación de la Normalidad para Fuerza Máxima (N). Los resultados de las pruebas de normalidad para Fuerza Máxima (N) se presentan en la Figura 2 y la Tabla 2.

**Tabla 5**

*Resultados de normalidad para Fuerza Máxima*

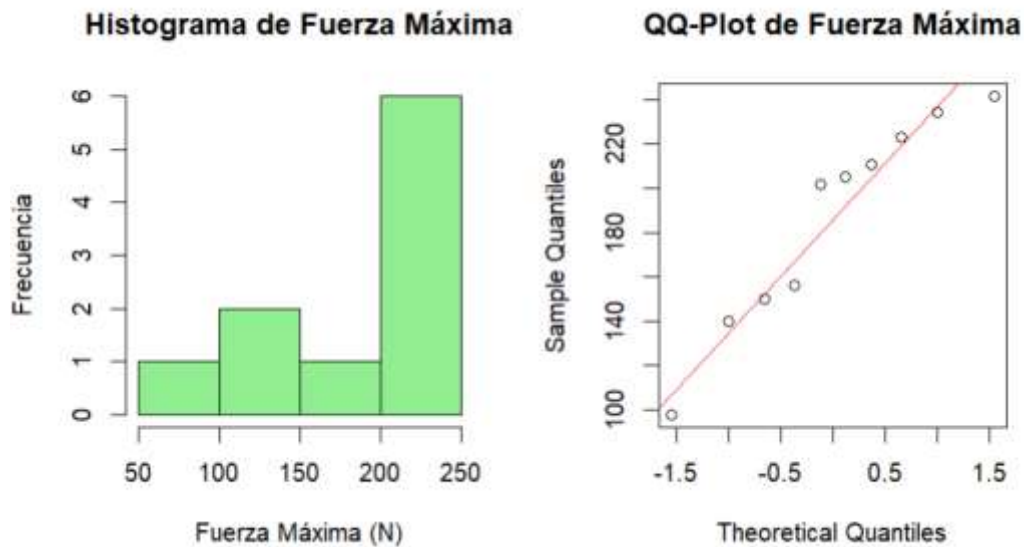
Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.92038	0.3601
Anderson-Darling	0.38519	0.3205

*Nota.* resultados Obtenidos en R estudio

Los valores p (0.3601 para Shapiro-Wilk y 0.3205 para Anderson-Darling) son mayores a 0.05, pero la evidencia gráfica sugiere que los datos no se ajustan bien a una distribución normal.

**Figura 20**

*Histograma y QQ-Plot de Fuerza Máxima (N)*



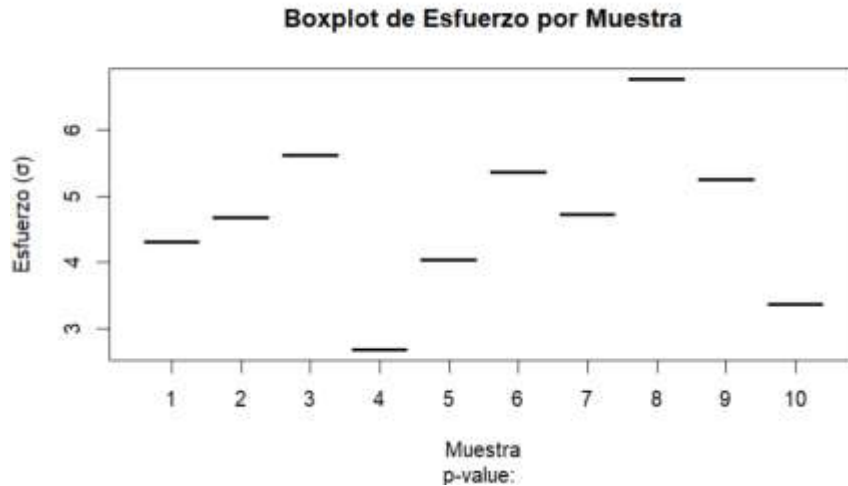
*Nota.* Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

Histograma: La distribución de los datos de Fuerza Máxima (N) es asimétrica, con una mayor concentración de valores en el extremo derecho.

QQ-Plot: Los puntos del gráfico QQ muestran desviaciones significativas de la línea de referencia, indicando una falta de ajuste a una distribución normal.

**Figura 21**

*boxplot esfuerzo*



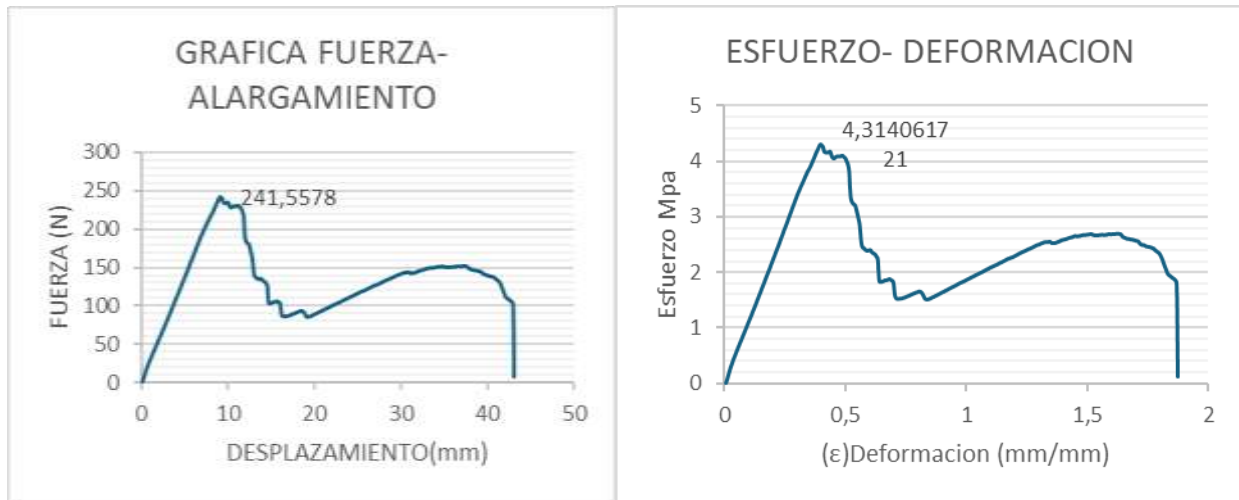
**Nota.** Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

El box plot de los valores de esfuerzo muestra una dispersión considerable entre las diferentes muestras. La mediana de los esfuerzos se sitúa aproximadamente en el centro de la caja, lo que indica que la mitad de los valores de esfuerzo están por encima y la otra mitad por debajo de esta mediana.

La presencia de outliers, especialmente en la parte superior del rango, sugiere que algunas muestras presentan una resistencia significativamente mayor en comparación con las otras. Estos valores atípicos indican una variabilidad en la capacidad de las muestras para soportar esfuerzos diagonales, lo que podría deberse a diferencias en la estructura interna o en la calidad del material.

**Figura 22**

*Fuerza- Alargamiento probeta 1 ISO 37 45°*



*Nota.* graficas realizadas en Excel después de interpretación de nube de datos obtenida de la maquina universal de ensayos

La dispersión observada en los valores de esfuerzo y fuerza máxima sugiere que, aunque algunas muestras tienen una capacidad de carga y resistencia significativa, hay una falta de uniformidad en el desempeño de las probetas. Esta variabilidad puede deberse a diferencias en la orientación de las fibras, variaciones en el grosor o defectos internos en el material. Es crucial considerar estos factores en la evaluación de la calidad del material y en la predicción de su comportamiento en aplicaciones prácticas.

Los valores atípicos identificados en el box plot deben ser investigados más a fondo para comprender las causas subyacentes de esta variabilidad. Esto podría incluir un análisis más detallado de la estructura del material y la identificación de cualquier defecto o inconsistencia en la producción.

En resumen, el **ensayo ISO 37 diagonal** ha demostrado ser una herramienta efectiva para evaluar la resistencia de las muestras a los esfuerzos diagonales, revelando una variabilidad significativa que debe ser considerada en el diseño y la aplicación de estos materiales en la industria. La comprensión de estas diferencias es esencial para mejorar la calidad y la consistencia de los materiales utilizados en aplicaciones críticas.

### 6.2.2. Ensayo ISO vertical

El **ensayo ISO 37 vertical** se realizó para evaluar el comportamiento mecánico de las muestras cuando se someten a esfuerzos en una dirección vertical con respecto a la banda de rodadura de la llanta. Este ensayo es fundamental para entender cómo la orientación vertical afecta las propiedades de resistencia y elasticidad del material probado.

**Tabla 6**

*Valores para análisis ISO Vertical*

MUESTRA	GROSOR (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)	Fuerza máxima (N)
1	7,07	5,40	38,15	19,69	751,23
2	7,10	5,26	37,35	15,48	578,29
3	6,63	5,13	34,01	16,54	562,58
4	6,87	5,22	35,86	15,52	556,46
5	6,83	4,80	32,78	13,39	438,85
6	8,23	5,20	42,80	12,23	523,59
7	6,80	5,07	34,48	16,08	554,53
8	6,66	5,16	34,37	13,01	447,03
9	6,63	5,10	33,81	16,71	565,00
10	6,80	5,10	34,68	15,05	522,07

*Nota.* datos registrados y interpretados en excel

6.2.2.a. Evaluación de la Normalidad para Esfuerzo ( $\sigma$ ). Shapiro-Wilk: Con un valor p justo por encima de 0.05, no se puede rechazar la hipótesis nula de normalidad. Sin embargo, el valor p cercano al límite sugiere que los datos podrían no ser perfectamente normales

**Tabla 7**

*Estadísticos de prueba*

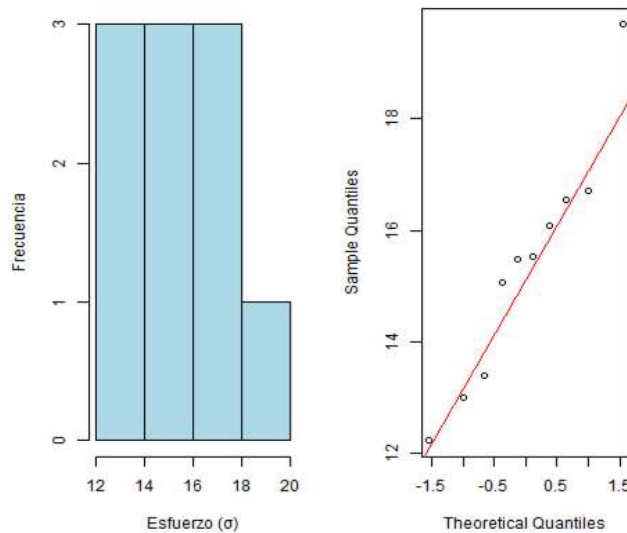
Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.84498	0.05061
Anderson-Darling	0.71431	0.4198

*Nota.* resultados Obtenidos del análisis en R estudio

Anderson-Darling: El valor p por debajo de 0.05 indica que se rechaza la hipótesis nula de normalidad, sugiriendo que los datos de esfuerzo no siguen una distribución normal.

