

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

**"EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UN ADHESIVO  
PARA LA INDUSTRIA DEL REENCAUCHE".**

TESIS DE GRADO

**JUAN PABLO KOPP KLOTH**  
CARNET 10525-09

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, MAYO DE 2015  
CAMPUS CENTRAL

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUIMICA

**"EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UN ADHESIVO  
PARA LA INDUSTRIA DEL REENCAUCHE".**

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA

POR  
**JUAN PABLO KOPP KLOTH**

PREVIO A CONFERÍRSELE  
EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, MAYO DE 2015  
CAMPUS CENTRAL

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR: P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.  
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO  
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: DR. CARLOS RAFAEL CABARRÚS PELLECCER, S. J.  
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.  
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS  
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

DECANO: MGTR. JOSE CARLOS RICARDO VELA SCHIPPERS  
VICEDECANO: ING. CARLOS ENRIQUE GARCIA BICKFORD  
SECRETARIA: MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA  
DIRECTOR DE CARRERA: DR. MARIO RENE SANTIZO CALDERON

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

MGTR. JOSE ANTONIO ROSAL CHICAS  
MGTR. JULIO ALBERTO AGUILAR SCHAFER  
ING. JOSÉ MANUEL CASTAÑEDA ORELLANA

Guatemala, 17 de marzo de 2015.

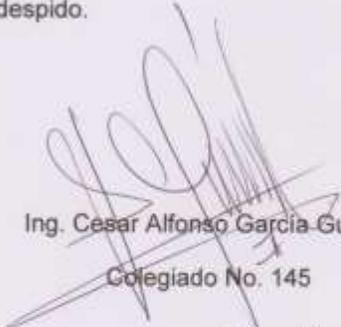
Ingeniera  
Karen Morales  
Secretaria de Facultad  
Facultad Ingeniería

Estimada Ing. Karen Morales:

Por este medio me es grato saludarle y desearle éxitos en sus labores diarias.

El motivo de la presente es para informarle que he revisado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: "EVALUACION TECNICA DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE UN ADHESIVO PARA LA INDUSTRIA DEL REENCAUCHE". Del estudiante Juan Pablo Kopp Kloth quien se identifica con el número de carnet: 10525-09. Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar doy como aprobado dicho trabajo.

Sin otro particular me despido.



Ing. Cesar Alfonso Garcia Guerra

Colegiado No. 145

*Cesar Alfonso Garcia Guerra*  
INGENIERO QUIMICO  
COLEGIADO No. 145

**Orden de Impresión**

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante JUAN PABLO KOPP KLOTH, Carnet 10525-09 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA, del Campus Central, que consta en el Acta No. 0258-2015 de fecha 30 de abril de 2015, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

**"EVALUACIÓN TÉCNICA DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UN ADHESIVO PARA LA INDUSTRIA DEL REENCAUCHE".**

Previo a conferírsele el título de INGENIERO QUÍMICO en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 6 días del mes de mayo del año 2015.



**MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA, SECRETARIA  
INGENIERÍA  
Universidad Rafael Landívar**



## DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y siempre estar a mi lado ya que sin él no soy nada, por darme la fuerza de seguir adelante y cumplir las metas que me he propuesto.

A mi padre, Adolfo, por ser uno de los pilares en mi vida y darme su apoyo incondicional durante mi carrera profesional. Por siempre alentarme en los momentos difíciles y ser un ejemplo como persona, profesional, padre y amigo.

A mi madre, Ingrid, por ser uno de los pilares en mi vida y darme su cariño incondicional. Por siempre alentarme a seguir adelante y superarme en todo sentido. Por tu sabio consejo que siempre me llevó a realizar las cosas de la mejor manera posible.

A mi hermana, Jennifer, por brindarme el apoyo moral y emocional en todo momento durante mi carrera profesional.

A mi abuela, Conchita, por brindarme cariño en todo momento y alentarme a seguir adelante en mi carrera profesional.

A mi abuelo, Marco Antonio, por ser la primera persona en inquietarme acerca de la Ingeniería Química, por ser la persona que me vio dar los primeros pasos en un rubro académico al cual le dedico su vida. Por ser ejemplo de individuo, profesional y abuelo.

A mi abuela, Elsa, por medio de su esfuerzo y honorabilidad me permitió realizar mi estudio de tesis.

A mi abuelo, Dieter, por medio de su investigación me permitió realizar mi estudio de tesis.

A mi familia y amigos que de una u otra manera intervinieron en mi vida profesional que finalmente conlleva a la presentación de mi trabajo de graduación.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme seguir adelante.

A mis papas por siempre apoyarme, y estar a mi lado a lo largo del proceso del trabajo de graduación.

A mi asesor el Ing. Cesar Alfonso García Guerra, por ayudarme y guiarme a lo largo del proceso de formulación del trabajo de graduación. Por dedicarme varias horas de su tiempo en revisar mi tesis y estar presente durante todos los tratamientos experimentales.

Al Ing. Pablo de León, por ayudarme a definir la metodología para realizar los ensayos de las probetas de hule.

Al Centro de Investigación de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala por permitirme utilizar el equipo para realizar los ensayos de las probetas de hule.

Al equipo de apoyo del Centro de Investigación de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala.

A Llantas Kloth, S.A. por permitirme realizar los estudios de materiales en sus instalaciones.

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo titulado Evaluación técnica de las propiedades físico-mecánicas de un adhesivo para la industria del reencauche, surgió como una iniciativa para poder promover el uso de adhesivos a base de hule natural y solventes orgánicos dentro del segmento dedicado a la vitalización de llantas. Además busca estandarizar el tiempo de vulcanización y el gramaje de adhesivo más efectivo que potencialice la adherencia de los sustratos conformados por un segmento de llanta usada y un segmento sólido de taco elaborado a partir de hule natural.

Para el presente trabajo se investigó sobre el ángulo de pegado óptimo, el tiempo de tacking (adherencia), el efecto de la Dureza Shore A en el proceso de vulcanización, el efecto del tiempo de vulcanización sobre la unión, el gramaje de adhesivo que potencializa la unión de los sustratos y el comportamiento de la unión frente a diferentes esfuerzos. El uso de cualquier adhesivo durante el proceso de reencauche es por motivos de fijación de ambos sustratos. Se formuló un adhesivo con un fracción en peso correspondiente a 10.71% de sólidos y un 89.29% de fase líquida, debiendo cumplir los parámetros fijados durante la definición de la metodología experimental.

Se realizaron las pruebas de resistencia de materiales en el Centro de Investigación de la Universidad San Carlos de Guatemala. Donde se obtuvieron resultados que resaltan que el espesor de película más delgado, producto del gramaje de adhesivo aplicado, y un tiempo de vulcanización alto son la mejor combinación para potencializar la unión de ambos sustratos. Como resultado final se obtuvo que un tiempo de vulcanización de 4.5 horas y un gramaje de adhesivo correspondiente a 2 gramos favorecen las condiciones de unión entre ambos sustratos. El mayor aporte del estudio fue determinar las condiciones que optimizan la unión de ambos sustratos y favorecen de la misma manera al entrecruzamiento de cadenas carbonadas en la sección de unión.

**Descriptores:** Adhesivo, ángulo de pegado, tiempo de tacking (adherencia), Dureza Shore A, reencauche, hule natural, espesor de película, tiempo de vulcanización.

## Índice

<b>I. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Lo escrito sobre el tema .....	2
1.2 Marco teórico .....	3
1.2.1 Origen .....	3
1.2.2. Composición química .....	5
1.2.3 Centro de reacción .....	5
1.2.4 Vulcanización .....	7
1.2.5 Angulo de pegado .....	9
1.2.6 Adhesivos a base de hule natural .....	9
1.2.7 Preparación de la superficie de los elastómeros .....	12
1.2.8 Comportamiento de la unión frente a los esfuerzos .....	13
1.2.9 Ensayo de esfuerzo cortante .....	13
1.2.10 Análisis de varianza ANOVA.....	14
1.3 Resumen Crítico del marco teórico .....	15
<b>II. Planteamiento del Problema</b> .....	<b>16</b>
2.1 Objetivos .....	17
2.1.1 Objetivo general .....	17
2.1.2 Objetivo específico .....	17
2.2 Variables .....	18
2.2.1 Variables independientes .....	18
2.2.2 Variables dependientes .....	18
2.3 Definición de variables .....	19
2.3.1 Variables independientes .....	19
2.3.2 Variables dependientes .....	19
2.4 Alcances y límites .....	21
2.4.1 Alcance .....	21

2.4.2 Límite .....	22
2.5 Aporte .....	23
<b>III. Método .....</b>	<b>24</b>
3.1 Sujetos y unidades de análisis .....	24
3.1.1 Sujetos .....	24
3.1.2 Unidades de análisis .....	24
3.2 Instrumentación .....	25
3.2.1 Maquinaria .....	25
3.2.2 Procedimiento .....	28
3.2.3 Análisis de ruptura .....	31
3.3 Procedimiento .....	34
3.3.1 Elaboración del adhesivo .....	34
3.3.2 Preparación de las probetas conformadas de secciones de llanta usada .....	35
3.3.3 Preparación de las probetas conformadas de secciones de hule natural .....	36
3.3.4 Preparación de la superficie de la probeta hecha a partir de un segmento de llanta usada .....	36
3.3.5 Preparación de la superficie de la probeta hecha a partir de un segmento taco elaborado a partir de hule natural .....	37
3.3.6 Unión de ambas probetas .....	38
3.3.7 Vulcanización .....	39
3.4 Diseño y metodología estadística .....	40
3.4.1 Diseño experimental .....	40
3.4.1.1 Experimentos .....	41
3.4.1.2 Tratamientos y repeticiones de los experimentos .....	42

3.4.2 Descripción de las unidades experimentales .....	43
3.4.3 Variable respuesta .....	43
3.4.4 Metodología de análisis .....	43
<b>IV. Presentación y análisis de resultados .....</b>	<b>44</b>
<b>V. Discusión de resultados .....</b>	<b>47</b>
5.1 Procedimiento de elaboración de adhesivo .....	47
5.2 Procedimiento de preparación de la superficie de llanta usada y del yaco de Hule Natural .....	48
5.3 Ángulo de pegado del taco de hule natural.....	48
5.4 Aplicación y evaluación del adhesivo.....	49
5.5 Tiempo de tacking .....	50
5.6 Unión de los sustratos.....	50
5.7 Vulcanización .....	51
5.8 Ensayo a tensión .....	52
5.9 Gráfica Carga vrs. Deformación de probetas .....	54
5.10 Inconsistencia en los fallos de unión .....	54
5.11 Elongación máxima.....	55
5.12 Esfuerzo .....	55
5.13 Carga máxima .....	56
5.14 Dureza Shore A .....	56
<b>VI. Conclusiones .....</b>	<b>57</b>
<b>VII. Recomendaciones .....</b>	<b>59</b>
<b>VIII. Referencias bibliográficas .....</b>	<b>60</b>
<b>IX. Glosario .....</b>	<b>65</b>
<b>X. Anexos .....</b>	<b>67</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Cosecha del hule natural en Guatemala.....	4
Figura 2. Estructura monomérica del hule natural .....	5
Figura 3. Estructura polimérica del hule natural.....	5
Figura 4. Reacción química entre el hule natural y el azufre .....	6
Figura 5. Formación de los enlaces disulfuros entre cadenas de carbono formando el cross-linking (entrecruzamiento) entre las cadenas carbonadas ..	6
Figura 6. Mecanismo de reacción de la vulcanización.....	7
Figura 7. Formación del cross-linking (entrecruzamiento) .....	8
Figura 8. Adherencia, adhesión, coherencia y cohesión. ....	10
Figura 9. Diagrama de la sección de unión.....	0
Figura 10. Tolueno.....	12
Figura 11. Metil Etil Cetona.....	12
Figura 12. Ensayo de esfuerzo cortante .....	13
Figura 13. Guillotina de hule .....	25
Figura 14. Tanque de mezclado .....	25
Figura 15. Llenadora de toneles .....	26
Figura 16. Reactor cinético .....	26
Figura 17. Caldera .....	26
Figura 18. Bomba de desplazamiento positivo .....	27
Figura 19. Stitcher.....	27
Figura 20. Martillo de cabeza de acero.....	27
Figura 21. Manómetro.....	28

Figura 22. Termómetro .....	28
Figura 23. Durómetro.....	29
Figura 24. Balanza digital .....	29
Figura 25. Vernier .....	30
Figura 26-33. Informe de resultados .....	31-33
Figura 34. Mezcla de hule natural y solvente.....	34
Figura 35. Mezcla homogenizada de hule natural y solvente. ....	34
Figura 36. Corte trasversal de llanta. ....	35
Figura 37. Delimitación de áreas de pegado en llanta usada .....	35
Figura 38. Delimitación de áreas de pegado en sección e hule natural. ....	36
Figura 39. Preparación de superficie de llanta usada. ....	36
Figura 40. Preparación de superficie de llanta usada y aplicación de adhesivo. .....	37
Figura 41. Preparación de superficie de los segmentos de hule natural. ....	37
Figura 42. Preparación de superficie de los segmentos de hule natural y aplicación de adhesivo. ....	38
Figura 43. Delimitación de área de unión. ....	38
Figura 44. Unión de probetas y utilización de stitcher. ....	39
Figura 45. Probetas sujetas a distintos tratamientos. ....	39
Figura 46. Diagrama de probeta de material base y llanta usada .....	40
Figura 47. Diseño de probeta de material base y llanta usada. ....	41
Figura 48. Inicio del ensayo de tensión.....	41
Figura 49. Momento antes de la falla en la sección de unión durante el ensayo de tensión. ....	42
Figura 50. Ilustración de ensayo .....	52
Figura 51. Ensayo de cizalladura (esfuerzo cortante).....	53
Figura 52. Prueba experimental de ensayo Destructivo .....	53