**Figura 23**

*Graficas R estudio*



*Nota.* Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

El histograma muestra que los datos de esfuerzo se distribuyen de manera no uniforme, con una tendencia hacia valores más bajos de esfuerzo. La mayor concentración de datos se encuentra en el rango de 12 a 16  $\sigma$

El QQ-Plot revela que los datos no siguen una distribución normal perfecta. Los puntos se desvían de la línea de referencia en ambos extremos, lo que sugiere la presencia de valores atípicos o una distribución sesgada.



6.2.2.b. Evaluación de la Normalidad para Fuerza Máxima (N). Shapiro-Wilk El valor p superior a 0.05 indica que no se rechaza la hipótesis nula de normalidad, sugiriendo que los datos de fuerza máxima podrían seguir una distribución normal.

**Tabla 8**

*estadísticos de prueba*

Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.94779	0.6424
Anderson-Darling	0.35076	0.393

*Nota.* Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

Anderson-Darling Con un valor p superior a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de normalidad, indicando que los datos de fuerza máxima son consistentes con una distribución normal.

análisis ANOVA:

Grados de libertad (Df): 9

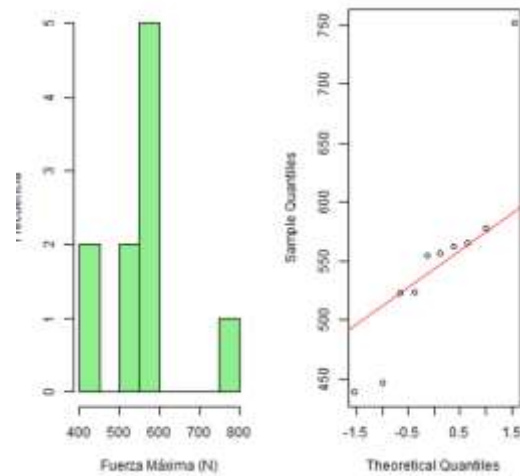
Suma de cuadrados (Sum Sq): 218.3

Media cuadrática (Mean Sq): 24.25

El análisis ANOVA muestra que existe una variabilidad significativa en los esfuerzos entre las diferentes muestras. Esto sugiere diferencias en la resistencia de las probetas cuando se someten a esfuerzos verticales.

**Figura 24**

*histograma y qq plot fuerza*



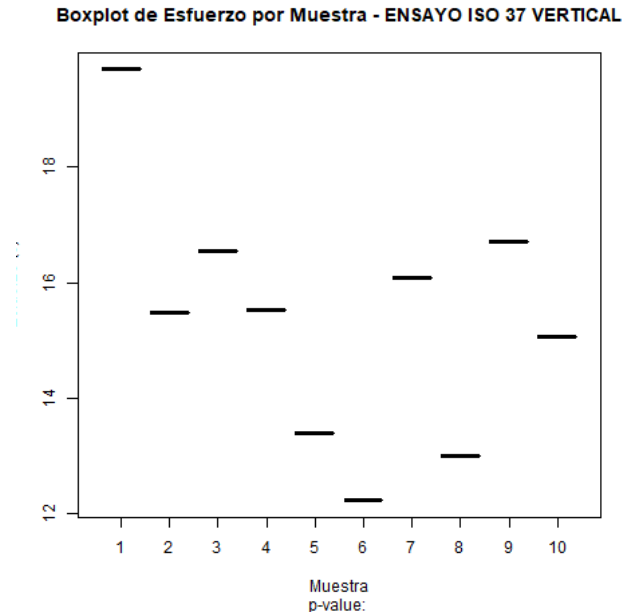
*Nota.* Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

El histograma(figura22) de la fuerza máxima muestra una mayor dispersión de los datos, con una concentración de valores alrededor de los 500 a 600 N.

El QQ-Plot (figura22) indica una desviación moderada de la normalidad, especialmente en los extremos, lo que sugiere la presencia de valores extremos o una distribución sesgada.

**Figura 25**

*boxplot esfuerzo*



*Nota.* Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

Distribución de Esfuerzos: El box plot (figura 25) muestra una considerable dispersión en los valores de esfuerzo, con una mediana situada en el centro de la caja, indicando una dispersión relativamente uniforme de los datos alrededor de la mediana.

La presencia de valores atípicos sugiere la existencia de muestras con una resistencia significativamente menor.

La dispersión observada en los valores de esfuerzo y fuerza máxima en el ensayo ISO 37 vertical indica una notable variabilidad en la capacidad de las muestras para soportar esfuerzos en una orientación vertical. Esta variabilidad puede deberse a diferencias en la composición del material, la presencia de defectos internos o variaciones en el grosor de las muestras.

Los valores atípicos identificados sugieren la necesidad de una evaluación más detallada para comprender las causas de esta variabilidad. Es esencial investigar si estos valores extremos son resultado de problemas en la fabricación o si representan comportamientos atípicos del material en condiciones normales de uso.

### 6.2.3. Ensayo ISO horizontal

. En esta sección, realizaremos un análisis detallado de los resultados obtenidos del ensayo "ISO 37 HORIZONTAL" con un enfoque en dos variables clave: Esfuerzo ( $\sigma$ ) y Fuerza máxima (N). Se realizaron pruebas de normalidad y un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la distribución y la variabilidad de las muestras. Los resultados se presentan a continuación.

**Tabla 9**

*Resultados ensayo ISO37 Horizontal*

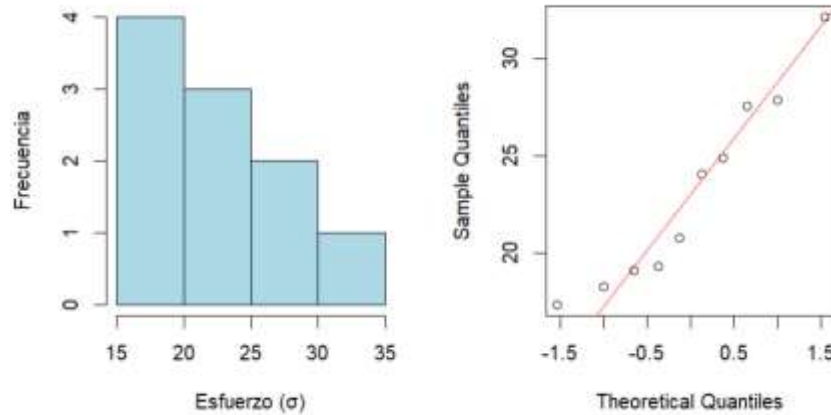
MUESTRA	GROSOR (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)	Fuerza máxima (N)
1	9,80	5,13	50,27	27,55	1385,00
2	8,00	5,03	40,24	24,08	969,15
3	7,16	5,03	36,01	32,09	1155,80
4	6,70	4,96	33,23	19,35	642,96
5	7,16	4,87	34,84	24,90	867,63
6	11,37	4,93	56,07	17,39	975,12
7	10,36	5,06	52,42	19,12	1002,26
8	10,26	5,03	51,61	20,82	1074,24
9	10,16	5,20	52,83	27,88	1472,76
10	11,30	4,96	56,05	18,31	1026,51

*Nota.* datos registrados y interpretados en excel

### 6.2.3.a. Evaluación de la Normalidad para Esfuerzo ( $\sigma$ )

**Figura 26**

*Histograma y QQ-Plot Ensayo ISO 37 Horizontal*



**Nota.** Resultados y gráficos generados mediante el análisis realizado en el programa R estudio

En el histograma (Figura 23), se observa que la distribución del Esfuerzo ( $\sigma$ ) muestra una asimetría hacia la derecha. La mayoría de los valores se agrupan entre 15 y 30, con pocos valores en el rango más alto.

En el QQ-Plot, los puntos se desvían de la línea de referencia, lo que sugiere una ligera desviación de la normalidad.

**Tabla 10**

*Pruebas de normalidad Esfuerzo ensayo ISO37 Horizontal*

Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.92365	0.3884
Anderson-Darling	0.34929	0.3964

**Nota.** resultados pruebas estadísticas realizadas por R

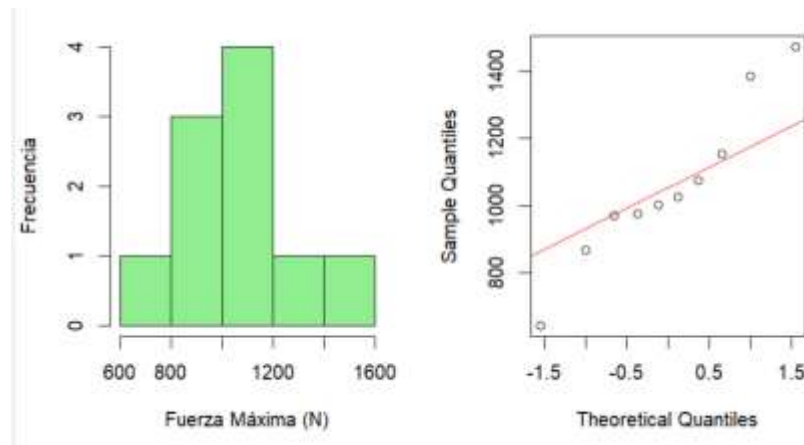
Ambos valores p son mayores que 0.05, indicando que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de normalidad. Por lo tanto, se puede concluir que la distribución del Esfuerzo ( $\sigma$ ) no se desvía significativamente de una distribución normal.

### 6.2.3.b. Evaluación de la Normalidad para Fuerza Máxima (N)

**Histograma y QQ-Plot:** El histograma (Figura 24) muestra una distribución más centrada en torno a los 1000 N, con un ligero sesgo hacia la derecha.