Figura 53. Respuesta de los distintos materiales a deformación. ....	54
Figura 54. Escala de Dureza Shore A .....	56
Figura 55. Proceso de extrusión del hule .....	87
Figura 56. Corte transversal en la sección de la rodadura.....	91
Figura 57. Sección de llanta usada cortada.....	91
Figura 58. Delimitación de probeta de llanta usada. ....	92
Figura 59. Solvente Rubber 2 (90:10; Hexano: Tolueno) .....	92
Figura 60. Peso de las láminas de cojín de reencauche (hule natural). ....	93
Figura 61. Disolución del hule natural en el solvente.....	93
Figura 62. Delimitación de la probeta de hule natural.....	94
Figura 63. Estación de trabajo. ....	94
Figura 64. Adición de adhesivo a probetas.....	95
Figura 65. Unión de probeta .....	95
Figura 66. Utilización de martillo y stitcher para mejor la unión. ....	96
Figura 67. Ensayo físico-mecánico de las probetas de hule .....	96
Figura 68. Resultado de ensayo físico-mecánico de las probetas de hule. ....	97

## Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación científica del árbol de caucho .....	3
Tabla 2. Propiedades de los adhesivos correspondiente a la base de elastómero .....	11
Tabla 3. Tratamientos experimentales y repeticiones.....	40
Tabla 4. Tratamiento de 2.5 Horas de vulcanización .....	44
Tabla 5. Dureza Shore A Probetas de 2.5 Horas de vulcanización .....	44
Tabla 6. Tratamiento de 3.5 Horas de vulcanización .....	45
Tabla 7. Dureza Shore A Probetas de 3.5 Horas de vulcanización .....	45
Tabla 8. Tratamiento de 4.5 Horas de vulcanización .....	46
Tabla 9. Dureza Shore A Probetas de 4.5 Horas de vulcanización .....	46
Tabla 10. Fallos en material base .....	46
Tabla 11 Propiedades de polímeros .....	89

## I. INTRODUCCIÓN

El hule natural es producto de la savia generada por el árbol de la especie *Hevea brasiliensis*, conocido como árbol de caucho. El hule natural es cosechado en forma de látex y crece principalmente en áreas tropicales. Actualmente es uno de los principales productos agrícolas de Guatemala.

Los solventes orgánicos están presentes en una gran cantidad de formulaciones de adhesivos ya que permiten la disolución total de compuestos como el hule natural y a su vez cumplen la función de vehículo durante el proceso de secado.

La utilización de adhesivos para fijar dos materiales se remonta a tiempos prehistóricos ya que los antiguos egipcios empleaban adhesivos a base de caseína y almidones para unir hojas de papiros. En la época moderna aparece a finales del siglo XVII, en Holanda la primera planta industrial de cola animal. (Liesa y Bilurbina, 1990). A lo largo del siglo XIX se inicia la comercialización de adhesivos a base de colas animales y hule natural.

Los adhesivos tienen la función de unir dos sustratos mediante la fijación de ambas partes. En la actualidad existe una gran cantidad de clases de adhesivos que se encuentran establecidos en distintos procesos industriales.

Los resultados obtenidos en una unión, depende directamente del adhesivo, la resistencia mecánica del material y de las cargas aplicadas a la sección de la junta. (Liesa y Bilurbina, 1990).

Para llevar a cabo el trabajo se investigó sobre el gramaje de adhesivo que potencializa la unión de un segmento de llanta usada y un segmento sólido de hule natural en forma de taco además se busca encontrar el tiempo de vulcanización que favorezca la fortaleza en la unión. De acuerdo a los resultados de la experimentación se encontró que el tiempo óptimo de vulcanización corresponde a 4.5 horas y la masa de adhesivo que potencializan la unión corresponde a 2 gramos.

## 1.1 LO ESCRITO SOBRE EL TEMA

Rosal, (2003) en su investigación define el proceso de formulación de un adhesivo elaborado a partir de hule natural y solventes orgánicos, además hace referencia a las propiedades físicas de la mezcla después de finalizado el proceso.

Secaira, (2004) en su estudio, define el proceso de producción de neumáticos donde señala la vulcanización como un punto clave en el proceso de la elaboración del producto final.

Mejía, (2010) en su investigación, define el proceso de producción del caucho y menciona a los mayores productores a nivel mundial de caucho.

Lanzani, (2014) en su artículo de investigación, hace referencia a la reconstrucción de neumáticos mediante el proceso de raspado y relleno de heridas.

## 1.2 MARCO TEÓRICO

### 1.2.1 Origen

El origen del hule natural proviene de la savia de una familia específica de árboles. El hule natural es cosechado en forma de látex de la familia botánica de los *Euphorbiaceae*, específicamente del género *Hevea*, de la especie *Hevea brasiliensis*, conocido como árbol de caucho. Una de las propiedades más importantes de los elastómeros y del hule natural es su habilidad de soportar grandes deformaciones y regresar a su estado natural de una manera reversible sin sufrir daños en su composición física. (Rani, 2013.)

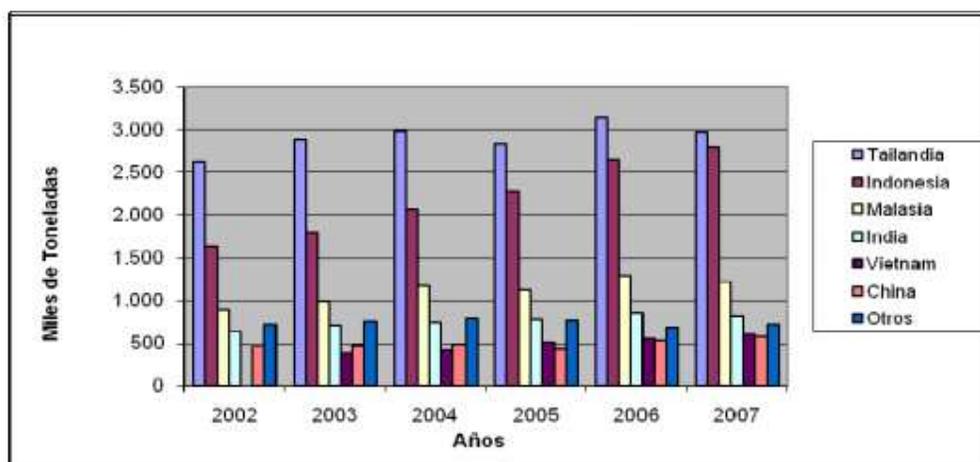
Tabla 1. Clasificación Científica del Árbol de Caucho

Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Orden	<i>Malpighiales</i>
Familia	<i>Euphorbiaceae</i>
Subfamilia	<i>Crotonoidae</i>
Tribu	<i>Micrandreae</i>
Subtribu	<i>Heveinae</i>
Género	<i>Hevea</i>
Especie	<i>H. brasiliensis</i>

Fuente: Kew Royal Botanic Gardens (2015)

En la actualidad existen grandes plantaciones de *Hevea Brasiliensis* ubicadas principalmente en Tailandia, Indonesia, Malasia, India, Vietnam, China, África, Sur de México, Centroamérica, Colombia y Brasil.

Gráfica 1. Producción Mundial de Caucho Natural 2002-2007



Fuente: International Rubber Study Group (2008)

En Guatemala existen aproximadamente 400 plantaciones de hule natural produciendo un total de 36,000,000 de kilogramos secos anualmente. El cual es homogenizado, procesado y exportado a diferentes lugares del mundo que lo utilizan como materia prima para una infinidad de procesos. Guatemala produce hule en forma sólida, conocida como chipa o en forma líquida en forma de látex. Las plantas de procesamiento se dividen en dos líneas de producción para procesar el hule natural en estado sólido y en estado líquido. El hule natural sólido se empaca en bogs o pacas de 33.33 kg o de 35 kg. El hule natural líquido o látex se centrifuga y se concentra para luego ser empacado en tanques para su exportación. (Grupo Introsa, 2015)



Figura 1. Cosecha del hule natural en Guatemala.

Fuente: Grupo Introsa (2015)

### 1.2.2. Composición Química

El hule natural se puede clasificar como un hidrocarburo que posee múltiples unidades de isopreno que a su vez poseen insaturaciones dentro en su estructura molecular. El hule natural es una cadena carbonada con estructura monomérica cis-1,4 isopreno o también conocido por su nombre según las reglas IUPAC como 2-metil-1,3-butadieno con formula química  $C_5H_8$ , la cual pertenece a la clasificación de los alquenos. La forma polimérica se conoce como cis-1,4 poliisopreno

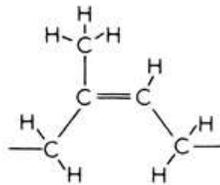


Figura 2. Estructura monomérica del hule natural.

Fuente: Mark (2005.)



Figura 3. Estructura polimérica del hule natural.

Fuente: Escuela de Ingenierías Industriales (2015)

### 1.2.3 Centro de Reacción

La unidad monomérica constitutiva del polímero, conocido como hule natural, cis-1,4 isopreno le corresponde una clasificación en la rama de los hidrocarburos alifáticos no saturados que a su vez puede clasificarse en el grupo de los alquenos ya que su grupo funcional radica específicamente en el doble enlace. El hule natural posee su centro de reacción en la insaturación dentro de cada unidad isoprenoide. La reacción que se lleva a cabo dentro de esta unidad corresponde a la formación de un enlace disulfuro, potencializado por el azufre presente en el medio de reacción. (Wade, 2004)

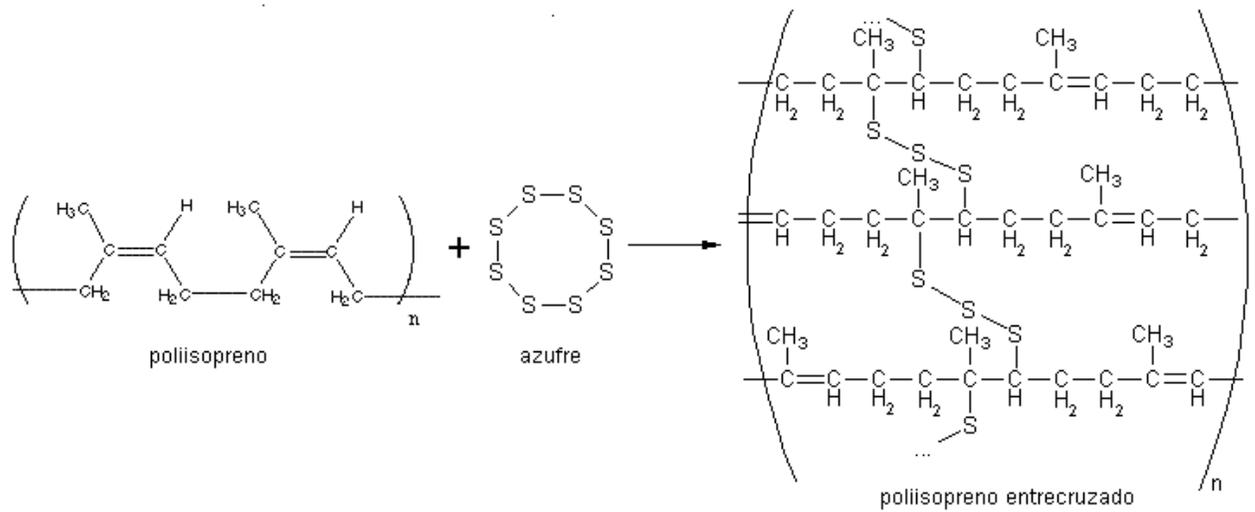


Figura 4. Reacción Química entre el hule natural y el azufre.  
 Fuente: Enciclopedia Columbia (2014)

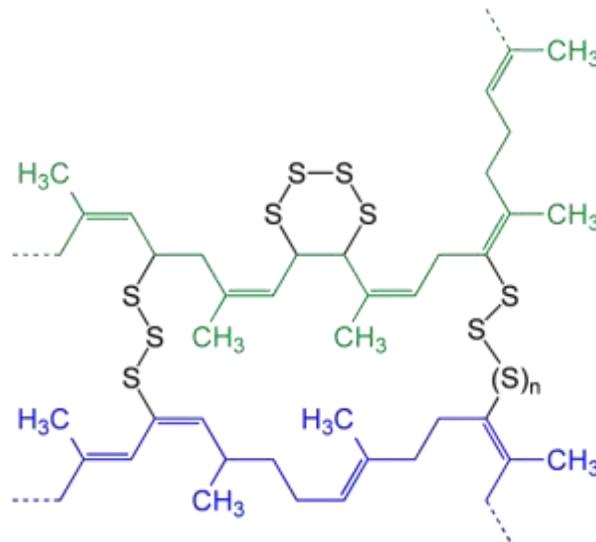


Figura 5. Formación de los enlaces disulfuros entre cadenas de carbono formando el cross-linking (entrecruzamiento) entre las cadenas carbonadas.  
 Fuente: Memidex (2015)

### 1.2.4 Vulcanización

La vulcanización es el proceso químico de convertir el hule natural o polímeros equivalentes en materiales más duraderos por medio de la adición de azufre u otros compuestos acelerantes o curativos, de forma general se aplica a materiales elastómeros. (Moore, 2015)

La vulcanización puede definirse como el proceso que incrementa la fuerza retráctil y reduce la deformación permanente posterior a remover una fuerza deformante sobre un material elastómero. La vulcanización incrementa la elasticidad, sin embargo reduce la plasticidad del producto. (Mark ,2005).