**Figura 27**

*Histograma y QQ-plot Fuerza ensayo ISO 37 Horizontal*



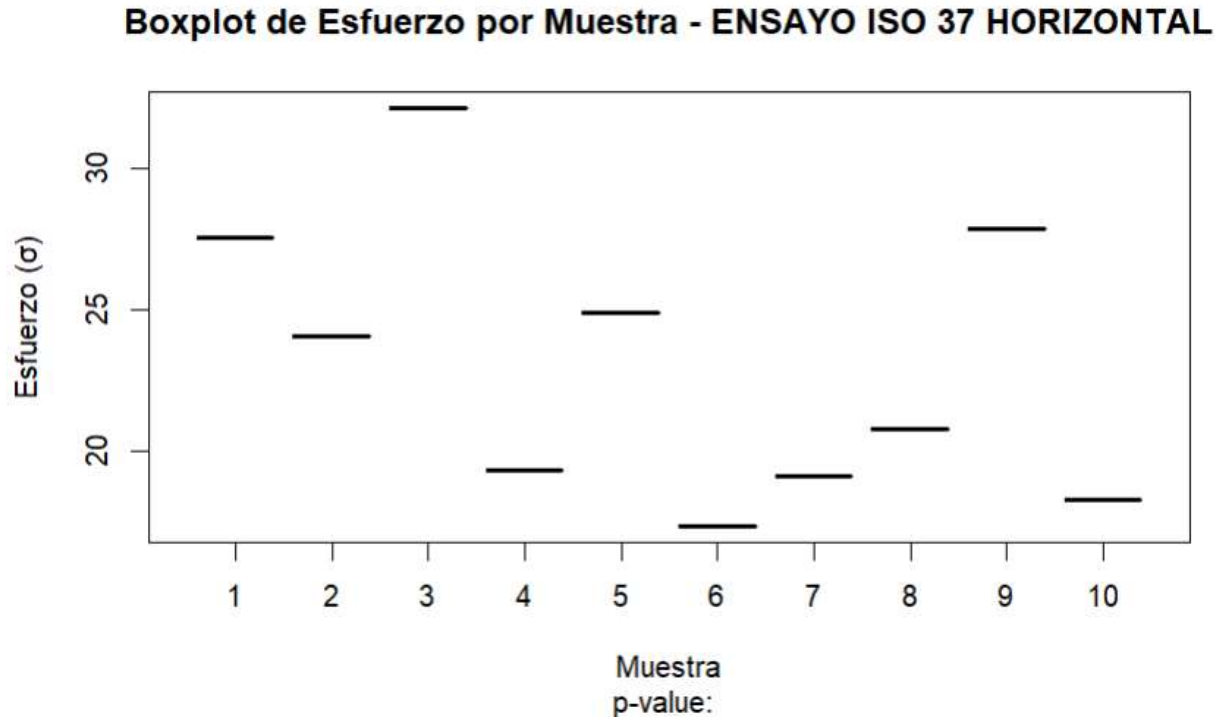
*Nota.* Interpretación de los datos fue generada mediante código en R studio

El QQ-Plot muestra que los puntos se alinean razonablemente bien con la línea de referencia, aunque hay algunas desviaciones en los extremos

El boxplot (Figura,25) muestra la variabilidad del Esfuerzo ( $\sigma$ ) en cada muestra. Se observa una variación significativa entre algunas muestras, indicando que podría haber diferencias en las propiedades mecánicas de los materiales evaluados.

**Figura 28**

*Boxplot de esfuerzo por Muestra Ensayo ISO 37 Horizontal*



*Nota.* resultados Obtenidos en R estudio

El ANOVA sugiere que hay diferencias en el Esfuerzo ( $\sigma$ ) entre las muestras. La media de cuadrados alta y la variación visual en el boxplot refuerzan esta conclusión. Aunque el p-valor específico no se muestra aquí, la suma de cuadrados y la media de cuadrados indican una variabilidad considerable que justifica una revisión más detallada de las muestras específicas para identificar patrones o anomalías.

El ANOVA se utilizó para determinar si hay diferencias significativas en el Esfuerzo ( $\sigma$ ) entre las diferentes muestras.

**Grados de libertad (Df): 9**

**Suma de cuadrados (Sum Sq): 218.3**

Media de Cuadrados (Mean Sq):24.25

#### **6.2.4. Diferencias y consideraciones**

. El análisis de normalidad muestra que tanto el Esfuerzo ( $\sigma$ ) como la Fuerza máxima (N) siguen una distribución normal adecuada para realizar pruebas paramétricas adicionales. El análisis de varianza indica diferencias significativas entre las muestras en términos de Esfuerzo ( $\sigma$ ), lo que sugiere que las propiedades mecánicas varían entre ellas. Estos hallazgos son fundamentales para comprender la variabilidad en el comportamiento del material bajo ensayo y pueden guiar futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Los resultados muestran diferencias significativas en la capacidad de las muestras para resistir esfuerzos y fuerzas en diferentes orientaciones ISO. La variabilidad en los valores de esfuerzo y fuerza máxima entre los ensayos refleja cómo la orientación y la geometría de las muestras influyen en su rendimiento mecánico. Es notable que las orientaciones horizontales tienden a soportar esfuerzos y fuerzas más altos en comparación con las orientaciones diagonales y verticales

Esfuerzo máximo registrado: El mayor esfuerzo fue registrado en la muestra 9 del ensayo "ISO 37 Horizontal" con un valor de 27.88 MPa. Esto indica una gran capacidad de esta muestra para soportar esfuerzos en esta orientación particular, sugiriendo que tiene propiedades mecánicas superiores bajo estas condiciones específicas. El área mayor de esta muestra, junto con su grosor, probablemente contribuye a una mejor distribución de las tensiones.



**Tabla 11***Ensayo ISO 37 Diagonal*

Comparación	Muestra	Grosor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo ( $\sigma$ )	Fuerza Máxima (N)
Mayor Esfuerzo	3	6.97	5.23	36.47	5.62	205.29
Menor Esfuerzo	4	6.97	5.23	36.45	2.68	97.88
Mayor Fuerza	1	11.13	5.03	55.98	4.31	241.55
Menor Fuerza	2	6.64	5.03	33.49	4.67	156.26

*Nota.* resultados de los ensayos, mayores valores y menores valores registrados,

**Tabla 12***Ensayo ISO 37 Vertical*

Comparación	Muestra	Grosor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo ( $\sigma$ )	Fuerza Máxima (N)
Mayor Esfuerzo	1	7.07	5.40	38.15	19.69	751.23
Menor Esfuerzo	6	8.23	5.20	42.80	12.23	523.59
Mayor Fuerza	1	7.07	5.40	38.15	19.69	751.23
Menor Fuerza	2	7.10	5.26	37.35	15.48	578.29

*Nota.* resultados de los ensayos, mayores valores y menores valores registrados,

**Tabla 13***Ensayo ISO 37 Horizontal*

Comparación	Muestra	Grosor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo ( $\sigma$ )	Fuerza Máxima (N)
Mayor Esfuerzo	9	10.16	5.20	52.83	27.88	1472.76
Menor Esfuerzo	4	6.70	4.96	33.23	19.35	642.96
Mayor Fuerza	1	9.80	5.13	50.27	27.55	1385.00
Menor Fuerza	4	6.70	4.96	33.23	19.35	642.96

*Nota.* resultados de los ensayos, mayores valores y menores valores registrados

Esfuerzo mínimo: El menor esfuerzo se observó en la muestra 4 del ensayo "ISO 37 Diagonal" con un valor de 2.68 MPa. Esta muestra tiene una menor capacidad para soportar esfuerzos, lo que puede ser debido a su área efectiva menor y a la distribución menos favorable de la carga, lo que resulta en una menor resistencia al esfuerzo aplicado

Fuerza máxima: se encontró en la muestra 9 del ensayo "ISO 37 Horizontal" con un valor de 1472.76 N. Esta alta capacidad de resistencia a la fractura bajo carga es notable y sugiere que esta muestra tiene una composición y estructura que le permite soportar grandes fuerzas sin fallar. El mayor grosor y área contribuyen a esta alta capacidad de resistencia.

Fuerza Mínima Registrada: La menor fuerza máxima se observó en la muestra 2 del ensayo "ISO 37 Diagonal" con un valor de 156.26 N. Esto indica que esta muestra es menos resistente bajo carga y probablemente fallará más rápido en comparación con otras muestras evaluadas. Su menor área y grosor efectivamente reducen su capacidad para soportar cargas elevadas.

Diferencia entre los resultados: Los resultados muestran diferencias significativas en la capacidad de las muestras para resistir esfuerzos y fuerzas en diferentes orientaciones ISO. La variabilidad en los valores de esfuerzo y fuerza máxima entre los ensayos refleja cómo la orientación y la geometría de las muestras influyen en su rendimiento mecánico. Es notable que las orientaciones horizontales tienden a soportar esfuerzos y fuerzas más altos en comparación con las orientaciones diagonales y verticales.

### **6.3. Probetas sometidas a ensayo cortante**

. En la segunda fase de los ensayos, se centró el análisis en el esfuerzo cortante utilizando probetas adecuadas, diseñadas y modificadas conforme a la norma ASTM B831-22, con modificaciones sugeridas por Nizolek et al. Se siguieron condiciones de ensayo consistentes, manteniendo a la misma que se utilizó en la primera fase de ensayos.

En esta fase, las probetas fueron seleccionadas y modificadas conforme a la norma ASTM B831-22, asegurando la precisión y fiabilidad de los resultados. Las modificaciones sugeridas por Nizolek et al. se implementaron para minimizar el pandeo y distribuir uniformemente el esfuerzo cortante. Estas modificaciones incluyeron entallas a 45 grados, que mejoran la homogeneidad del esfuerzo en la zona de corte, asegurando que el comportamiento registrado sea indicativo de las propiedades intrínsecas del caucho.

Se mantuvieron constantes las condiciones de ensayo previamente establecidas, incluyendo la velocidad de la máquina universal de ensayos, que operaba a 200 mm/min. Esta velocidad fue seleccionada para garantizar una aplicación uniforme de la carga y facilitar la comparación de resultados entre diferentes ensayos y materiales.

Al igual que en la primera fase, se realizaron pruebas de normalidad sobre los datos de esfuerzo cortante y fuerza máxima obtenidos durante el ensayo. Este análisis es crucial para determinar si los datos cumplen con los supuestos necesarios para la aplicación de métodos estadísticos como el ANOVA. La validación de estos supuestos es esencial para garantizar la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos.

Los datos fueron procesados y analizados utilizando herramientas estadísticas avanzadas. La tabla de resultados, que incluye los datos de esfuerzo cortante y fuerza máxima, fue generada a partir de los valores proporcionados por la máquina universal de ensayos. Estos datos fueron posteriormente interpretados y visualizados en Excel para facilitar la comprensión de los resultados y permitir una comparación clara con los obtenidos en la primera fase de ensayos.

cálculo del esfuerzo cortante máximo se realizó utilizando la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Donde:

$\tau$  : esfuerzo cortante, se expresa en unidades de presión como Pascales o PSI

F: fuerza aplicada en Newton o libra

A: área transversal sobre la que actúa la fuerza

Esta metodología proporciona una base sólida para entender la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales evaluados, ofreciendo una visión completa de su comportamiento mecánico bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados obtenidos en esta fase complementan los hallazgos de la primera fase, proporcionando una comprensión integral de las propiedades mecánicas de los materiales.

### **6.3.1. Ensayo esfuerzo cortante 45°**

. Las siguientes tablas presentan los resultados obtenidos de los ensayos cortantes realizados en ángulo de 45° sobre diversas muestras de material. Estos ensayos tienen como objetivo evaluar la resistencia a la deformación y la capacidad de las muestras para soportar fuerzas cortantes en esta

configuración específica. Los datos recopilados incluyen mediciones de grosor, ancho, área, esfuerzo cortante y fuerza máxima.

Se llevaron a cabo pruebas de normalidad, utilizando los métodos de Shapiro-Wilk y Anderson-Darling, para determinar si los datos de esfuerzo y fuerza máxima se ajustan a una distribución normal. Los resultados se complementan con gráficos de QQ-Plot, histogramas y gráficas de densidad que visualizan la distribución de los datos.