El proceso químico de vulcanización es un tipo de cross-linking (entrecruzamiento) que cambia las propiedades del hule natural y lo convierte en un material con alta dureza. El principio del cross-linking (entrecruzamiento) es formar una red entramada de cadenas carbonadas, lo que se traduce directamente en un material con mayor dureza.

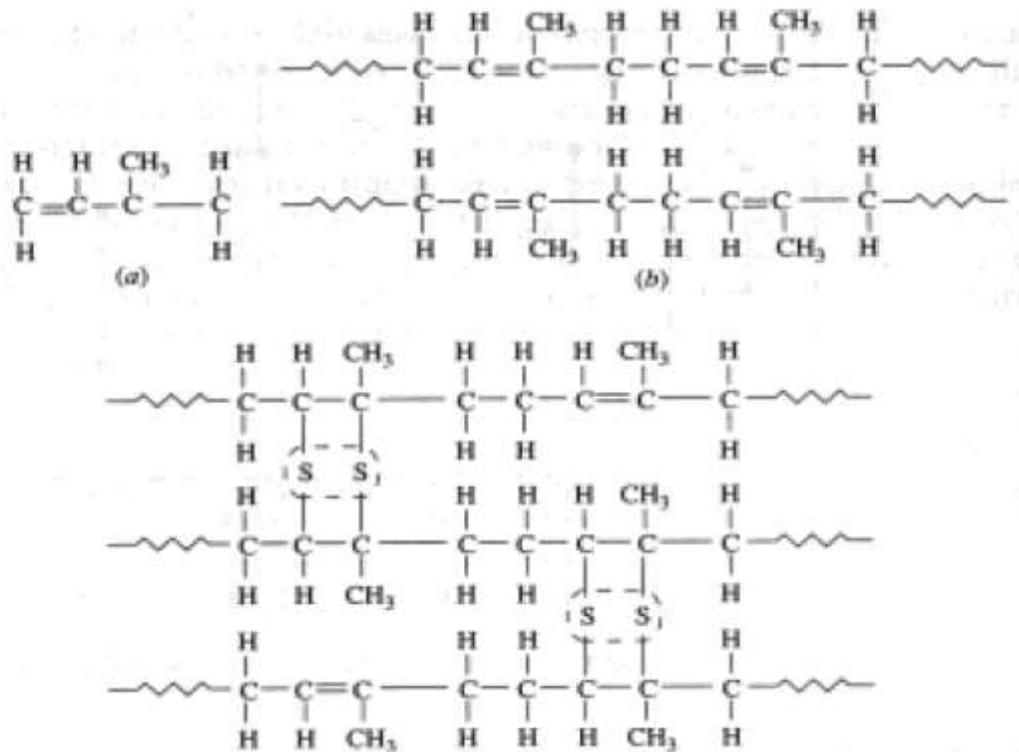


Figura 6. Mecanismo de reacción de vulcanización.

Fuente: Aguilar (2015)

Como resultado de la formación del cross-linking (entrecruzamiento) el hule vulcanizado se vuelve esencialmente insoluble en cualquier solvente y no puede ser procesado nuevamente, es por esto que es de mucha importancia que la vulcanización del artículo de hule se haga cuando el producto tiene su definida forma final.

El cross-linking (entrecruzamiento) es un enlace que se caracteriza por unir cadenas de polímero una con otra. La reacción de cross-linking (entrecruzamiento) produce un cambio físico en el hule natural ya que hace que la flexibilidad decrezca, la Dureza Shore A se incremente e incrementa el punto de fusión. El principal catalizador de la reacción de cross-linking (entrecruzamiento) es el azufre presente ya que se producen enlaces disulfuro, produciendo un entrecruzamiento de las cadenas carbonadas.

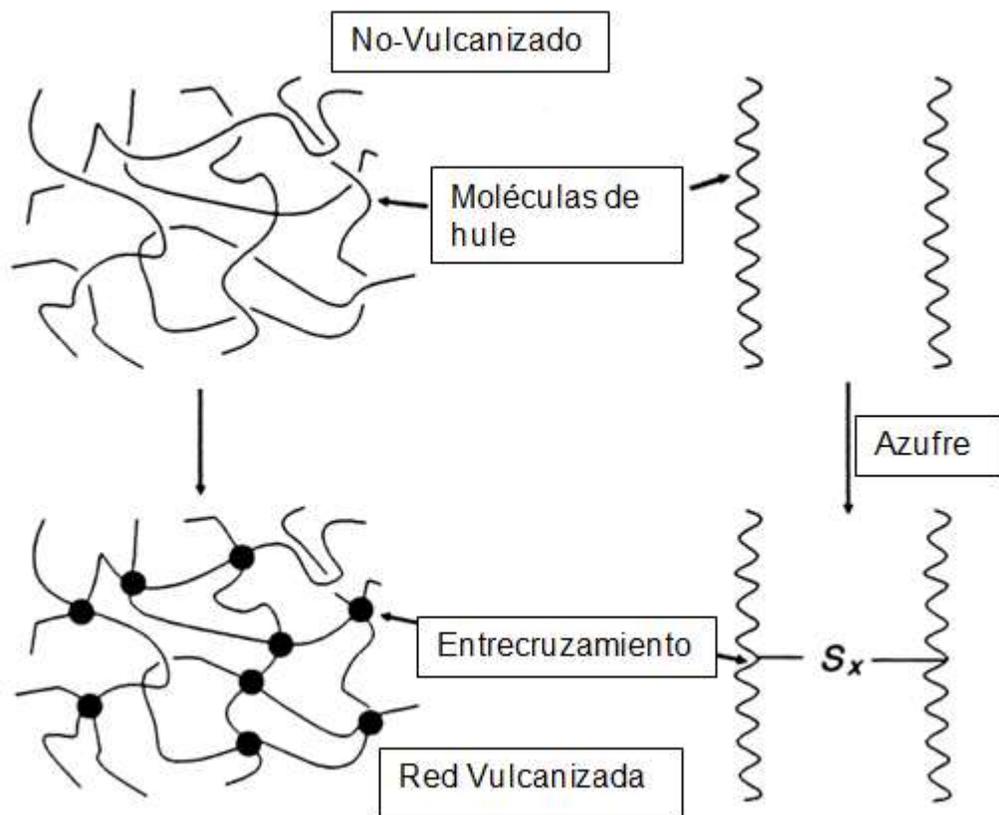


Figura 7. Formación del cross-linking (entrecruzamiento).

Fuente: Mark (2005).

La fuerza de desgarre, fatiga y la dureza están fuertemente relacionados con la energía de quiebre. Propiedades relacionadas a la energía de quiebre incrementan con la formación de cadenas de entrecruzamiento.

Estos valores incrementan en función del incremento de la cantidad de entrecruzamientos formados, pero a partir de un punto encontramos el proceso de reversión que se encarga de causar un efecto inverso.

La reversión es un término utilizado para describir la pérdida de estructuras de entrecruzamiento causada por el tratamiento térmico no oxidativo. Las causas de la reversión pueden identificarse como un tiempo de vulcanización muy largo (sobrecura) o también con la utilización de temperaturas mayores a 155°C. Ocurre en áreas vulcanizadas que contienen un gran número de entrecruzamientos polisulfurados. (Mark, 2005).

#### 1.2.5 Ángulo de Pegado

En labores agrícolas y de campo el ángulo del taco es muy importante. El ángulo del taco tiene injerencia directamente en el desempeño del equipo. Durante labores de campo se ha comprobado que la dirección óptima del taco es de 23° esto hace que el esfuerzo del motor sea menor, la economía del equipo sea mayor y haya un esfuerzo al corte menor. (Firestone Farm Tires, 2015)

#### 1.2.6 Adhesivos a base de hule natural

En la actualidad se dispone de una amplia gama de adhesivos que posibilita la unión de materiales distintos de manera efectiva, confiable y económica. Sin embargo existen consideraciones importantes para elegir un adhesivo que cumpla con las necesidades deseadas. Dentro del marco de los adhesivos encontramos factores como la adhesión, la adherencia, la cohesión y la coherencia. Es importante definir estos aspectos para poder establecer las bases de experimentación necesarias. La adhesión, se define como la acción de las fuerzas que se resisten a la separación de las moléculas de distintos cuerpos. Mientras que la adherencia es la acción de las fuerzas que se resisten a la separación de los materiales. Podemos definir que la

adhesión tiene una perspectiva molecular mientras que la adherencia se plantea desde un punto macro o estructural. Por otro lado es importante mencionar el concepto de cohesión que se refiere a las fuerzas de unión de las moléculas dentro de un mismo cuerpo o material. Mientras que la coherencia son las fuerzas que se resisten a la separación de un cuerpo heterogéneo.

(Liesa y Bilurbina, 1990).

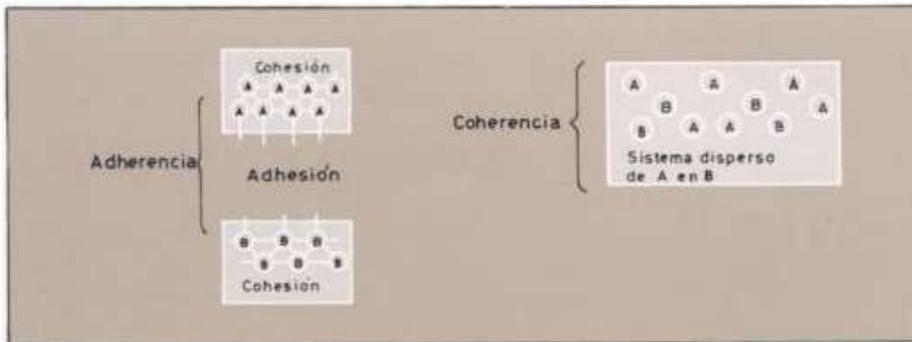


Figura 8. Adherencia, adhesión, Coherencia y cohesión.

Fuente: Liesa y Bilurbina (1990).

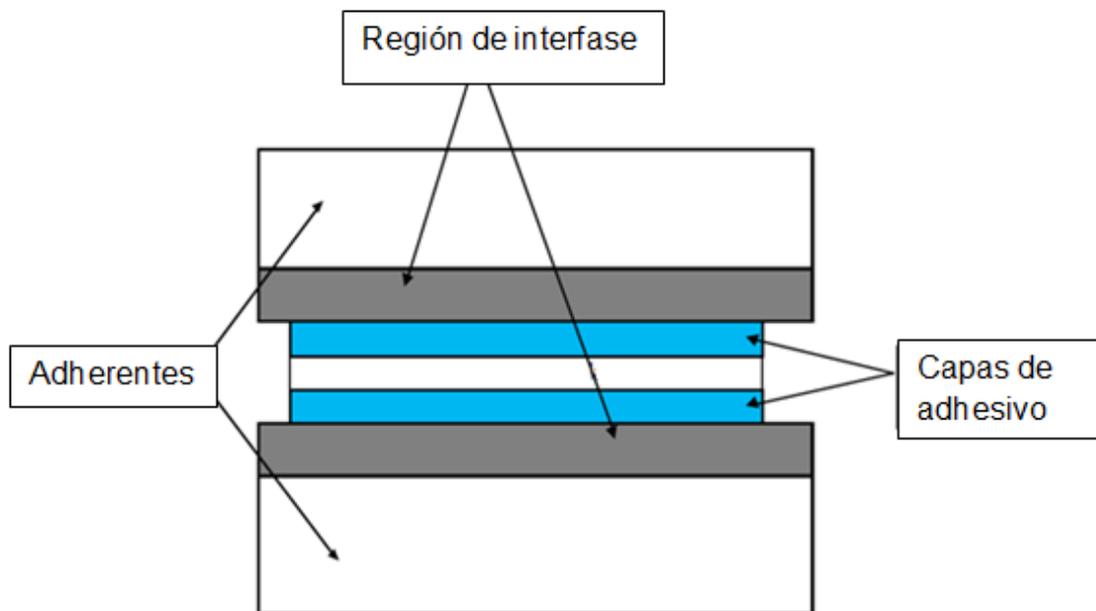


Figura 9. Diagrama de la sección de unión.

Fuente: Petrie (2006)

Tabla 2. Propiedades de los adhesivos correspondientes a la base de elastómero

Adhesivo	Descripción	Método de Curado	Características Especiales	Adherentes Usuales	Rango de Precio
Hule Natural	Soluciones de solvente.	Evaporación de solvente y aplicación de calor.	Excelente adherencia, buena resistencia.	Hule natural, metal, papel y madera.	Medio
Hule Regenerado (Reciclado)	Soluciones de solvente.	Evaporación de solvente.	Bajo costo.	Textiles, materiales para construir.	Bajo
Butilo	Sistema de solvente	Evaporación del solvente y vulcanización por medio de agentes químicos.	Baja permeabilidad a los gases, buena resistencia al agua, pobre resistencia a aceites.	Hule natural y metales	Medio
Nitrilo	Soluciones de solvente con resinas y óxidos metálicos.	Evaporación de solvente y aplicación de calor.	Alta resistencia a aceites y solventes.	Plásticos, hule y metal.	Medio

Fuente: Petrie. (2006)

### 1.2.7 Preparación de la superficie de los elastómeros

Materiales como el talco, silicones, agentes plastificantes e ionizantes, pueden encontrarse en la superficie del caucho, lo que puede suponer una problemática para lograr una adhesión efectiva.