**Tabla 14**

*Ensayo Probetas Cortante a 45°*

MUESTRA	GROSOR (mm)	Ancho (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante(Mpa)	Fuerza maxima (N)
1	10,04	4,81	48,2924	12,30394016	594,1868
2	7,7	4,75	36,575	14,38942174	526,2931
3	8,04	4,88	39,2352	16,83312943	660,4512
4	8,58	4,75	40,755	13,52939762	551,3906
5	10,68	5,13	54,7884	12,03848077	659,5691
6	10,68	4,68	49,9824	12,08619434	604,097
7	7,18	4,74	34,0332	16,74587755	569,9158
8	7,22	4,58	33,0676	16,28266339	538,4286
9	7,68	4,73	36,3264	20,21803427	734,4484
10	10,703	4,66	49,87598	12,85005127	640,9089

*Nota.* datos registrados y interpretados en excel

6.3.1.a.Evaluación de la Normalidad para Esfuerzo ( $\sigma$ ). Shapiro-Wilk: El valor p es mayor a 0.05, lo que indica que no se rechaza la hipótesis de normalidad. Sin embargo, la cercanía del valor p a 0.05 sugiere que los datos no son perfectamente normales y que podrían existir desviaciones significativas, Similarmente, este valor p también sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar la normalidad.

**Tabla 15**

*Estadísticos de prueba ensayo cortante*

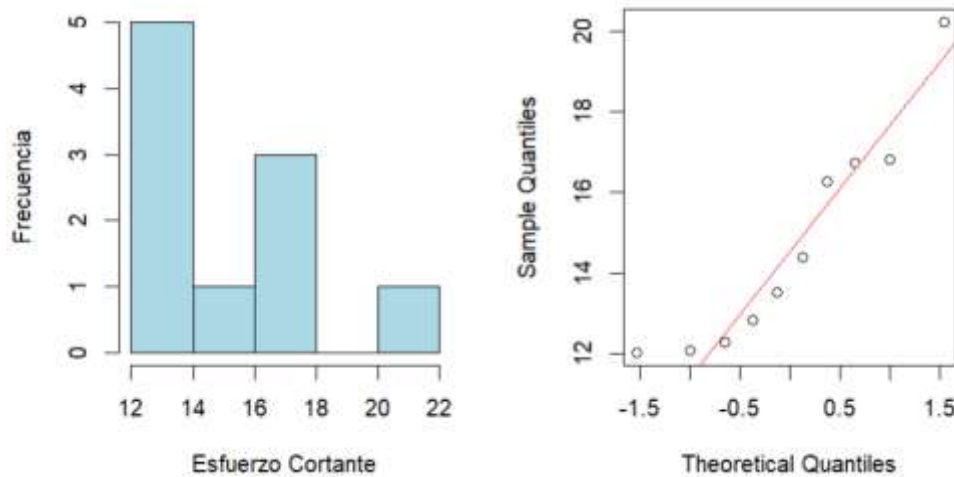
Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.88653	0.1549
Anderson-Darling	0.46263	0.1998

*Nota.* resultados pruebas estadísticas realizadas por R

Con un valor p mayor a 0.05, no se rechaza la hipótesis de normalidad, sugiriendo que los datos de esfuerzo cortante pueden considerarse normalmente distribuidos, aunque con ciertas reservas debido a la presencia de valores extremos observados en el QQ-Plot.

**Figura 29**

*histograma y QQ plot Cortante 45°*



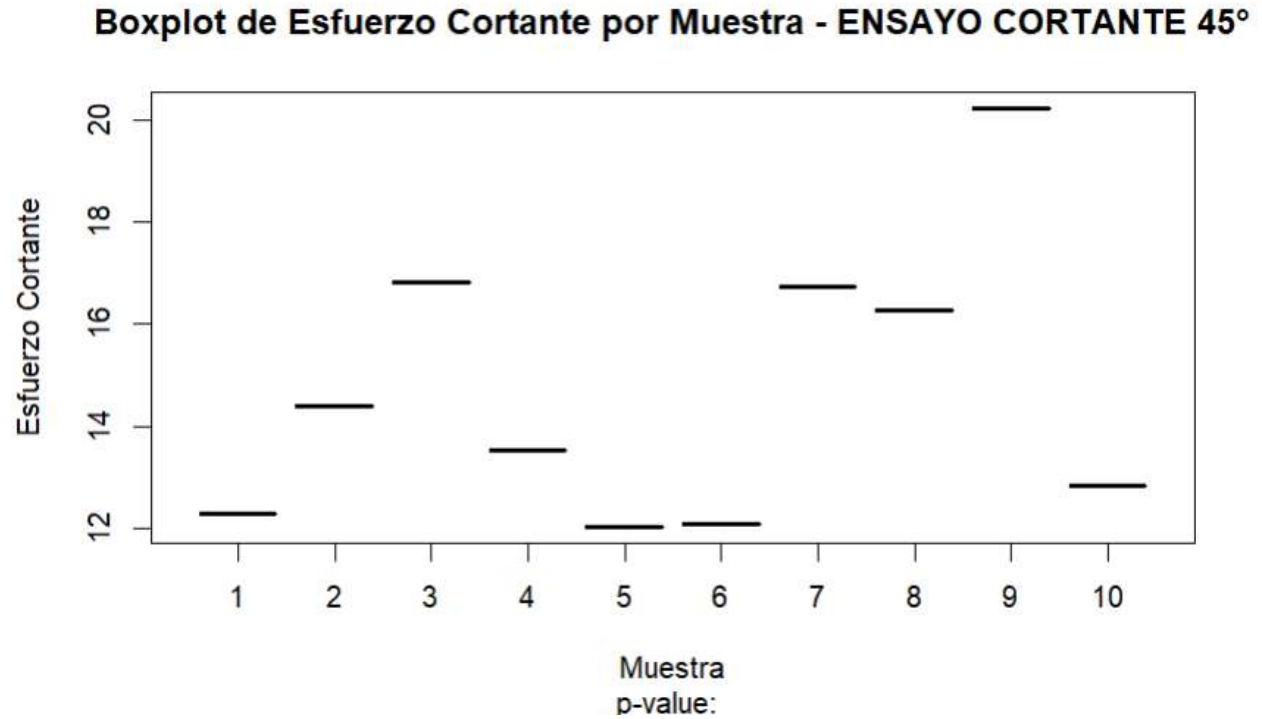
*Nota.* gráficos y resultados del análisis realizado por R estudio

El histograma (figura 27) la mayoría de los valores de esfuerzo cortante están concentrados entre 12 y 18 unidades, con una distribución que no es completamente simétrica, El histograma muestra una acumulación significativa de valores en el rango de 12 a 14 unidades

Los puntos en el QQ-Plot (figura 27) se desvían de la línea de normalidad, especialmente en los extremos, lo que sugiere que los datos podrían no seguir una distribución normal

Figura 30

Boxplot



*Nota.* gráficos y resultados del análisis realizado por R estudio

El box plot muestra una dispersión significativa en los valores de esfuerzo cortante, con la mediana situada hacia el tercio inferior de la caja, indicando una distribución sesgada hacia valores de esfuerzo más bajos. La presencia de valores atípicos en los extremos sugiere la existencia de muestras con resistencias significativamente diferentes.

Los valores atípicos indican la existencia de probetas que presentan una resistencia al esfuerzo cortante a 45 grados considerablemente diferente, lo que podría deberse a variaciones en la composición o la calidad del material.

Análisis ANOVA para Esfuerzo Cortante:

Grados de libertad (Df): 9

Suma de cuadrados (Sum Sq): 66.23

Media cuadrática (Mean Sq): 7.359

El análisis ANOVA revela una variabilidad significativa en los esfuerzos cortantes entre las diferentes muestras, lo que indica diferencias sustanciales en la resistencia al corte de las probetas cuando se someten a esfuerzos cortantes a 45 grados.

6.3.1.b. Evaluación de la Normalidad para Fuerza Máxima (N). Shapiro-Wilk: El valor p superior a 0.05 indica que no se rechaza la hipótesis de normalidad, lo que sugiere que los datos de fuerza máxima se pueden considerar normalmente distribuidos en su mayoría.

**Tabla 16**

*Estadísticos de prueba ensayo cortante*

Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.94731	0.6338
Anderson-Darling	0.24069	0.6975

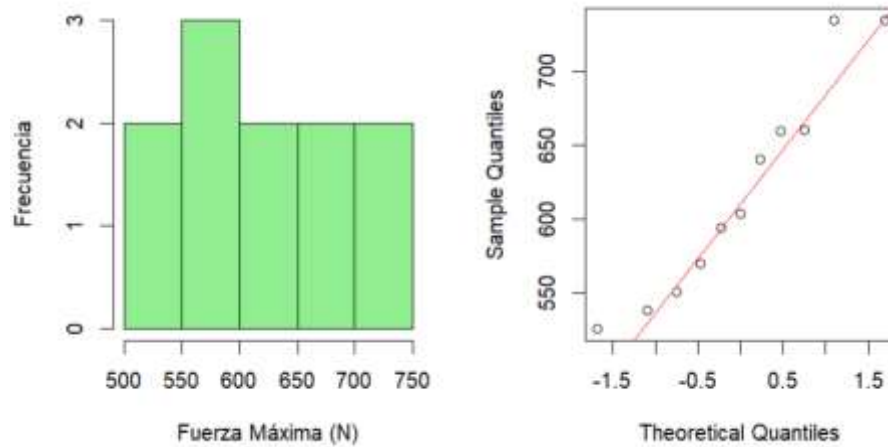
*Nota.* resultados pruebas estadísticas realizadas por R

Anderson-Darling: Con un valor p mayor a 0.05, se sugiere que los datos de fuerza máxima no muestran una desviación significativa de la normalidad, aunque la presencia de algunos valores extremos podría indicar la necesidad de una revisión más detallada.



**Figura 31**

*histograma y QQ plot Cortante*



*Nota.* gráficos y resultados del análisis realizado por R estudio

El histograma(figura29) de la fuerza máxima muestra una distribución ligeramente sesgada a la derecha, lo que indica que la mayoría de las muestras tienen valores de fuerza máxima moderados, con algunos valores extremos hacia la derecha.

El QQ-Plot(figura29) muestra que los datos de fuerza máxima se desvían de la línea de referencia en los extremos, sugiriendo la presencia de valores atípicos y una distribución que no es completamente normal.

### **6.3.2. Ensayo esfuerzo cortante vertical**

. El **ensayo cortante vertical** se realiza para evaluar la resistencia al corte del material de la llanta cuando se aplica una fuerza en una dirección perpendicular a la banda de rodadura. Este tipo de ensayo es crucial para entender cómo el material responde a cargas que simulan la compresión y el estiramiento en condiciones operativas verticales, las cuales son típicas en aplicaciones de carga directa y compresión continua.

**Tabla 17***ensayo esfuerzo cortante vertical*

MUESTRA	GROSOR (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)	Fuerza maxima (N)
1	7,25	4,79	34,7275	12,4332618	431,7761
2	7,01	4,73	33,1573	11,4300682	378,9902
3	7,6	4,95	37,62	10,1804253	382,9876
4	8,05	4,8	38,64	10,1597334	392,5721
5	8,05	4,8	38,64	9,93019928	383,7029
6	7,003	4,69	32,84407	10,5588528	346,7957
7	7,91	4,75	37,5725	8,61494444	323,685
8	7,17	4,73	33,9141	11,3634093	385,3798
9	7,39	4,71	34,8069	10,9022924	379,475
10	6,98	4,81	33,5738	9,17302182	307,9732

*Nota.* datos registrados y interpretados en excel

6.3.2.a.Evaluación de la Normalidad para Esfuerzo ( $\sigma$ ). Shapiro-Wilk :El valor p superior a 0.05 sugiere que no se rechaza la hipótesis de normalidad para los datos de esfuerzo cortante, indicando que estos datos pueden considerarse normalmente distribuidos en su mayoría, a pesar de la presencia de algunos valores atípicos.

Anderson-Darling: Con un valor p superior a 0.05, la prueba de Anderson-Darling indica que los datos de esfuerzo cortante no presentan una desviación significativa de la normalidad. Esto sugiere que la mayoría de los datos siguen una distribución normal.

**Tabla 18**

*Estadísticos de prueba*

Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.98561	0.9881
Anderson-Darling	0.9468	0.9468

*Nota.* resultados pruebas estadísticas realizadas por R

**Resultados del ANOVA para Esfuerzo Cortante:**

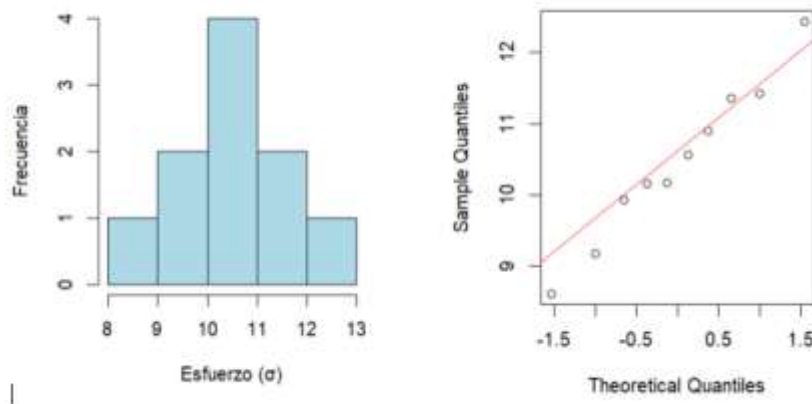
**Grados de libertad (Df): 9**

**Suma de cuadrados (Sum Sq): 11.36**

**Media cuadrática (Mean Sq): 1.263**

**Figura 32**

*histogramas y qqplot*



*Nota.* gráficos y resultados del análisis realizado por R estudio

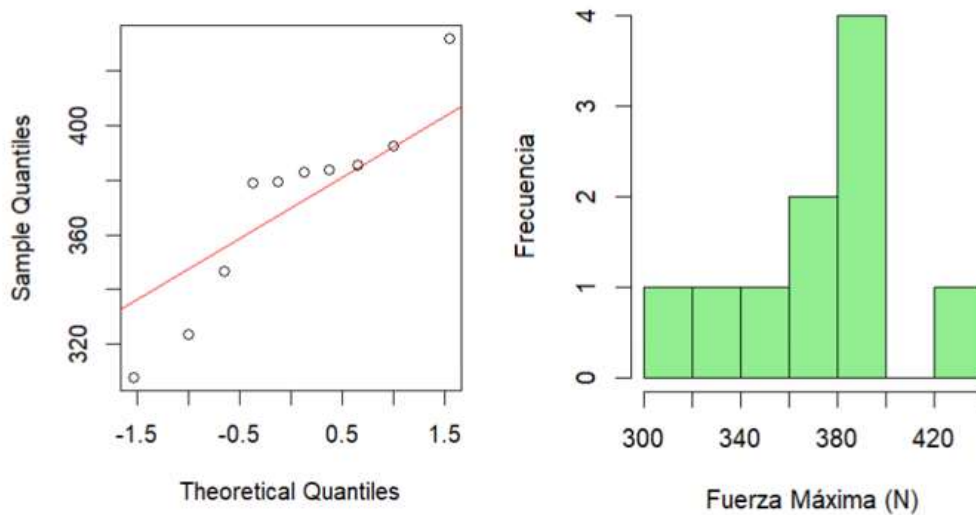
El histograma del esfuerzo cortante muestra una distribución de datos que parece aproximarse a una distribución normal, aunque se observan algunas desviaciones en los valores extremos. La mayoría de los datos están agrupados en torno a un valor central, con una leve asimetría hacia la derecha.

El QQ-Plot indica que los datos del esfuerzo cortante siguen una tendencia general hacia la normalidad, aunque los puntos en los extremos se desvían de la línea de referencia, lo que sugiere la presencia de valores atípicos.

### 6.3.2.b. Evaluación de la Normalidad para Fuerza Máxima (N)

**Figura 33**

*histogramas y qqplot*



*Nota.* gráficos y resultados del análisis realizado por R estudio

El histograma de la fuerza máxima muestra una distribución más amplia con un leve sesgo hacia la derecha, indicando que la mayoría de las muestras tienen fuerzas máximas en un rango intermedio, con algunas alcanzando valores más altos.

El QQ-Plot revela que los datos de fuerza máxima se ajustan en gran medida a la línea de referencia, con pequeñas desviaciones en los extremos, lo que indica la presencia de valores atípicos, pero en menor medida.

**Figura 34**

*Estadísticos de prueba*

Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.90869	0.2721
Anderson-Darling	0.57743	0.09859

*Nota.* resultados pruebas estadísticas realizadas por R

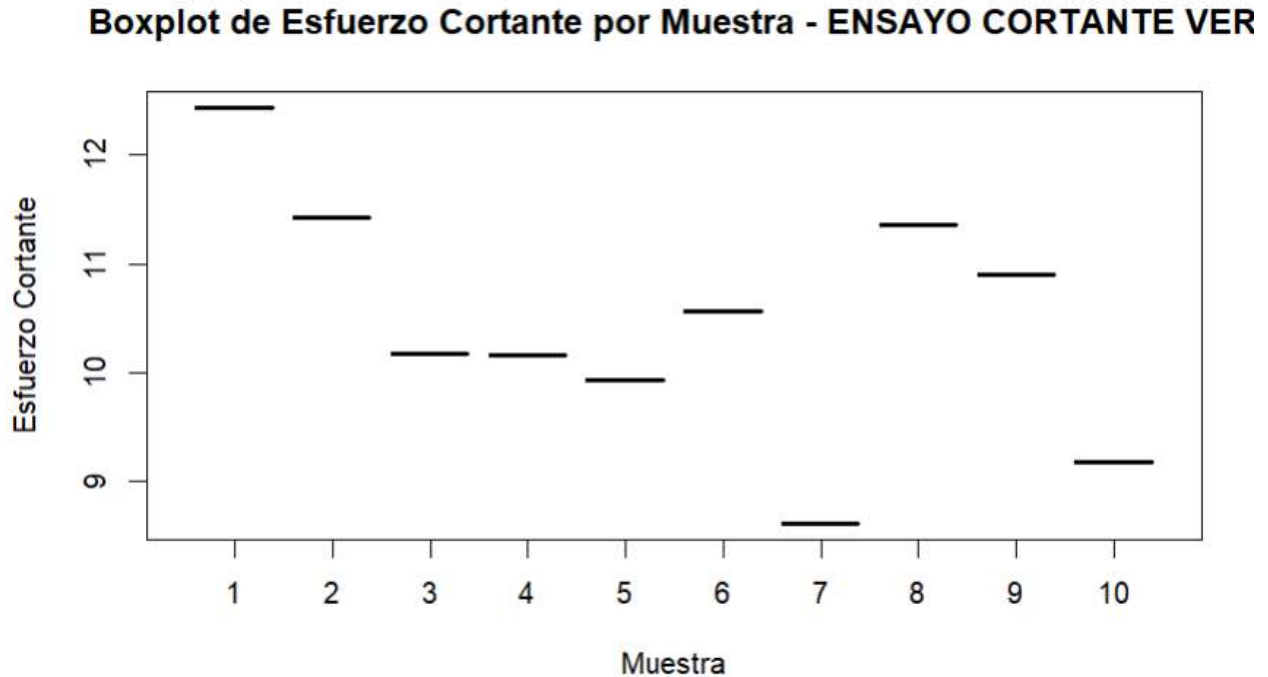
Shapiro-Wilk: El valor p superior a 0.05 indica que no se rechaza la hipótesis de normalidad para los datos de fuerza máxima, sugiriendo que estos datos son normalmente distribuidos en su mayoría, aunque algunos valores atípicos pueden influir en la interpretación.

Anderson-Darling: Un valor p cercano a 0.1 sugiere que los datos de fuerza máxima no se desvían significativamente de la normalidad, aunque se debe tener en cuenta la presencia de algunos valores atípicos que pueden influir en los resultados.

El análisis ANOVA muestra una variabilidad significativa en los esfuerzos cortantes entre las diferentes muestras, lo que indica diferencias importantes en la resistencia al corte del material de la llanta bajo condiciones de esfuerzo cortante vertical.

Figura 35

*box plot*



*Nota.* gráficos y resultados del análisis realizado por R estudio

El box plot revela una dispersión considerable en los valores de esfuerzo cortante. La mediana se encuentra cerca del centro de la caja, lo que sugiere una distribución relativamente simétrica, aunque se observan valores atípicos significativos en ambos extremos.

La presencia de valores atípicos indica que algunas muestras tienen una resistencia al esfuerzo cortante vertical significativamente diferente, lo que podría deberse a variaciones en la calidad del material o diferencias en la fabricación.

### ***6.3.3. Ensayo esfuerzo cortante horizontal***

El **ensayo cortante horizontal** se lleva a cabo para evaluar la resistencia al corte del material de la llanta cuando se somete a fuerzas en una dirección paralela a la banda de rodadura. Este tipo de ensayo es esencial para entender cómo el material se comporta bajo condiciones de esfuerzo cortante en situaciones que simulan cargas laterales, las cuales son comunes en aplicaciones donde la llanta está sometida a fuerzas de fricción y torsión.