Un sistema empleado con frecuencia es el tratamiento de la superficie del caucho por medio de lijado o pulido, seguido con la utilización de un disolvente. La función principal del lijado es crear una superficie de contacto mayor. Al desgastar suavemente la pieza de caucho, el área superficial incrementa sustancialmente. Mientras que la función del disolvente se basa en reblandecer la superficie del caucho y penetrar las leves hendiduras creadas a partir del proceso de lijado. La selección del disolvente es una parte fundamental ya que debe ser compatible con el caucho de lo contrario causaría daño a la superficie en cuestión. Usualmente se emplea el Tolueno o la Metil etil cetona.

Liesa y Bilurbina (1990).

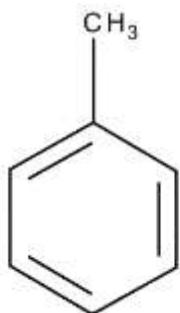


Figura 10. Tolueno

Fuente: Merck Millipore (2015)

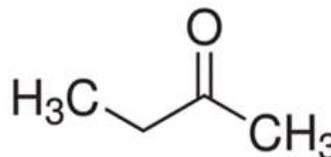


Figura 11. Metil Etil Cetona

Fuente: Spectrum Chemical (2015)

Otro tratamiento ampliamente utilizado es la cloración con una disolución de hipoclorito de sodio (NaClO) en agua (H<sub>2</sub>O), a esta solución se le añade ácido clorhídrico (HCl) para activarla. El ácido clorhídrico (HCl) corroe de manera natural el caucho por lo que es muy importante realizar un lavado profundo con agua desionizada para aclarar el caucho y luego se procede a realizar un proceso de secado. Es muy importante realizar la aplicación del adhesivo después del secado. (Liesa y Bilurbina, 1990).

### 1.2.8 Comportamiento de la unión frente a los esfuerzos

- a) Esfuerzo de tracción
- b) Esfuerzo de cizallamiento (esfuerzo cortante)
- c) Esfuerzo de desgarramiento
- d) Esfuerzo de peladura

(Liesa y Bilurbina, 1990).

### 1.2.9 Ensayo de esfuerzo cortante

La acción de fuerzas paralelas al plano de la unión da lugar a tensión cortante en la junta. La tensión cortante tiende a deslizar los adherentes en direcciones opuestas causando fallo en la unión. Debido a las condiciones de rodamiento de una llanta los adhesivos utilizados para el reencauche deben de soportar altos niveles de tensión de corte para prevenir el desprendimiento de los sustratos causando un fallo estructural en llanta. Durante el ensayo de esfuerzo cortante es importante alinear las mordazas de enlace y cumplir con las medidas de sujeción. El desalinamiento de las mordazas puede provocar variaciones importantes en el valor de carga máxima resistida por la junta. (Liesa y Bilurbina, 1990).

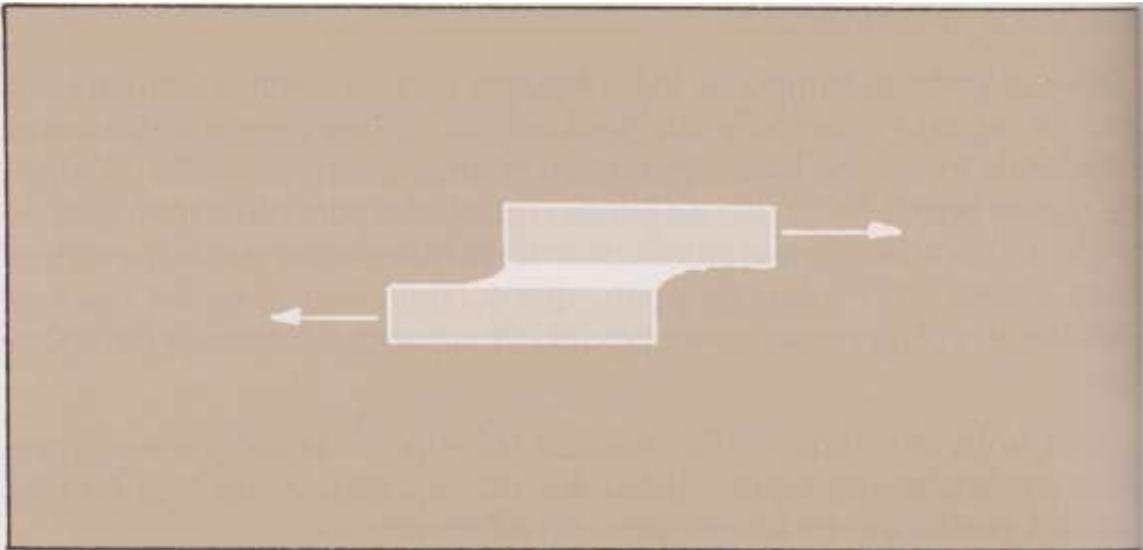


Figura 12. Ensayo de Esfuerzo Cortante o Tensión

Fuente: Liesa y Bilurbina (1990).

### 1.2.10 Análisis de Varianza ANOVA

El análisis de varianza es un procedimiento estadístico muy común que se utiliza cuando se prueban medias poblacionales. El análisis de varianza se da a partir de la teoría de la regresión. Bajo el esquema del ANOVA se desean probar la siguiente hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

$H_0$ : Al menos dos de las medias no son iguales

El análisis de varianza puede utilizarse como una herramienta que justifique una explicación sobre una determinada observación.

El análisis de varianza es una forma particular de una prueba estadística de hipótesis, utilizada ampliamente en el análisis de datos experimentales. Una prueba estadística de hipótesis es un método utilizado para elaborar decisiones usando datos experimentales.

La única exigencia que sostiene el método es que el número de repeticiones sea constante en todos los tratamientos.

(Walpole, Myers, Myers, Ye, Levin, Rubin, Heizer, Render, 2009).

### 1.3 RESUMEN CRÍTICO DEL MARCO TEÓRICO

El presente trabajo titulado Evaluación técnica de las propiedades físico-mecánicas de un adhesivo para la industria del reencauche incluye la investigación de factores propios del material analizado (hule natural), metodologías de experimentación según el tipo de exigencia que soporta el material y tratamientos estadísticos que determinan el resultado de la experimentación.

Dentro de los factores propios del material incluimos el origen del hule natural, su composición química molecular y la importancia del centro de reacción ubicado en el doble enlace contenido dentro de la estructura carbonada. Mediante el estudio de los elementos propios del material es posible comprender las transformaciones químicas que conlleva el producto en el proceso de vulcanización. La vulcanización es un punto importante de estudio en los adhesivos a base de hule natural ya que durante la vulcanización se da el cross-linking (entrecruzamiento) formando enlaces disulfuro entre las cadenas carbonadas cambiando de esta forma la estructura química del material.

Los factores técnicos y de preparación del material son otro punto importante donde es trascendental mencionar las hendiduras provocadas en el material, donde se pretende extender el área superficial del material y por consiguiente ampliar la superficie de contacto del adhesivo.

Los factores experimentales son otro punto de análisis importante donde se toma en cuenta el comportamiento de la unión frente a los diferentes esfuerzos. En el apartado de las llantas reencauchadas el mayor esfuerzo exigido al material es el esfuerzo cortante. A partir de este hallazgo se diseñó la metodología experimental que permite replicar el esfuerzo que el material sostiene en condiciones normales de operación.

Los factores estadísticos empleados en el análisis experimental consisten en un tratamiento de Análisis de Varianza con lo que verificamos la diferencia de los distintos tratamientos utilizados.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Desde la antigüedad el caucho es un cultivo representativo de las regiones tropicales y ha sido un símbolo de la cultura mesoamericana. El árbol de caucho conocido comúnmente, o *Hevea Brasilensis* por su nombre científico, produce el látex en forma de una emulsión a partir de la savia que proviene de su interior.

Las grandes plantaciones a nivel mundial están ubicadas principalmente en el continente asiático concretamente en países como Tailandia, Indonesia, Malasia, India, Vietnam y China. Por otro lado en el continente americano las plantaciones están ubicadas desde el Sur de México, pasando por Centroamérica, Colombia, Ecuador, Perú y Brasil.

En el presente se dispone de una amplia gama de adhesivos elaborados a partir de hule natural, de mezclas de hules sintéticos, nitrilo, butilo entre otros; que posibilita la unión de materiales distintos de manera efectiva. Los adhesivos son un factor fundamental en la industria del reencauche, ya que su desempeño es vital para la fijación correcta de la banda de rodamiento o tacos de hule en las respectivas carcasas. Dentro del Proyecto de Ingeniería "Evaluación Técnica de las propiedades físico mecánicas de un adhesivo para la industria del reencauche" se busca encontrar parámetros de composición, Dureza Shore A al inicio, después del reblandecimiento y al final el proceso, ángulo de colocación del hule, carga máxima, elongación, tiempo de vulcanización y masa de adhesivo que mejoren el desempeño de un adhesivo fabricado a base de hule natural.

Los resultados del estudio deben analizarse para establecer si cumplen con los parámetros necesarios para ser utilizados como un adhesivo para la industria del reencauche. Lo cual nos lleva a la siguiente interrogante:

¿Cuál es el tiempo óptimo de vulcanización y el gramaje óptimo de adhesivo para potencializar la unión de un área de aproximadamente 40 cm<sup>2</sup> entre un segmento de llanta usada y un segmento de taco hecho a partir de hule natural?

## 2.1 OBJETIVOS

### 2.1.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de un adhesivo a base de hule natural utilizando probetas conformadas a partir de una sección de llanta usada y una sección de segmentos sólidos de un taco elaborado a partir de hule natural.

### 2.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la elongación máxima del adhesivo en una probeta conformada por una sección de llanta usada y una sección de segmento sólido de un taco elaborado a partir de hule natural en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.
- Determinar el esfuerzo máximo soportado por el adhesivo de una probeta conformada por una sección de llanta usada y una sección de segmento sólido de un taco elaborado a partir de hule natural en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.
- Determinar la carga máxima soportada por el adhesivo en una probeta conformada por una sección de llanta y una sección de segmento sólido de un taco elaborado a partir de hule en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.
- Determinar el gramaje de adhesivo que mejora el rendimiento de pegado en una probeta conformada por una sección de llanta usada y una sección de segmento sólido de un taco elaborado a partir de hule natural en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.
- Determinar el cambio en Dureza Shore A en la probeta conformada por una sección de llanta usada y una sección de segmentos sólidos de un taco elaborado a partir de hule natural en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.

## 2.2 VARIABLES

### 2.2.1 Variables Independientes

- a) Tiempo de vulcanización
- b) Masa de adhesivo

### 2.2.2 Variables Dependientes

Parámetros de control:

- a) Tiempo de tacking (adherencia)
- b) Ángulo de colocación del taco
- c) Dureza Shore A al inicio
- d) Dureza Shore A con solvente (reblandecimiento)
- e) Dureza Shore A después de la vulcanización
- f) Esfuerzo
- g) Carga máxima
- h) Elongación máxima
- i) Perfil Carga vrs. Elongación

## 2.3 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

### 2.3.1 Variables Independientes

#### a) Tiempo de vulcanización

- Conceptual: es el proceso de tratar químicamente el hule natural o sintético para otorgarle propiedades útiles como elasticidad, resistencia y estabilidad. (Ramalingam, 1996)
- Operacional: es el tiempo del tratamiento en rangos de 2.5 horas, 3.5 horas y 4.5 horas que otorga propiedades elásticas, resistencia y estabilidad.

#### b) Masa de adhesivo:

- Conceptual: cantidad en gramos que corresponde al área cubierta en la superficie de pegado.
- Operacional: corresponde a los 2 gramos y 3 gramos aplicados a las distintas áreas de contacto de las probetas utilizadas.

### 2.3.2 Variables dependientes

#### a) Tiempo de tacking (adherencia):

- Conceptual: es la propiedad de un adhesivo de adherirse a otra superficie al contacto inmediato. (Petrie, 2006)
- Operacional: corresponde al tiempo en el cual el solvente se evapora y la superficie esta lista para adherirse a otro sustrato.

#### b) Ángulo del taco

- Conceptual: es una figura formada por dos rayas, llamados lados del ángulo y un punto en común, llamado vértice.
- Operacional: corresponde a 23° de inclinación del taco de hule natural sobre la llanta.

#### c) Dureza Shore A

- Conceptual: se basa en la reacción elástica del material cuando se penetra con un material más duro. Se mide por medio de un durómetro que tiene una escala de 0 unidades hasta 100 unidades. Es considerado un método no destructivo.
- Operacional: los grados de dureza que presenta la probeta al inicio del proceso, después del reblandecimiento y finalmente posterior a la vulcanización final de la pieza.

#### d) Esfuerzo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

- Conceptual: el esfuerzo es una medida experimental expresada en kilogramos de carga por centímetro cuadrado de área.
- Operacional: es la relación entre la carga máxima soportada por la probeta y el área de la sección de la junta.

#### e) Carga Máxima (kg)

- Conceptual: la carga máxima es la fuerza soportada por el material momentos antes de darse la ruptura del material.
- Operacional: es una medición en kilogramos que indica la resistencia a la fuerza paralela provocada sobre la probeta.

f) Elongación máxima (cm)

- Conceptual: la elongación máxima es una medición en centímetros que indica la extensión máxima del material antes de sufrir un daño estructural causando la fatiga del material. (R.L. Hudson & Company, 2014).
- Operacional: es la deformación máxima en centímetro que soporta la probeta antes de un fallo en la sección de junta o fallo en el material base.

g) Perfil de Carga. Vrs. Elongación:

- Conceptual: es la relación que mantiene la carga y la elongación que sufre un determinado material, la cual es conocida como curva de Carga vrs. Elongación.
- Operacional: es un método gráfico para determinar el comportamiento de la probeta desde el inicio de la aplicación de la fuerza paralela a la junta (carga) y la deformación de la probeta.