**Tabla 19***ensayo cortante horizontal*

MUESTRA	GROSOR (mm)	Ancho (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)	Fuerza máxima (N)
1	10,343	4,7	48,6121	8,906755725	432,9761
2	7,13	4,82	34,3666	14,5583619	500,3214
3	7,59	4,7	35,673	9,410514955	335,7013
4	7,44	5,09	37,8696	14,06015115	532,4523
5	6,99	4,8	33,552	17,01423164	570,8615
6	7,4	4,87	36,038	16,69243021	601,5618
7	11,39	4,78	54,4442	8,371450035	455,7769
8	8,43	4,88	41,1384	11,24061218	462,4208
9	7,2	4,82	34,704	10,18417762	353,4317
10	6,73	4,77	32,1021	14,82282468	475,8438

*Nota.* datos registrados y interpretados en excel

6.3.3.a. Evaluación de la Normalidad para Esfuerzo ( $\sigma$ ) Shapiro-Wilk: Con un valor p mayor a 0.05, no se rechaza la hipótesis de normalidad, lo que indica que los datos de esfuerzo cortante pueden considerarse normalmente distribuidos. Sin embargo, la presencia de valores atípicos sugiere que se deben interpretar con cautela.

**Tabla 20***Estadísticos de prueba*

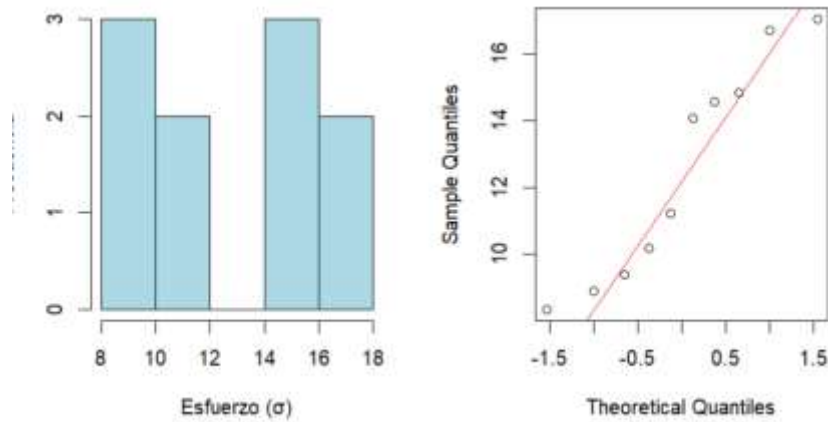
Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.90239	0.2327
Anderson-Darling	0.41205	0.2726

*Nota.* resultados pruebas estadísticas realizadas por R

Anderson-Darling: El valor p mayor a 0.05 sugiere que los datos de esfuerzo cortante no presentan una desviación significativa de la normalidad. Esto es coherente con el histograma, que muestra una distribución que se acerca a la normalidad.

**Figura 36**

*histograma y qq plot*



**Nota.** Resultados y gráficos obtenidos del análisis realizado en R estudio.

El histograma del esfuerzo cortante presenta una distribución de datos que se acerca a la normalidad, aunque con cierta asimetría. La mayoría de los datos están concentrados en torno a un valor central, con algunas muestras presentando esfuerzos más elevados.

El QQ-Plot indica que los datos del esfuerzo cortante se desvían ligeramente de una distribución normal en los extremos, lo que sugiere la presencia de valores atípicos que no siguen la tendencia normal.

6.3.3.b. Evaluación de la Normalidad para Fuerza Máxima (N). Shapiro-Wilk: El valor p superior a 0.05 indica que no se rechaza la hipótesis de normalidad para los datos de fuerza máxima, lo que sugiere que estos datos son normalmente distribuidos en su mayoría.



**Tabla 21**

*Estadísticos de prueba*

Prueba	Estadístico	Valor p
Shapiro-Wilk	0.96415	0.832
Anderson-Darling	0.19233	0.8584

*Nota.* resultados pruebas estadísticas realizadas por R

Un valor p mayor a 0.05 sugiere que los datos de fuerza máxima no se desvían significativamente de la normalidad, aunque la presencia de valores atípicos en los extremos puede influir en la interpretación.

Análisis ANOVA

Grados de libertad (Df): 9

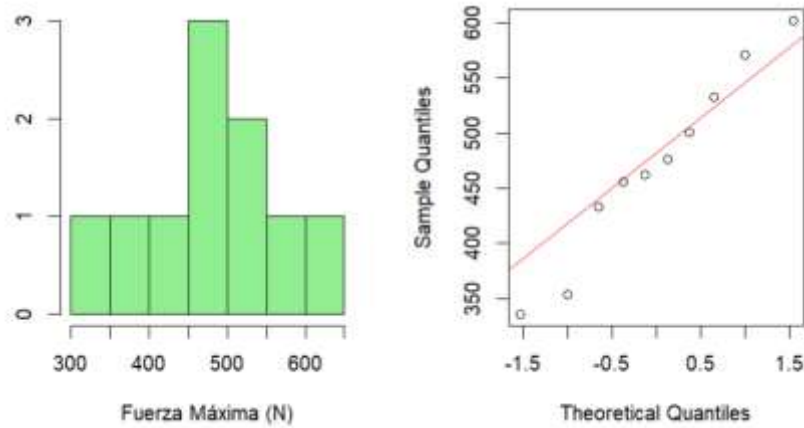
Suma de cuadrados (Sum Sq): 96.46

Media cuadrática (Mean Sq): 10.72

El análisis ANOVA muestra una variabilidad significativa en los esfuerzos cortantes entre las diferentes muestras. Esto indica diferencias importantes en la resistencia al corte del material de la llanta bajo condiciones de esfuerzo cortante horizontal.

**Figura 37**

*Histograma y QQ Plot*



*Nota.* Gráficos para análisis de normalidad de los datos obtenidos en programa R estudio

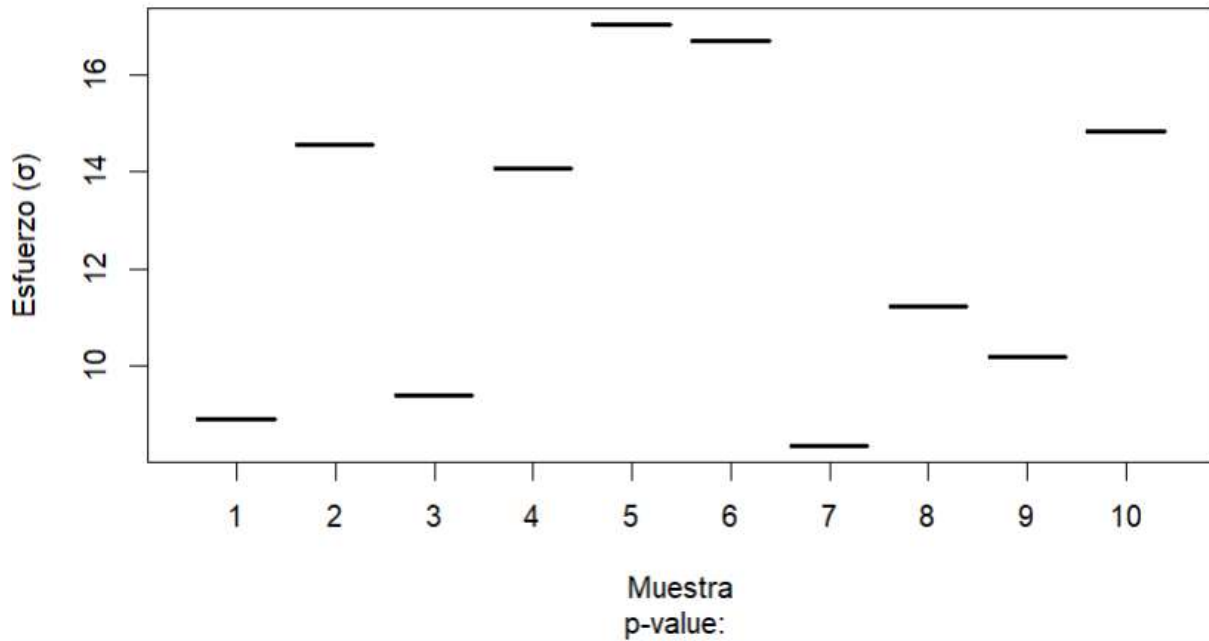
El histograma de la fuerza máxima muestra una distribución más dispersa y asimétrica hacia la derecha, indicando que la mayoría de las muestras tienen fuerzas máximas moderadas, con algunas alcanzando valores más elevados.

El QQ-Plot revela que los datos de fuerza máxima se ajustan en gran medida a la línea de referencia, con algunas desviaciones en los extremos, lo que indica la presencia de valores atípicos.

Figura 38

Boxplot

### Boxplot de Esfuerzo Cortante por Muestra - ENSAYO CORTANTE HORI:



*Nota.* gráficos y resultados obtenidos por análisis en R estudio

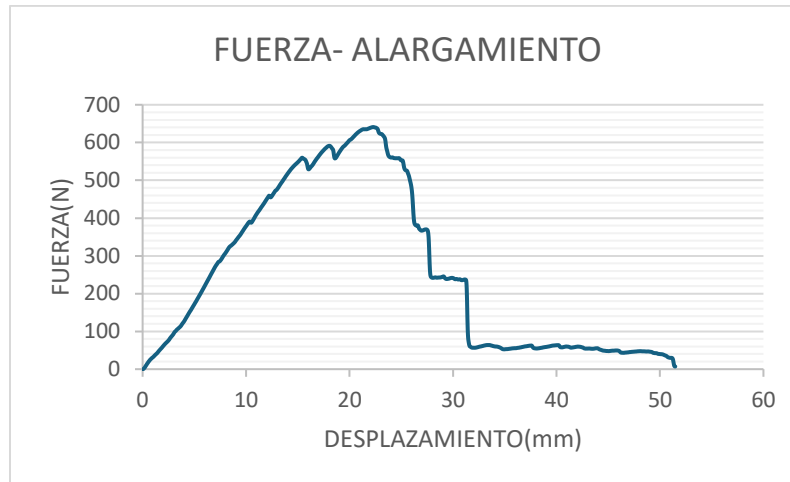
El box plot revela una dispersión considerable en los valores de esfuerzo cortante. La mediana se encuentra cerca del centro de la caja, lo que sugiere una distribución relativamente simétrica, aunque con valores atípicos significativos en ambos extremos.

La presencia de valores atípicos indica que algunas muestras tienen una resistencia al esfuerzo cortante horizontal significativamente diferente, lo que podría deberse a variaciones en la calidad del material o diferencias en la fabricación.