## 2.4 ALCANCES Y LÍMITES

### 2.4.1 Alcance

El uso de adhesivos en la industria guatemalteca tiene significancia en cualquier proceso transformador, desde empaques alimenticios hasta uniones estructurales. Siendo Guatemala un país donde una gran cantidad de su economía proviene de los procesos manufactureros, la utilización de adhesivos a base de hule natural puede aportar un beneficio económico al país.

El proceso de reencauche tiene un trasfondo ambientalista donde se regenera la rodadura de la llanta para extender la vida útil de la misma. El adhesivo en el proceso de reencauche es un factor crítico ya que se encarga de la fijación de ambas partes.

La presente investigación tuvo como objetivo dar a conocer la evaluación físico-mecánica de un adhesivo elaborado a partir de hule natural como soluto y de una mezcla 90:10 de hexano y tolueno que actúa como solvente. El adhesivo formulado posee un porcentaje en peso correspondiente a 10.71% de sólidos y un 89.29% de fase líquida. Dentro del mismo esquema se propuso encontrar el gramaje óptimo de adhesivo que potencialice la unión de los sustratos y el tiempo de vulcanización óptimo que mejore el cross-linking (entrecruzamiento) en la unión.

#### 2.4.2 Límites

La principal barrera en el presente estudio fue la falta información en relación a ensayos certificados para adhesivos en el proceso de reencauche. Existe una normativa establecida con respecto a materiales y adhesivos donde se ubican las Normas American Society of Testing Materials (ASTM), Normas American Society of Mechanical Engineers (ASME) que señalan determinados ensayos para diferentes materiales. Además las normas mencionadas poseen parámetros y límites de confianza que dictaminan el éxito o fracaso de la prueba o el material en cuestión.

Debido a la escasa información en relación a las normas que rigen específicamente la industria del reencauche se procedió a definir la metodología y el tipo de ensayo más conveniente.

Dentro del procedimiento de implementación de productos nuevos en una planta procesadora de neumáticos para reencauche, el estudio abarcó la primera fase de desarrollo. La cual consiste en la elaboración de muestras en escala piloto.

## 2.5 APORTE

Al gobierno de la República de Guatemala, para que desarrolle investigaciones en torno a la utilización de hule natural como materia prima para desarrollar adhesivos industriales.

A la sociedad, la formulación de un producto industrial, que a su vez potencializa el reúso de materiales a través del proceso de reencauche que permite disminuir los desechos sólidos provocados por la disposición de neumáticos usados.

A investigadores que deseen unificar la metodología de aplicación de adhesivo en el proceso industrial del reencauche.

A catedráticos y estudiantes con fines de elaboración de próximas investigaciones que busquen información con fines de consulta.

A la Universidad Rafael Landívar, para promover el estudio del tema.

### III. MÉTODO

#### 3.1 SUJETO Y UNIDADES DE ANÁLISIS

##### 3.1.1 Sujetos

- a) El sujeto de análisis es el adhesivo formulado a partir de hule natural y una mezcla 90:10 de hexano y tolueno respectivamente. De la misma forma el adhesivo posee una composición porcentual en peso correspondiente a 10.71% de sólidos de hule natural y un 89.29% de fase líquida correspondiente a Rubber 2 (solvente con proporción 90:10 de hexano y tolueno respectivamente).
- b) Entrevista con el Ingeniero Pablo de León para determinar la metodología y las pruebas respectivas que deben realizarse para la evaluación técnica de un adhesivo hecho a partir de hule natural.

##### 3.1.2 Unidades de análisis

- c) Análisis físico-mecánico proporcionado por el Centro de Investigación de la Universidad de San Carlos para determinar la elongación máxima de las probetas conformada por una sección de llanta usada y una sección de segmento sólido de un taco elaborado a partir de hule natural en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.
- d) Análisis físico-mecánico proporcionado por el Centro de Investigación de la Universidad de San Carlos para determinar la carga máxima soportado por las probetas conformadas por una sección de llanta usada y una sección de segmento sólido de un taco elaborado a partir de hule natural en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.
- e) Análisis físico-mecánico proporcionado por el Centro de Investigación de la Universidad de San Carlos para determinar el esfuerzo soportado por las probetas conformadas por una sección de llanta usada y una sección de segmento sólido de un taco elaborado a partir de hule natural en base a tres tiempos de vulcanizado y dos pesos de adhesivos aplicados.
- f) Producto desarrollado, el adhesivo a base de hule natural, por medio del análisis del producto se obtuvo información sobre algunas propiedades como tiempo de tacking (adherencia), Dureza Shore A y ángulo de fijación de taco.

### 3.2 INSTRUMENTACIÓN

Se utiliza la siguiente maquinaria de instrumentos

#### 3.2.1 Maquinaria

<b>Proceso</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Descripción</b>
Cortadora de hule natural	Guillotina para cortar hule.	Se utiliza para reducir las maquetas de hule natural a pequeños trozos para su fácil manejo e introducción a la mezcladora.



Figura 13 Guillotina de hule  
Fuente: Allbiz (2015)

<b>Proceso</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Descripción</b>
Mezclado	Tanque de Mezclado	Se utiliza para homogenizar el soluto (hule natural) y el disolvente (rubber solvent).



Figura 14 Tanque de Mezclado  
Fuente: Puritronic (2015)

Proceso	Instrumento	Descripción
Abastecimiento de toneles	Llenadora de Toneles	Se utiliza para llenar los toneles una vez la homogenización se ha completado.



Figura 15 Llenadora de Toneles  
Fuente: BSC (2015)

Proceso	Instrumento	Descripción
Equipo de Vulcanización	Reactor Cinético	Se utiliza para la vulcanización del pegamento una vez ha sido aplicado.



Figura 16 Reactor Cinético  
Fuente: Magna Boscoe (2015)

Proceso	Instrumento	Descripción
Formación de vapor	Caldera	Se utiliza para proveerle vapor saturado al reactor cinético y activar la reacción de vulcanización.



Figura 17 Caldera  
Fuente: Kay Iron Works (2015)

<b>Proceso</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Descripción</b>
Inyección de agua hacia la caldera	Bomba de Desplazamiento Positivo	Se utiliza para inyectar el agua hacia la caldera.



Figura 18 Bomba de Desplazamiento Positivo  
Fuente: Técnica Industriale (2015)

<b>Proceso</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Descripción</b>
Fijación de ambos sustratos	Stitcher (rodillo metálico)	Se utiliza para compactar los extremos de la superficie del taco de hule natural y mejor la adhesión.



Figura 19 Stitcher  
Fuente: Ali Express (2015)

<b>Proceso</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Descripción</b>
Fijación de ambos sustratos	Martillo de cabeza de acero	Se utiliza para compactar la superficie del hule natural y mejor la adhesión en la unión



Figura 20 Martillo de cabeza de acero  
Fuente: Todo Ferretería y Construcción (2015)

### 3.2.2 Procedimiento

Proceso	Instrumento	Descripción
Medición de Presión.	Manómetro: Unidades: PSI Rango de escala: 0-200 PSI Precisión: $\pm 2.5$ PSI	Se utiliza para verificar la presión a la cual está entrando el vapor saturado al reactor cinético y controlar las condiciones de la vulcanización.



Figura 21 Manómetro  
Fuente: Mitchen Instrumentation (2015)

Proceso	Instrumento	Descripción
Medición de Temperatura	Termómetro Unidades: $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$ Rango de escala: 40-290 $^{\circ}\text{C}/100-550^{\circ}\text{F}$ Precisión: $\pm 1^{\circ}\text{C}/\pm 2.5^{\circ}\text{F}$	Se utiliza para controlar la temperatura en el reactor cinético y mantener las condiciones de la vulcanización constantes.



Figura 22 Termómetro  
Fuente: Gauges-Thermometer (2015)

<b>Proceso</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Descripción</b>
Medición de Dureza Shore A	Durometro Shore A Rango de Escala: 0-100 Presión en la punta de la aguja de 0-2.5mm.	Se utiliza para realizar lecturas de dureza a lo largo de la superficie del material vulcanizado. Dentro de las consideraciones de uso: Se deben realizar las mediciones a más de 12 mm de las esquinas del material. Realizar 5 diferentes mediciones a más de 6 mm de distanciamiento y sacar un promedio de la medición.



Figura 23 Durómetro  
Fuente: Direct Industry, (2015)

<b>Proceso</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Descripción</b>
Peso de Materia Prima Caucho	Balanza Semianalitica Unidades: Gramos Rango: 0-2000 grs Precisión: 0.5 grs	Se utiliza para pesar las cantidades de caucho que se incorporan y se disuelven al volumen de solución de adhesivo.



Figura 24 Balanza Digital  
Fuente: Ohaus (2015)

Proceso	Instrumento	Descripción
Medición de área de sección de junta.	Vernier Material: Aluminio Unidad: milímetro y centímetro. Rango de medición. 0-150 mm Precisión: $\pm 0.01$ mm	Se utiliza para medir las áreas de unión en ambas probetas. Al igual los espesores y longitudes respectivas de las probetas.



Figura 25 Vernier  
Fuente: Anyi (2015)

### 3.2.3 Análisis de Ruptura

Proceso	Instrumento	Descripción
Análisis de Ruptura	Informe de Resultados de ensayo físico-mecánico.	Informe entregado por el Centro de Investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Indican los resultados obtenidos y una tabla resumen de las diferentes pruebas. Ver Anexo # (1-18)

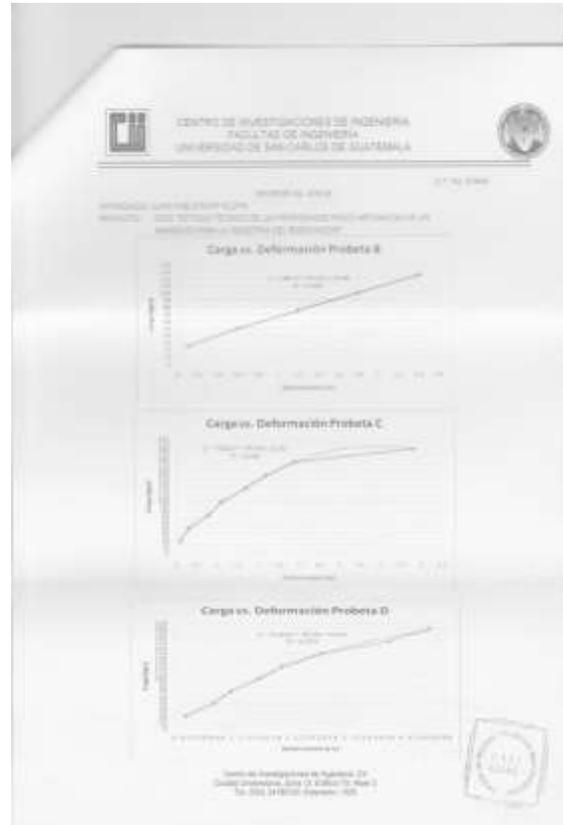


Figura 26 Análisis Físico Mecánico Pag. 1    Figura 27 Análisis Físico Mecánico Pag. 2

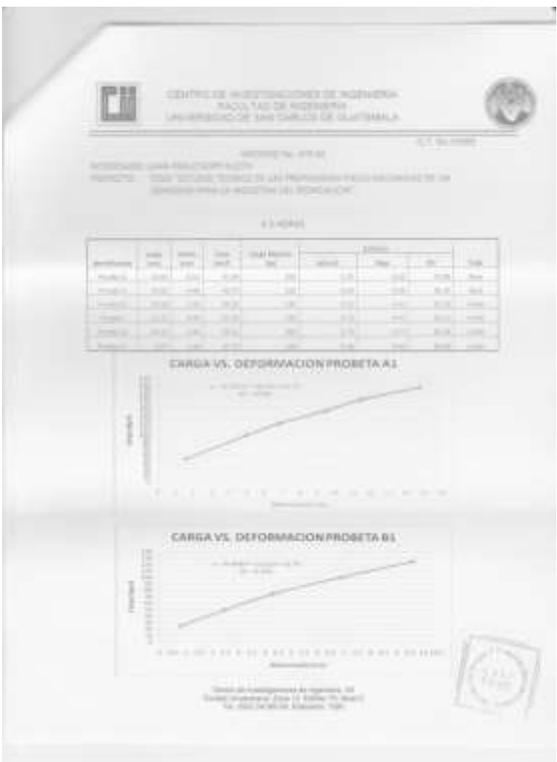
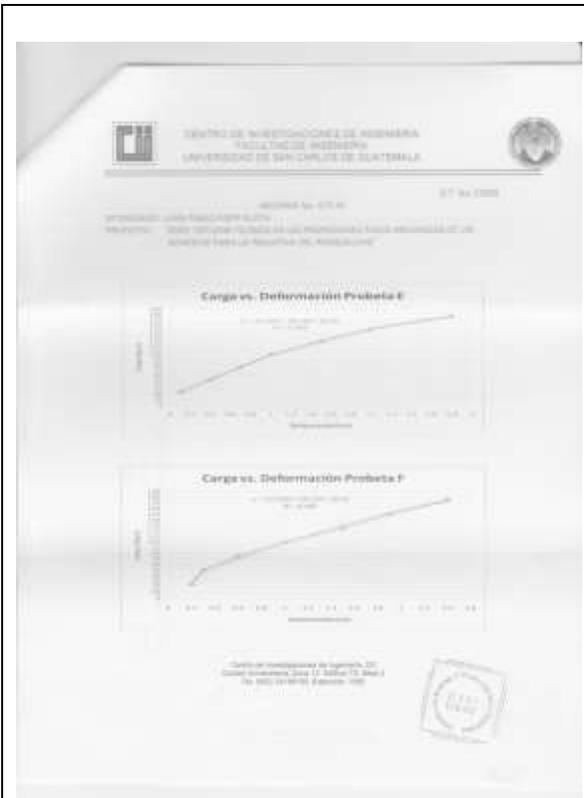