## 6.4. Graficas Obtenidas

Figura 39

*grafica esfuerzo vs alargamiento*

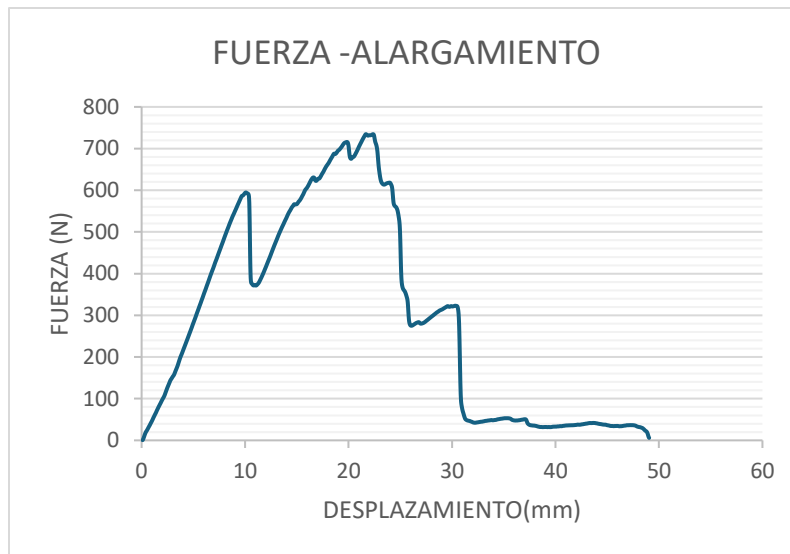


*Nota.* Grafica obtenida con la nube de datos del ensayo en la maquina universal de ensayos

Ruptura por Capas: La caída brusca de la fuerza después del pico inicial sugiere la ruptura inicial de una o varias capas de la llanta. Las llantas están compuestas por múltiples capas de materiales, como acero y caucho, que contribuyen a su resistencia. La ruptura de una capa principal reduce significativamente la capacidad de la muestra para soportar fuerza adicional, reflejándose en la caída brusca de la fuerza.

**Figura 40**

*grafica esfuerzo vs alargamiento*

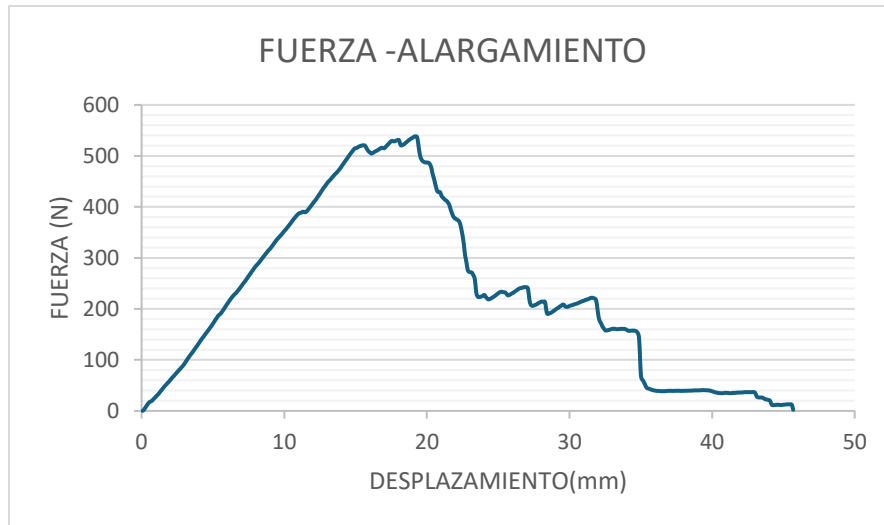


*Nota.* Grafica obtenida con la nube de datos del ensayo en la maquina universal de ensayos

**Desprendimiento Progresivo:** Los picos menores después de la caída principal indican una ruptura progresiva de las capas restantes. Cada caída posterior podría corresponder a la ruptura de capas secundarias o al deslizamiento entre capas que no se rompen de manera uniforme, lo cual es típico en materiales compuestos como las llantas.

**Figura 41**

*grafica esfuerzo vs alargamiento*



**Nota.** Grafica obtenida con la nube de datos del ensayo en la maquina universal de ensayos

Comportamiento Elástico y Plástico: La parte lineal de la gráfica corresponde al comportamiento elástico de la muestra, donde la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. La caída abrupta después del pico sugiere el límite de ruptura de una de las capas de la llanta.

**Figura 42**

*Probeta fracturada*

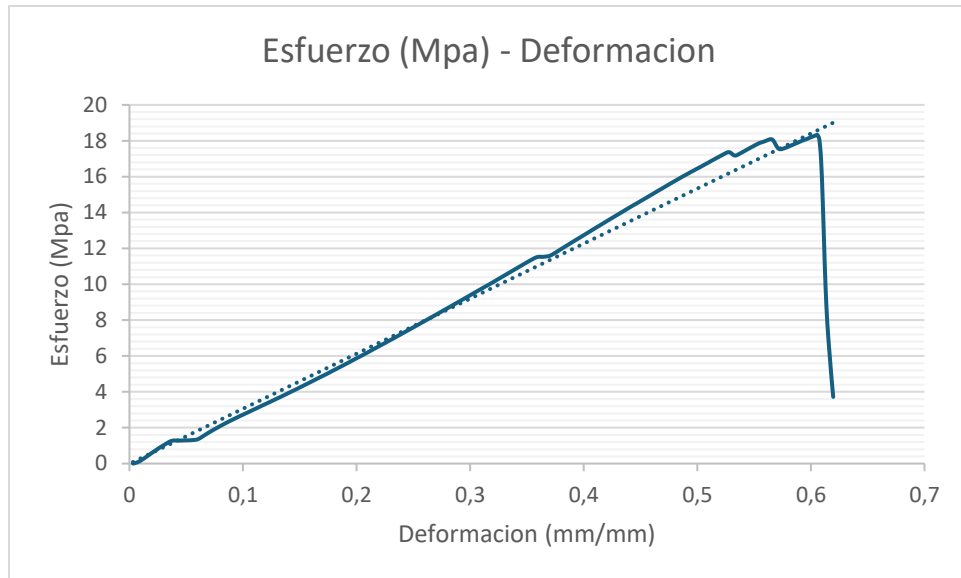


**Nota.** Foto tomada de probeta después de ser sometida a ensayo, se evidencia ruptura por capas

Fractura en Capas: La ruptura abrupta al final de la curva indica un fallo catastrófico en una o más capas de la llanta, superando la capacidad de soportar esfuerzos adicionales. Esta fractura en capas es un comportamiento típico en materiales compuestos, donde la resistencia global se ve comprometida una vez que una capa crítica se rompe.

**Figura 43**

*Graficas esfuerzo deformación*



**Nota.** grafica con comportamiento casi lineal, se denota fracturas pequeñas de las capas

ruptura Multicapas: Al igual que en la primera gráfica, la caída abrupta de la fuerza después del pico máximo es indicativa de la ruptura inicial de una capa importante de la llanta. Las fluctuaciones menores posteriores reflejan la ruptura progresiva de capas secundarias.

Heterogeneidad del Material: La repetición del patrón de picos menores y caídas refleja la naturaleza heterogénea de la llanta, donde diferentes capas pueden resistir o fallar a diferentes niveles de fuerza debido a su composición y orientación en la estructura.



**Figura 44**

*capas de probeta fracturada*



**Nota.** evidencia de las capas que ayudan a la llanta a resistir fuerzas externas.

## 7. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluaron las propiedades mecánicas de un neumático a través de dos tipos de ensayos: uno siguiendo la norma ISO 37 y otro ensayo adaptado para aplicar un esfuerzo cortante. El objetivo es comparar la resistencia del material en diferentes orientaciones de corte con respecto a la banda de rodadura y determinar cómo la forma de la probeta y el tipo de esfuerzo influyen en la capacidad del material para soportar fuerzas aplicadas. Ensayos ISO

### Ensayo ISO 37 Diagonal

En el ensayo ISO con corte diagonal, las muestras presentaron una resistencia máxima promedio de 186,024 N. El mayor valor de resistencia fue de 241,55 N, mientras que el menor fue de 97,88 N. Estos valores indican una buena distribución de la resistencia a lo largo de la dirección diagonal, aunque se observan variaciones significativas que podrían sugerir diferencias en la homogeneidad del material en esta orientación.

### Ensayo ISO 37 Horizontal

El ensayo con corte horizontal mostró un comportamiento muy consistente, con una resistencia máxima promedio de 1472,76 N. El mayor valor registrado fue de 1472,76 N y el menor de 642,96 N. La alta resistencia en esta orientación sugiere que el material del neumático está diseñado para soportar fuerzas significativas en la dirección de la banda de rodadura.

### Ensayo ISO 37 Vertical

En el caso del corte vertical, la resistencia máxima promedio fue de 751,23 N. El mayor valor observado fue de 751,23 N y el menor de 447,03 N. Estos resultados demuestran que, aunque la orientación vertical ofrece menos resistencia que la horizontal, sigue siendo considerablemente fuerte, reflejando la capacidad del material para resistir fuerzas aplicadas en dirección perpendicular a la banda de rodadura.

### Ensayo Cortante 45°

En los ensayos cortantes con orientación a 45°, la resistencia máxima promedio fue de 734,4484 N. El mayor valor alcanzado fue de 734,4484 N y el menor de 526,2931 N. La dirección a 45° mostró una alta capacidad para soportar fuerzas cortantes, lo que sugiere que el material tiene una buena distribución de resistencia en esta orientación oblicua.

#### Ensayo Cortante Horizontal

Para el corte horizontal bajo esfuerzo cortante, la resistencia máxima promedio fue de 601,5618 N. Se registró un valor máximo de 601,5618 N y un mínimo de 335,7013 N. Aunque esta orientación no alcanzó valores tan altos como los ensayos ISO, sigue mostrando una capacidad considerable para resistir fuerzas cortantes en la dirección de la banda de rodadura.

#### Ensayo Cortante Vertical

El corte vertical presentó una resistencia máxima promedio de 431,7761 N en los ensayos cortantes. El valor más alto fue de 431,7761 N y el más bajo de 307,9732 N. Este resultado indica que la orientación vertical es la más vulnerable a las fuerzas cortantes, sugiriendo que el material del neumático tiene menor resistencia en esta dirección perpendicular a la banda de rodadura.

**Tabla 22**

*Registro de mayores y menores valores de la fuerza reportada*

Dirección	Fuerza Mayor (N)	Muestra	Fuerza Menor (N)	Muestra
<b>ISO Diagonal</b>	241,55	1	97,88	4
<b>ISO Horizontal</b>	1472,76	9	642,96	4
<b>ISO Vertical</b>	751,23	1	447,03	8
<b>Cortante 45°</b>	734,4484	9	526,2931	2
<b>Cortante Horizontal</b>	601,5618	5	335,7013	3
<b>Cortante Vertical</b>	431,7761	1	307,9732	10

*Nota.* mayores y menores valores registrados en los 6 grupos de ensayo.

### Mayor Resistencia:

La orientación horizontal en los ensayos ISO presentó la mayor resistencia, alcanzando valores de hasta 1472,76 N. Esto demuestra que la estructura del neumático está optimizada para soportar fuerzas aplicadas en esta dirección, posiblemente debido a la alineación de los refuerzos internos en la dirección de la banda de rodadura.

### Menor Resistencia:

La orientación vertical en los ensayos cortantes mostró la menor resistencia, con valores tan bajos como 307,9732 N. Esto indica que esta dirección es la más crítica y susceptible a fallos bajo fuerzas cortantes, lo que puede ser un factor importante para considerar en aplicaciones que involucren cargas laterales.

### Comportamiento General:

Las fuerzas máximas en los ensayos ISO son significativamente mayores que en los ensayos cortantes, lo que sugiere que la modalidad ISO es más representativa de la capacidad de carga del material en condiciones de tensión pura.