Figura 28 Análisis Físico Mecánico Pag. 3      Figura 29 Análisis Físico Mecánico Pag. 4

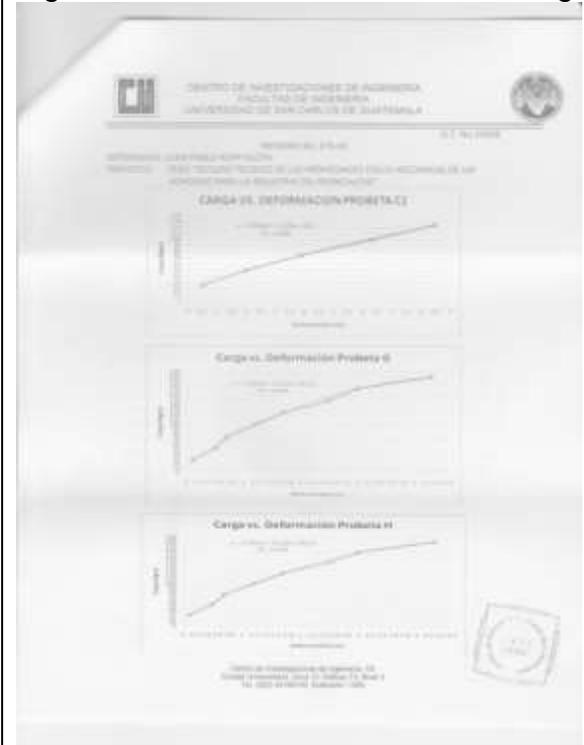


Figura 30 Análisis Físico Mecánico Pag.5      Figura 31 Análisis Físico Mecánico Pag. 6

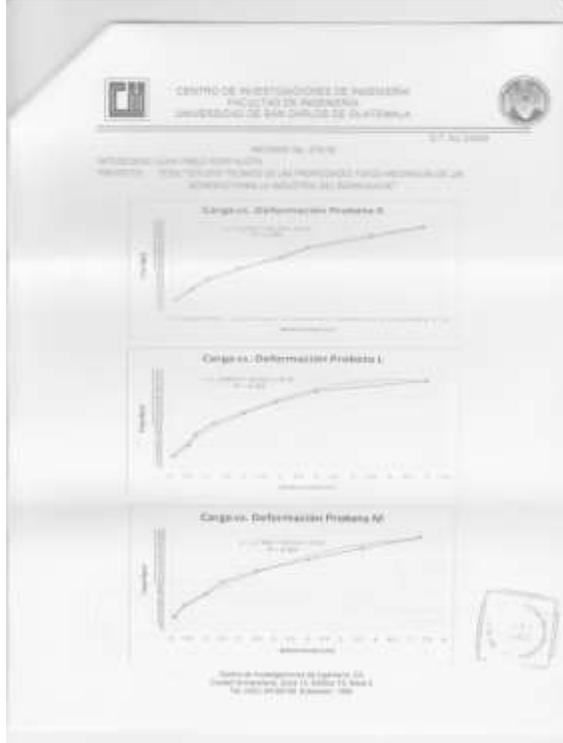


Figura 32 Análisis Físico Mecánico Pag. 7    Figura 33 Análisis Físico Mecánico Pag. 8

Fuente: Elaboración propia (2014)

### 3.3. PROCEDIMIENTO

#### 3.3.1 Elaboración del Adhesivo

Preparación del cojín de reencauche	Retirar el plástico protector del cojín	
Masa de cojín de reencauche	Pesar 48 g de cojín para reencauche	
Masa de solvente	Pesar 400 g de solvente con proporción 90:10, hexano: tolueno.	
Unión de la mezcla	La mezcla se debe realizar en un matraz de vidrio Pyrex ya que la reacción tiene carácter endotérmico por lo que disminuye la temperatura.	
Agitación	La agitación debe de ser constante hasta lograr la desaparición total de la lámina de cojín. La mezcla debe estar totalmente homogénea.	
Reposo	Se debe dejar reposar la mezcla por espacio de unos minutos para que las burbujas de aire producidas en la agitación salgan de manera natural.	

Fuente: Elaboración propia (2015)

### 3.3.2 Preparación de las probetas conformadas de secciones de llanta usada

Raspado	Raspar una llanta utilizando una maquina especializada, dejando al descubierto el hule interno de la llanta.	 <p data-bbox="867 667 1386 701">Figura 36. Corte transversal de llanta.</p>
Obtención de la superficie de la llanta	Cortar una sección transversal de una llanta usada.	
Trazado de ángulos	Una vez raspada y cortada la llanta se procede a trazar el ángulo deseado para la colocación del taco.	 <p data-bbox="867 1415 1370 1507">Figura 37. Delimitación de áreas de pegado en llanta usada.</p>
Corte específico de la probeta	Una vez definido el ángulo se procede a cortar el área específica de la probeta a analizar.	

Fuente: Elaboración propia (2015)

### 3.3.3 Preparación de las probetas conformadas de secciones de hule natural

Preparación del segmento a analizar	Se procede a medir el área específica que se ajuste con el área de la probeta hecha a partir de una sección de llanta usada.	
Corte	Por medio de la utilización de una guillotina y cuchillos se delimita el área específica y se procede con el corte de la pieza.	

Figura 38. Delimitación de áreas de pegado en sección e hule natural.

Fuente: Elaboración propia (2015)

### 3.3.4 Preparación de la superficie de la probeta hecha a partir de un segmento de llanta usada

Peso de la probeta	Se procede a pesar la masa de la probeta antes del tratamiento.	
Reblandecimiento del área de unión por medio de la utilización de solvente.	Se procede a reblandecer la superficie de la probeta hecho a partir de un segmento de llanta usada con solvente.	

Figura 39. Preparación de superficie de llanta usada.

Aplicación del adhesivo en el área de unión.	Posterior al reblandecimiento se procede a la aplicación del adhesivo.	
Tara de la probeta	Se realiza una tara de la probeta para identificar la cantidad de adhesivo empleada en el área de unión.	
Tiempo de Tacking (adherencia)	Se procede a esperar 20 minutos correspondiente al tiempo de tacking	

Figura 40. Preparación de superficie de llanta usada y aplicación de adhesivo.

Fuente: Elaboración propia (2015)

### 3.3.5 Preparación de la superficie de la probeta hecha a partir de un segmento taco elaborado a partir de hule natural

Peso de la probeta	Se procede a pesar la masa de la probeta.	
Reblandecimiento con solvente del área de unión.	Se procede a reblandecer la superficie de la probeta hecha a partir de un segmento de taco elaborado a partir de hule natural con solvente.	
Preparación de la superficie.	Posterior al reblandecido del taco, se procede a rasparlo utilizando un cepillo de alambre para formar leves hendiduras en la superficie del taco.	

Figura 41. Preparación de superficie de los segmentos de hule natural.

<p>Aplicación del adhesivo en el área de unión.</p>	<p>Posterior a la preparación de la superficie se procede a la aplicación del adhesivo.</p>	 <p>Figure 42. Preparación de superficie de los segmentos de hule natural y aplicación de adhesivo.</p>
<p>Tara de la probeta</p>	<p>Se realiza una tara de la probeta para identificar la cantidad de adhesivo empleada en el área de unión.</p>	
<p>Tiempo de Tacking (adherencia) y colocación en el horno.</p>	<p>Se procede a colocar la pieza en el horno y esperar 20 minutos correspondientes al tiempo de tacking.</p>	

Fuente: Elaboración propia (2015)

### 3.3.6 Unión de ambas probetas

<p>Delimitación de área de unión en ambas probetas</p>	<p>Se procede a medir nuevamente el área de unión de ambas probetas corroborando las medidas iniciales.</p>	 <p>Figure 43. Delimitación de área de unión.</p>
--	---	---

Unión de probetas	Se procede a la unión de las probetas por medio de la utilización de un martillo especializado.	
Utilización de stitcher (rodillo metálico)	Se procede a utilizar la herramienta stitcher para compactar los extremos de la probeta de hule natural.	

Figura 44. Unión de probetas y utilización de stitcher.

Fuente: Elaboración propia (2015)

### 3.3.7 Vulcanización

Identificar los tiempos	Según el tratamiento correspondiente es necesario ubicar la probeta correspondiente. Los ciclos de vulcanización corresponden a 2.5 horas, 3.5 horas y 4.5 horas.	
-------------------------	---	---

Figura 45. Probetas sujetas a distintos tratamientos.

Fuente: Elaboración propia (2015)

### 3.4 DISEÑO Y METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

La metodología a realizar se basa en la Prueba de Análisis de Varianza. La prueba cumple los parámetros de la Prueba de Análisis de Varianza ya que el número de repeticiones es constante. Las diferentes pruebas se efectuarán en triplicado dando un total de 18 probetas bajo estudio en los distintos tratamientos.

Tabla 3. Tratamientos experimentales y repeticiones

Tiempo de vulcanización (h)	Masa de adhesivo (g)	
	2 g	3 g
2.5 h	III	III
3.5 h	III	III
4.5 h	III	III

Fuente: Elaboración propia (2014)

#### 3.4.1 Diseño Experimental

##### 3.4.1.1 Experimentos

El experimento se fundamenta en un ensayo físico-mecánico de probetas elaboradas a partir de un segmento de llanta usada y un segmento sólido de hule natural en forma de taco. El ensayo se fundamenta en aplicar fuerza para determinar el desgarro del material base o de la unión.

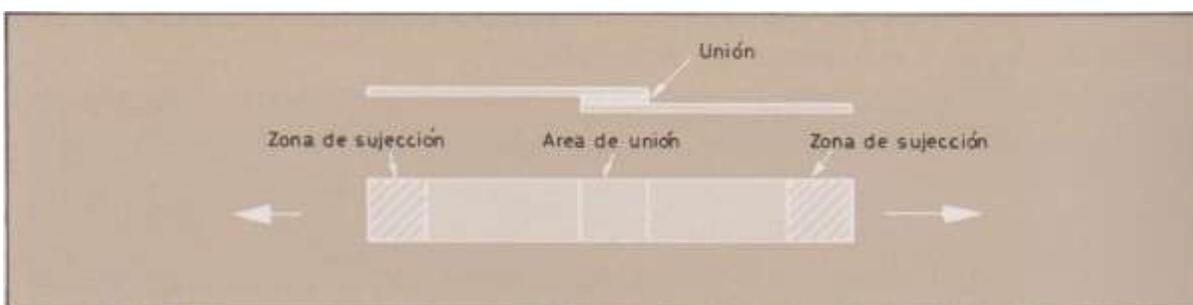


Figura 46. Diagrama de Probeta de material base y llanta usada

Fuente: Liesa y Bilurbina (1990).



Figura 47. Diseño de Probeta de material base y llanta usada

Fuente: Elaboración propia (2014)



Figura 48. Inicio del ensayo de tensión

Fuente: Elaboración propia (2014)



Figura 49. Momento antes de la falla en la sección de unión durante el ensayo de tensión.

Fuente: Elaboración propia (2014)

#### 3.4.1.2 Tratamientos y Repeticiones de los Experimentos.

Las distintas combinaciones posibles son:

- 2 gramos de adhesivo y 2.5 horas de vulcanización.
- 3 gramos de adhesivo y 2.5 horas de vulcanización.
- 2 gramos de adhesivo y 3.5 horas de vulcanización.
- 3 gramos de adhesivo y 3.5 horas de vulcanización.
- 2 gramos de adhesivo y 4.5 horas de vulcanización.
- 3 gramos de adhesivo y 4.5 horas de vulcanización.

### 3.4.2 Descripción de las Unidades Experimentales

### 3.4.3 Variable Respuesta

- h) Elongación máxima (cm): es la deformación máxima en centímetro que soporta la probeta antes de un fallo en la sección de junta o fallo en el material base.
- i) Esfuerzo ( $\text{kg/cm}^2$ ): es la relación entre la carga máxima soportada por la probeta y el área de la sección de la junta.
- j) Carga Máxima (kg): es una medición en kilogramos que indica la resistencia a la fuerza paralela impresa sobre la probeta.
- k) Perfil de Carga. Vrs. Elongación: es un método gráfico para determinar el comportamiento de la probeta desde el inicio de la aplicación de la fuerza paralela a la junta (carga) y la deformación de la probeta.

### 3.4.4 Metodología de Análisis

La metodología de análisis seleccionada en la prueba se basó en un ensayo de tensión aplicándole fuerzas paralelas a la sección de junta que causaran estiramiento o elongación del material. La metodología de análisis estadístico seleccionada fue una Prueba de Análisis de Varianza con un 95% de nivel de confianza.

#### IV. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 4. Tratamiento de 2.5 Horas de Vulcanización

Identificación	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga Max (kg)	Esfuerzo			g/cm <sup>2</sup>	Sección Fallida	g. adh.
					kg/cm <sup>2</sup>	MPa	PSI			
Prueba J	10.69	4.57	48.78	220	4.51	0.44	64.15	0.04100	Unión	2
Prueba K	10.21	4.75	48.49	305	6.29	0.62	89.47	0.04125	Unión	2
Prueba L	10.38	4.69	48.70	200	4.11	0.40	58.41	0.04106	Unión	2
Prueba M	10.39	4.55	47.32	225	4.76	0.47	67.64	0.06340	Unión	3
Prueba N	10.10	4.54	45.86	225	4.91	0.48	69.78	0.06541	Unión	3
Prueba O	10.36	4.59	47.49	210	4.42	0.43	62.89	0.06317	Unión	3

Fuente: Elaboración propia (2014)

Tabla 5. Dureza Shore A Probetas de 2.5 Horas de Vulcanización

Identificación	Shore A inicio	Shore A reblandec.	Shore A final
Prueba J (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba K (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba L (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba M (Llanta/Taco)	70/38	70/35	70/60
Prueba N (Llanta/Taco)	70/38	70/35	70/60
Prueba O (Llanta/Taco)	70/38	70/35	70/60

Fuente: Elaboración propia (2014)

Tabla 6. Tratamiento de 3.5 Horas de Vulcanización

Identificación	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga Max (kg)	Esfuerzo			gr/cm <sup>2</sup>	Sección Fallida	g. adh.
					kg/cm <sup>2</sup>	MPa	PSI			
Prueba A	10.805	4.331	46.80	275	5.88	0.58	83.58	0.04274	Unión	2
Prueba B	10.593	4.225	44.76	215	4.80	0.47	68.33	0.04469	Unión	2
Prueba C	10.378	4.305	44.68	200	4.48	0.44	63.67	0.04477	Base	2
Prueba D	10.813	4.457	48.19	260	5.39	0.53	76.73	0.06225	Unión	3
Prueba E	10.822	4.395	47.56	290	6.10	0.60	86.72	0.06307	Base	3
Prueba F	10.44	4.477	46.74	265	5.67	0.56	80.64	0.06419	Unión	3

Fuente: Elaboración propia (2014)

Tabla 7. Dureza Shore A Probetas de 3.5 Horas de Vulcanización

Identificación	Shore A inicio	Shore A reblandec.	Shore A final
Prueba A (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba B (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba C (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba D (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba E (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba F (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60

Fuente: Elaboración propia (2014)

Tabla 8. Tratamiento de 4.5 Horas de Vulcanización

Identificación	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga Max (kg)	Esfuerzo			gr/cm <sup>2</sup>	Sección Fallida	g. adh.
					kg/cm <sup>2</sup>	MPa	PSI			
Prueba G	10.63	4.51	47.94	255	5.32	0.52	75.66	0.04172	Base	2
Prueba H	10.93	4.46	48.75	326	6.69	0.66	95.10	0.04102	Base	2
Prueba B1	10.18	3.36	34.26	145	4.23	0.42	60.20	0.05838	Unión	2
Prueba I	11.15	4.66	51.96	220	4.23	0.42	60.22	0.05774	Unión	3
Prueba A1	10.15	3.40	34.53	200	5.79	0.57	82.39	0.08689	Unión	3
Prueba C1	9.97	3.28	32.70	140	4.28	0.42	60.89	0.09174	Unión	3

Fuente: Elaboración propia (2014)

Tabla 9. Dureza Shore A Probetas de 4.5 Horas de Vulcanización

Identificación	Shore A inicio	Shore A reblandec.	Shore A final
Prueba G (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba H (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba B1 (Llanta/Taco)	70/40	70/38	70/60
Prueba I (Llanta/Taco)	70/38	70/35	70/60
Prueba A1 (Llanta/Taco)	70/38	70/35	70/60
Prueba C1 (Llanta/Taco)	70/38	70/35	70/60

Fuente: Elaboración propia (2014)

Tabla 10. Identificación específica de fallos en el material base de la probeta elaborada a partir de un segmento de llanta usada y un segmento de hule natural.

Identificación	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga Max (kg)	Esfuerzo			gr/cm <sup>2</sup>	g. adh.	Sección Fallida	T. Vulc. (h)
					kg/cm <sup>2</sup>	MPa	PSI				
Prueba G	10.63	4.51	47.94	255	5.32	0.52	75.66	0.04172	2	Base	4.5
Prueba H	10.93	4.46	48.75	326	6.69	0.66	95.10	0.04102	2	Base	4.5
Prueba C	10.378	4.305	44.68	200	4.48	0.44	63.67	0.04477	2	Base	3.5
Prueba E	10.822	4.395	47.56	290	6.10	0.60	86.72	0.06307	3	Base	3.5

Fuente: Elaboración propia (2014)

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Procedimiento de Elaboración de Adhesivo

Para la elaboración del adhesivo se utilizó como solvente una mezcla en proporción 90:10 de hexano y tolueno respectivamente. El nombre comercial del producto es Rubber 2. La muestra para desempeñar la experimentación corresponde al lote # 46, con fecha de producción del 06 de marzo de 2014 (Ver Anexo # 24).

Como fuente de hule natural se utilizó cojín para reencauche, con un espesor de 1/32 de pulgada (0.8 mm) y un ancho de 9 3/8 de pulgada.

La composición en peso del adhesivo corresponde a un 89.29% de solvente y de un 10.71% de sólidos. La formulación corresponde a 400 g de Rubber 2 y a 48 g de cojín para reencauche. La formulación corresponde a registros históricos promedios obtenidos en la empresa Llantas Kloth, S.A., donde se realiza el estudio.

Es importante mantener controlada la temperatura durante la elaboración del adhesivo ya que la disolución del hule natural en el solvente Rubber 2 posee características endotérmicas por lo que es necesario trabajar con equipo adecuado.

El control durante la agitación de la mezcla debe de ser riguroso en el proceso de elaboración del adhesivo ya que si la homogenización no es total se corre el riesgo que el producto final no tenga las características deseadas.

Finalmente el tiempo de reposo posterior a la agitación es un factor muy importante ya que dentro de la mezcla pueden formarse burbujas de aire lo que producirá un fallo estructural en el área de unión si estas no son removidas.

## 5.2 Procedimiento de Preparación de la Superficie de Llanta usada y del Taco de Hule Natural.

La preparación de la superficie de unión es un factor muy importante cuando se desean lograr una adherencia correcta. En la superficie de la llanta usada se emplea un sistema de desgaste por medio de la utilización de herramientas giratorias de alta revolución con puntas de tungsteno. El objetivo principal de la utilización de estas herramientas es de incrementar el área superficial de la llanta haciendo pequeñas hendiduras que a su vez incrementan la superficie de contacto y hacen que el adhesivo tenga un mayor grado de penetración en el material.

De forma similar se busca formar leves hendiduras con el taco hecho a partir de hule natural. Por las características del material no es posible utilizar las mismas herramientas ya que el hule sin vulcanizar es muy maleable y no posee una dureza significativa. Por lo que se procede a reblandecer la superficie del taco de hule natural con el solvente a utilizar. La aplicación del hexano y el tolueno contenidos en el solvente hace que el material se reblandezca y por medio de la utilización de un cepillo de alambre de metal se procede a desgastar la superficie y formar pequeñas hendiduras que a su vez incrementan la superficie de contacto y el área superficial del material.

Este procedimiento de formar pequeñas hendiduras del material es muy importante para incrementar el área de contacto de la superficie. La selección del disolvente es una parte fundamental ya que debe ser compatible con el caucho de lo contrario causaría daño a la superficie en cuestión. (Liesa y Bilurbina, 1990).

## 5.3 Ángulo de Pegado del Taco de Hule Natural

El ángulo de pegado es un factor muy importante ya que este puede incrementar o disminuir el esfuerzo a la tensión provocando que el material falle prematuramente. El ensayo montado sigue las directrices de los fabricantes de neumáticos donde se establece que un ángulo de 23° favorece en mayor parte a la tracción de la llanta, utiliza una menor cantidad de caballos de fuerza del equipo para su funcionamiento y economiza el combustible del equipo. (Firestone Farm Tires, 2015)

#### 5.4 Aplicación y Evaluación del Adhesivo

La aplicación de la cantidad correcta de adhesivo es una parte crucial del éxito en la adherencia de los dos materiales. Un aspecto a considerar, en una unión con adhesivos, es el espesor de la capa de adhesivo. Un espesor insuficiente de la capa de adhesivo hará que la unión falle y que tenga una resistencia muy reducida. Por el otro lado un exceso de adhesivo puede potencializar la presencia del componente volátil del adhesivo causando fallo en la junta. (Polaski, Means, Stull, Warren, Allen, Mowrey y Carney, 2004.)

La teoría elástica indica que las capas gruesas deben de tener una resistencia mayor. Por el contrario existen algunas razones las cuales nos indican que las capas con espesores delgados son más adecuadas para lograr una mayor resistencia en la unión. Dentro de las cuales encontramos las siguientes:

- a. A mayor espesor de película de adhesivo, mayor es la probabilidad que exista presencia de burbujas de aire o de alguna impureza que debilite la unión.
- b. El esfuerzo necesario para deformar una película delgada es superior al de una de mayor espesor.
- c. Las tensiones internas que se originan en el proceso de la unión, están relacionadas directamente con el espesor de película.
- d. La posibilidad de el adhesivo se cristalice es mayor conforme aumente el espesor de película.

(Liesa y Bilurbina, 1990).

Evaluando los resultados obtenidos se puede resaltar que se cumple lo establecido por la literatura ya que la mayor cantidad de fallos en el material base que se obtuvieron fueron con la capa de adhesivo con menor espesor. El 75% de las fallas en el material base se vieron reflejados en probetas que poseían 2 gramos de adhesivo, lo cual indica que las películas de adhesivo más delgadas fueron más efectivas preservando la unión de los dos sustratos. (Ver Anexo # 19 y Anexo # 20). Dos de los tres ensayos vulcanizados a 4.5 horas y utilizando 2 gramos de adhesivo sostuvieron falla estructural en el material base, dejando la unión sin ninguna lesión.

De igual forma uno de los tres ensayos vulcanizado a 3.5 horas y utilizando 2 gramos de adhesivo soportó la carga entregada y por consecuencia fallo el material base.

#### 5.5 Tiempo de Tacking (adherencia)

El tiempo de tacking (adherencia) es una propiedad muy importante en los adhesivos ya que nos indica el tiempo en el cual el adhesivo puede adherirse a otro sustrato. En adhesivos en estado líquido el tacking (adherencia) indica la pegajosidad del adhesivo.

Dentro de las consideraciones del tiempo de tacking (adherencia) factores como la humedad relativa del ambiente son muy importantes ya que, el tiempo de tacking (adherencia) está fuertemente ligado a la presión de vapor del componente volátil del adhesivo. El componente volátil o vehículo del adhesivo formulado es el hexano, el cual tiene una presión de vapor correspondiente a 16.13 kPa a 20°C y el tolueno de 2.8 kPa. (Presión de vapor del agua es de 2.27 kPa. A 20°C.) (Reid, Prausnitz y Sherwood, 1977).

El tiempo de tacking (adherencia) promedio durante el ensayo corresponde a 20 minutos. Este valor está ligado directamente a las consideraciones meteorológicas del día de aplicación del adhesivo ya que cuando la humedad relativa en el ambiente es alta, el tiempo de tacking (adherencia) incrementa significativamente debido a que existe cierto impedimento para la evaporación del compuesto volátil contenido en el adhesivo.

#### 5.6 Unión de los sustratos

La unión de los dos sustratos es una parte crítica para la adherencia de ambas partes. Es importante tomar en cuenta aspectos como el tiempo de tacking, el espesor de película de adhesivo y la remoción absoluta de agentes contaminantes. Durante los ensayos se utilizó un martillo de cabeza de acero especializado y un stitcher (rodillo metálico) para eliminar las burbujas de aire que pudieran haberse concentrado en la unión. La función de estas herramientas es eliminar las burbujas de aire utilizando métodos de presión en todos los puntos del área de unión para

compactar el área y mejorar el desempeño del adhesivo. La utilización del stitcher (rodillo metálico) es muy importante ya que en los extremos de la probeta se puede manipular el hule natural de tal manera que mejora la unión de los dos sustratos. (Ver Anexo # 19). Se busca darle un acabado tipo media caña en los bordes de la probeta, de esta forma se mejora la sujeción del segmento de hule natural hacia la superficie de la llanta.

## 5.7 Vulcanización

La vulcanización se realizó por la vía húmeda utilizando una caldera de 65 HP para generar vapor. La caldera trabaja hasta una presión de 100 PSI (689.48 kPa). El vapor saturado luego es inyectado a una autoclave hasta equilibrar presiones. El tiempo de vulcanización comienza a transcurrir una vez la presión del autoclave está en un rango entre 90-95 PSI (620.53-655 kPa) y la temperatura se ubica en un rango de 140°-150°C. Debido al equilibrio dinámico que mantiene el sistema, cada cierto tiempo la autoclave es purgada, expulsando del sistema el agua condensada y se inyecta vapor nuevamente. Durante la experimentación se realizaron tres diferentes tiempos de vulcanización para evaluar la significancia del tiempo de vulcanizado en la unión. Los tiempos establecidos corresponden a 2.5 horas, 3.5 horas y 4.5 horas.