La variabilidad en los valores de resistencia es mayor en los ensayos cortantes, especialmente en la orientación vertical, lo que podría indicar una menor homogeneidad en la distribución de la resistencia en esta dirección. En resumen, la resistencia del caucho frente al corte está fuertemente influenciada por la orientación del corte respecto a la banda de rodadura y el tipo de esfuerzo aplicado. La orientación horizontal, con fuerzas aplicadas perpendiculares a la banda de rodadura, es la que presenta la mayor resistencia y homogeneidad. En contraste, la orientación vertical, que aplica fuerzas en una dirección perpendicular a la estructura interna del neumático, muestra la menor resistencia, especialmente bajo esfuerzos cortantes.

Estos hallazgos destacan la importancia de la dirección de corte y el tipo de esfuerzo en la evaluación de la resistencia del caucho, proporcionando una guía crucial para el diseño y la evaluación de neumáticos en aplicaciones que involucran cargas complejas.

## REFERENCIAS

- [1] D. M. Ruiz, “Evaluación de la Gestión Pública de las Llantas Usadas en Bogotá”.
- [2] A. A. Bernal-Figueroa, Z. E. Rocha-Gil, y L. P. Buitrago-Ramírez, “Gestión de llantas usadas en municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá, Colombia”, *Revista Mutis*, vol. 11, núm. 2, pp. 96–108, ago. 2021, doi: 10.21789/22561498.1767.
- [3] A. N. Ardila y E. Arriola, “Efecto de la quema de llantas en la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas”, *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 8, núm. 5, pp. 39–55, sep. 2017, doi: 10.24850/j-tyca-2017-05-03.
- [4] M. Forrest, *Recycling and re-use of waste rubber*.
- [5] Miguel. Cervera Ruiz y Elena. Blanco Díaz, *Mecánica de estructuras. Libro 1, Resistencia de materiales*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [6] M. R. P. Javier Ramón Sotomayor Castellanos, “Anisotropía del módulo de elasticidad y de resistencia en compresión de la madera de Pinus michoacana, Pinus douglasiana y Pinus pringlei”, jun. 2014.
- [7] B. C. Thor Heimdahl, S. Member, y A. Drescher, “ELASTIC ANISOTROPY OF TIRE SHREDS”.
- [8] Iso, “ISO 37:2017”, 2017. [En línea]. Disponible en: [www.iso.org](http://www.iso.org)
- [9] V. Erazo, A. Vásquez, L. Morales, D. Ortiz, y W. Mosquera, “Estimación de la fuerza de corte en neumáticos usados”, *Universidad Tecnica del Norte*, 2020.
- [10] D. de Regulación - Alfredo Hernandez Franco Salas, “MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO RESOLUCIÓN NÚMERO 0481”.
- [11] “Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products 1”, doi: 10.1520/B0831-22.
- [12] T. J. Nizolek, H. M. Mourad, C. Liu, J. A. Valdez, M. A. Torrez, y G. T. Gray, “Compact forced simple shear specimen: Design improvement based on quasi-static experiments and

- finite element simulations”, *Int J Solids Struct*, vol. 233, dic. 2021, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111195.
- [13] “Designation: D6600 – 00 Standard Practice for Evaluating Test Sensitivity for Rubber Test Methods 1”, doi: 10.1520/D6600-00R17.
- [15] J. C. A. D. Filho y L. C. S. Nunes, “Experimental determination of deformation homogeneity and shear states using the digital image correlation method”, *Polym Test*, vol. 96, abr. 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107114.
- [16] “Rubber-General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods Caoutchouc-Procédures générales pour la préparation et le conditionnement des éprouvettes pour les méthodes d’essais physiques Copyright International Organization for Standardization Provided by IHS under license with ISO Not for Resale No reproduction or networking permitted without license from IHS COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT from IHS”, 2010.
- [17] A. J. Shih y R. C. McCall, “Kinematics and wear of tool blades for scrap tire shredding”, *Machining Science and Technology*, vol. 8, núm. 2, pp. 193–210, mar. 2004, doi: 10.1081/MST-200028728.
- [18] M. Bijarimi, “Mechanical Properties of Industrial Tyre Rubber Compounds Cite this paper”.
- [19] R. Pornprasit, P. Pornprasit, P. Boonma, y J. Natwichai, “Determination of the mechanical properties of rubber by FT-NIR”, *Journal of Spectroscopy*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4024783.
- [20] Kole, UICN, “Informe Unión Internacional de la conservación de la naturaleza UICN” , <https://www.iucn.org/es/naturaleza-2030/agua>
- [21] Groover, M.P., (2007). Fundamentos de manufactura moderna. Mc. Graw Hill, tercera edición.
- [22] Wilches, Daniela (2009), Reencauche de llantas, otro método para conservar el medio ambiente. Recuperado: 08/01/2016  
Disponible:<http://espanol.upiu.com/view/post/1243550094282/>

- [23] Acevedo, M. S. (2022). Estrategias de reutilización de las llantas fuera de uso en Bogotá D.C. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/61222>.
- [24] Gaio A., Pilakoutas K., Neocleous K., et al., (2012). Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*, 45, 385–395.
- [25] Maryoto A., Hermanto N.I.S, Haryanto Y, et al., (2015). Influence of prestressed force in the waste tire reinforced concrete. *Procedia Engineering*, 125, 638–643.
- [26] Si, H., Chen, T., & Zhang, Y. (2012). Effects of high shear stress on the devulcanization of ground tire rubber in a twin-screw extruder. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(4), 2307–2318. doi:10.1002/app.38170
- [27] Pérez, M. C. (2022). Evaluación de la anisotropía de un suelo cohesivo reconstituido en laboratorio mediante la resistencia no drenada obtenida de ensayos no confinado. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/44640>.
- [28] Herrero del Cura, Sofia (2016). Influencia de la dosificación y granulometría del caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) y de las dimensiones físicas en las propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de mortero de yeso-caucho. Tesis (Doctoral), E.T.S. de Edificación (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.43070>.
- [29] Costa, Marcelo de Almeida. Análise da deformação de componentes de prótese fixaimplantossuportada quando submetidos a cargas axiais e por meio de extensometria. / Marcelo de Almeida Costa. Piracicaba, SP: [s.n.], 2009.
- [30] Bodynas R.G., Nisbett J.K., (2010). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mc. Graw Hill, octava edición.
- [31] Dassault Systemes, (2010). Manual de Abaqus, Simulia.
- [32] ASTM C78, (2000). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- [33] Chang N.B., (2008). Economic and policy instrument analyses in support of the scrap tire recycling program in Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 86, 435–450.

[34] Resendiz Tejeda V.C., (2007). Tesis de ingeniería, estudio de las alternativas de aprovechamiento de las llantas en desuso. Instituto Politécnico Nacional, México.



## **ANEXOS**

## RECOMENDACIONES

Para aplicaciones que requieran la máxima resistencia del material, se recomienda utilizar el neumático en configuraciones que aprovechen la orientación horizontal, donde la resistencia es más alta y consistente.

En estudios de desgaste o evaluación de fallos, es crucial considerar la orientación vertical bajo fuerzas cortantes, ya que presenta la menor resistencia y mayor variabilidad, lo que la hace más susceptible a fallos prematuros.

Extensometría: se han identificado deficiencias en el análisis realizado a través del software GOM, atribuidas a las grietas que se formaron en la capa de pintura de las probetas sometidas a ensayo. En la extensometría visual, es esencial contar con una superficie moteada para que el software pueda llevar a cabo la correlación de las imágenes capturadas de los videos. Este proceso implica la selección de una cantidad específica de puntos en los píxeles y el seguimiento de su desplazamiento en la imagen, lo que debería proporcionar una estimación precisa de la deformación del material.

No obstante, al aplicar fuerza a las probetas, la pintura se agrieta de inmediato y se desprenden secciones de esta, lo que provoca que el software identifique estas áreas como zonas de interés, resultando en la pérdida de información sobre el desplazamiento. A pesar de haber registrado los 60 ensayos en video durante cada una de las pruebas, la información resultante mostró un comportamiento similar al aplicar la extensometría visual. Estos datos obtenidos son inconsistentes y poco confiables, como se puede evidenciar en las imágenes generadas por el software GOM..

## Figura 45

*Imagen prueba de laboratorio probetas esfuerzo cortante antes de iniciar*



*Nota.* foto ampliada de probeta de esfuerzo cortante durante el ensayo de laboratorio

### Recomendaciones para Mejorar la Correlación de Imágenes

#### Mejora de la Preparación de la Superficie:

Utilizar una pintura que sea más resistente a la formación de grietas y desprendimientos bajo esfuerzos mecánicos. La aplicación de una capa base adherente seguida de la capa moteada puede ayudar a mejorar la durabilidad de la pintura.

Alternativamente, considerar el uso de un recubrimiento moteado que no requiera pintura, como una película adhesiva con un patrón preimpreso que pueda soportar mejor la deformación.

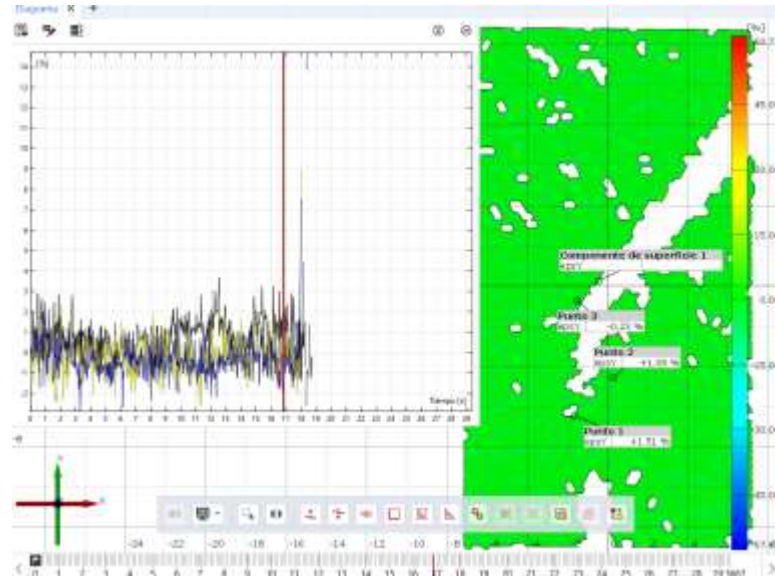
#### Uso de Técnicas de Marcado Alternativas:

Evaluar el uso de técnicas de marcado diferentes, como la aplicación de patrones moteados utilizando técnicas de proyección láser o marcadores de tinta que no se desprendan con facilidad.

Otra opción es emplear tintas resistentes a la abrasión y a los esfuerzos mecánicos, que aseguren la permanencia del patrón durante todo el ensayo.

**Figura 46**

*Imágenes de procesamiento en GOM*



**Nota.** imagen obtenida de programa GOM, muestra de mapeo de la probeta y grafica de extensión