El 100% de los ensayos en los que fallo el material base se encontró que están ubicados en los tiempos mayores de vulcanización en 3.5 horas y 4.5 horas. Por lo que se consiguió identificar que a mayor tiempo de vulcanización la unión se ve favorecida por el incremento de enlaces disulfuros que se da. (Ver Anexo # 22) El 50% de los ensayos en los cuales fallo el material base se encuentran concretamente en un tiempo de vulcanización alto, correspondiente a 4.5 horas, y una delgada película de adhesivo (2 gramos). La combinación del mayor tiempo de vulcanización (4.5 horas) y la menor cantidad de adhesivo (2 gramos) favorecieron el fortalecimiento de la unión de los sustratos (Ver Anexo # 20).

## 5.8 Ensayo a Tensión

La metodología de experimentación elegida para determinar la resistencia a la tensión cortante se da a partir de la aplicación de fuerzas paralelas al plano de la junta. El ensayo de esfuerzo cortante es el más acertado al contexto de la utilización de un adhesivo en el reencauche de llantas ya que durante el rodamiento existe este tipo de esfuerzo que exige de manera permanente al material.

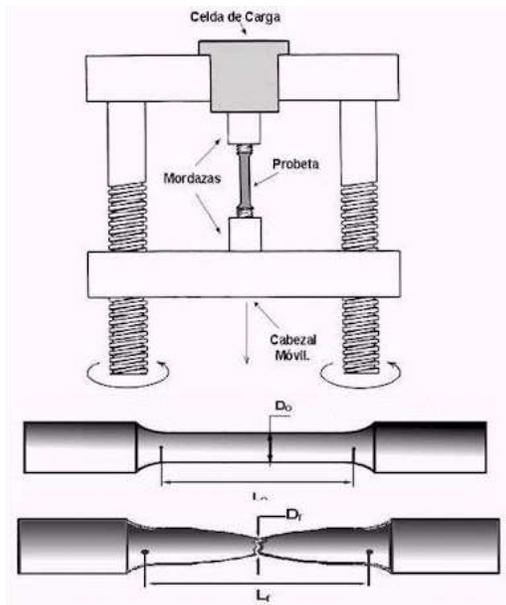


Figura 50. Ilustración de ensayo

Fuente: Rodríguez. (2014)

La ilustración presentada refleja el ensayo realizado a cada probeta aplicándole diferentes cargas, obteniendo esfuerzos diferentes a lo largo de los tratamientos. Inclusive en algunos casos el material base fallo y la unión prevaleció.

La mayor tensión presente en el área de la junta se concentra en los extremos de la probeta. En estos puntos la tensión es mayor que en el centro de la sección de pegado, es por esto que es de vital importancia la utilización de la herramienta stitcher (rodillo metálico) en los extremos de la sección de unión. Mediante la utilización de esta herramienta se logra asentar de mejor forma el material en los extremos logrando una mejor fijación del material, por medio del acabado media caña.

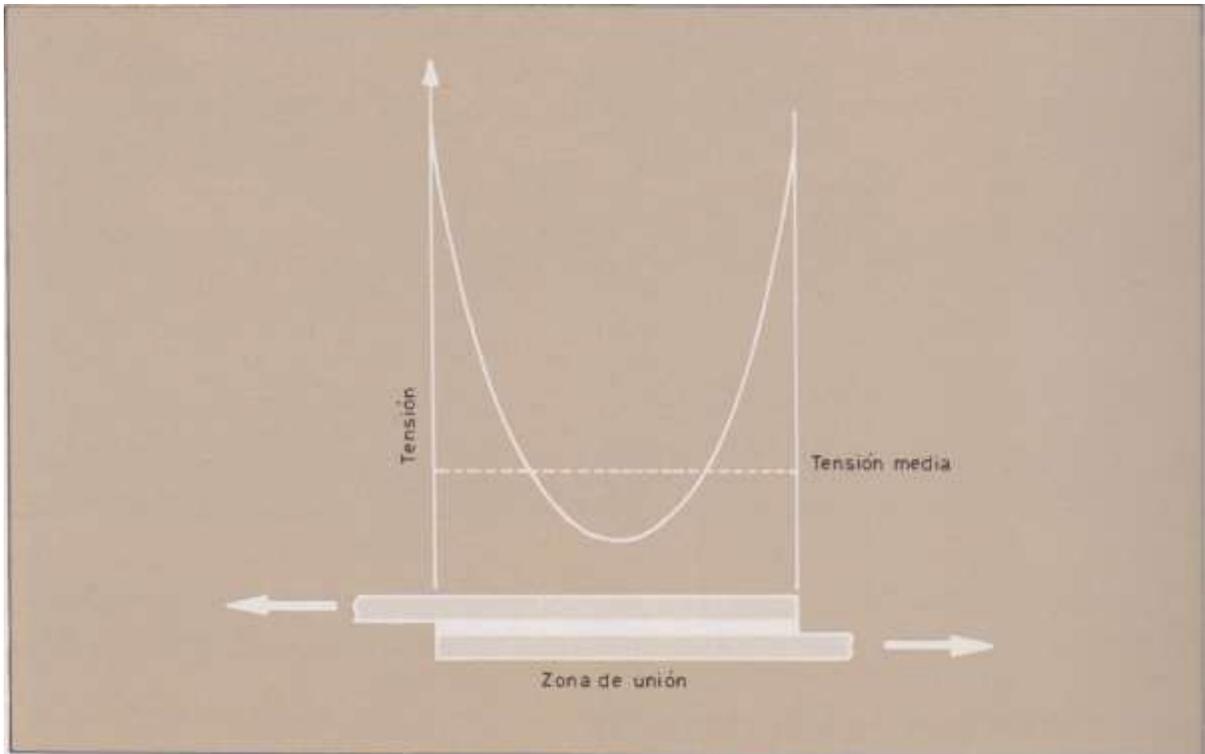


Figura 51. Ensayo de Cizalladura (esfuerzo cortante)

Fuente: Liesa y Bilurbina, (1990).



Figura 52. Prueba experimental de ensayo Destructivo.

Fuente: Elaboración propia (2014)

### 5.9 Gráfica Carga vrs. Deformación de probetas

El hule natural es un material elástico No-Lineal, por lo cual al aplicarle una fuerza deformante la curva de respuesta del material tiene características polinómicas.

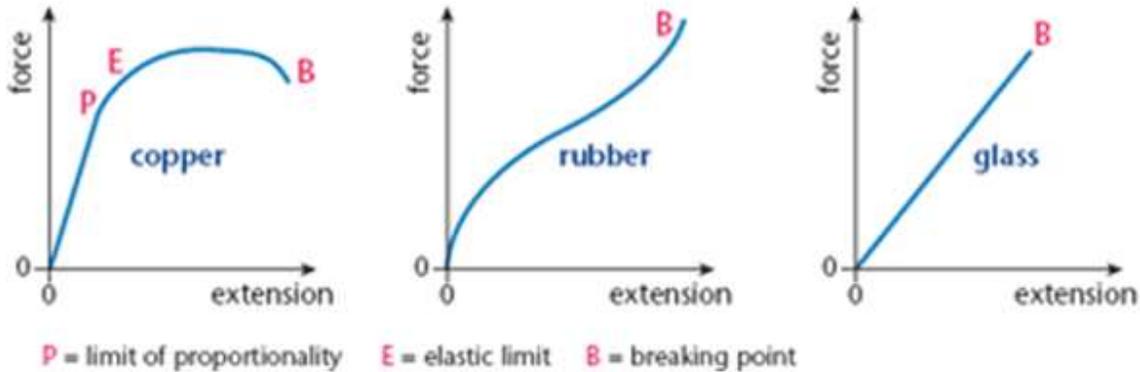


Figura 53. Respuesta de los distintos materiales a deformación.

Fuente: Booth y Brodie (2008)

La característica No-Lineal se mantuvo durante la experimentación ya que la regresión polinómica de segundo grado se adecua de mejor manera a la curva elaborada (Ver Anexo 1-18).

El hule natural no obedece la Ley de Hooke y permanece elástico hasta el punto de quiebre.

### 5.10 Inconsistencia en los fallos de unión

La falla e inconsistencia en la adhesión de los dos sustratos se justifica por la formación de burbujas en la superficie a vulcanizar. El método de fijación utilizado a partir del uso de martillos de cabeza de acero, no permite que el aire salga en su totalidad de la interfaz de la unión y estas quedan atrapadas dentro de los dos sustratos. El taco elaborado a partir de hule natural por sus características tiende a contrarrestar la acción del golpe del martillo haciendo que la fuerza del golpe sea menor a lo largo del espesor del material, haciendo que exista heterogeneidad a lo largo de la superficie donde se aplica el adhesivo.

### 5.11 Elongación Máxima

La elongación máxima es una medición en centímetros que indica la extensión máxima del material antes de sufrir un daño estructural causando la fatiga del material. La fatiga del material se da a causa de la aplicación de cargas sistemáticas con el fin de encontrar el límite de elongación del material antes de la ruptura. Al ser el hule natural un material elastómero posee porcentajes de elongación bastante altos. El hule natural puede estirarse aproximadamente un 700% de su estado inicial antes de romperse. La elongación es inversamente proporcional a la dureza del material. (R.L. Hudson & Company, 2014).

Los resultados de la experimentación reflejan que a mayor tiempo de vulcanización, mayor es la elongación alcanzada por las probetas de hule. El factor gramaje de adhesivo no posee alteraciones significativas por lo que se descarta en el proceso de elongación.

### 5.12 Esfuerzo

El esfuerzo es una medida experimental expresada en kilogramos de carga por centímetro cuadrado de área. El esfuerzo es un indicador experimental donde podemos interpretar la cantidad de carga soportada por unidad de área. El esfuerzo es un índice de resistencia de materiales pueden existir esfuerzo normal (axial) o esfuerzo tangencial (cortante). El esfuerzo tangencial es un esfuerzo perpendicular al eje del elemento, que tiende a desplazar una porción del elemento respecto a otro.

Los resultados experimentales reflejan que la menor cantidad de gramaje de adhesivo mejoró el esfuerzo de las probetas. Los esfuerzos de las probetas con menor cantidad de adhesivo son mayores que las probetas con mayor cantidad de adhesivo. Por otro lado los resultados experimentales con tiempos de vulcanización correspondientes a 4.5 horas poseen los valores máximos de esfuerzo.

### 5.13 Carga Máxima

La carga máxima es la fuerza soportada por el material momentos antes de darse la ruptura del material. La carga es una medida de fuerza que se mide en kilogramos. Durante el ensayo de esfuerzo cortante, la carga se aplica de forma paralela a la unión causando la elongación del material. La carga máxima se encuentra ligada directamente con el índice de esfuerzo.

Los resultados experimentales reflejan que la menor cantidad de gramaje de adhesivo mejoró la carga máxima soportada por las probetas. La carga soportada por las probetas con menor cantidad de adhesivo es mayor que la carga soportada por las probetas con mayor cantidad de adhesivo. Por otro lado los resultados experimentales con tiempos de vulcanización correspondientes a 4.5 horas poseen los valores máximos de carga.

### 5.14 Dureza Shore A

La Dureza Shore A del taco de hule natural sin vulcanizar al inicio del tratamiento ronda alrededor de las 40 unidades en la escala Shore A, al reblandecer con solvente se determinó una disminución en la escala Shore A de aproximadamente 2 unidades. Al final del tratamiento las probetas de hule natural llegaron a durezas correspondientes a 60 unidades Shore A. Lo cual contrasta a las 70 unidades de dureza que presenta el material original de la llanta. (Ver Anexo # 25)



Figura 54. Escala de Dureza Shore A

Fuente: De Máquinas y Herramientas (2015)

## VI. CONCLUSIONES

En relación al objetivo general:

- a. Se realizó el estudio físico-mecánico de adhesividad de segmentos de hule natural a superficies de hule vulcanizado mediante la utilización de un adhesivo elaborado a partir de hule natural.
- b. Es posible elaborar un adhesivo a partir de hule natural con una composición porcentual en peso correspondiente a 10.71% hule natural como soluto y 89.29% Rubber 2 como disolvente.

En relación al primer objetivo específico

- c. Se determinó que los valores máximos de elongación soportada por las probetas se localizaron dentro del tiempo de vulcanización correspondiente a 4.5 horas y dentro de los rangos de gramaje de adhesivo de 2 y 3 gramos.
- d. Según el Análisis de Varianza realizado con los datos experimentales de elongación no hay suficiente información para indicar que los tratamientos empleados son distintos.

En relación al segundo objetivo específico

- e. Se determinó que el esfuerzo máximo soportado en  $\text{kg/cm}^2$  se refleja en las probetas donde el material base falló; los máximos valores de esfuerzos en los ensayos corresponden a las probetas vulcanizadas por espacio de tiempo correspondiente a 4.5 horas y a una aplicación de adhesivo de 2 gramos.
- f. Según el Análisis de Varianza realizado con los datos experimentales de esfuerzo no hay suficiente información para indicar que los tratamientos empleados son distintos.

En relación al tercer objetivo específico

- g. Se determinó que los valores máximos de carga soportada por las probetas se localizaron en valores correspondientes a 4.5 horas de vulcanización y 2 gramos de adhesivo.
- h. Según el Análisis de Varianza realizado con los datos experimentales de carga máxima no hay suficiente información para indicar que los tratamientos empleados son distintos.

En relación al cuarto objetivo específico

- i. En los ensayos donde falló el material base se determinó que el 75% de ellos poseen 2 gramos de adhesivo.
- j. Se determinó que el tratamiento correspondiente a mayor tiempo de vulcanización con la menor cantidad de adhesivo resultó en mayores desgarres del material base.
- k. Se determinó que el 100% de los ensayos donde existió falla en el material base se encontraban dentro de valores de tiempo de vulcanizado de 3.5 y 4.5 horas.

En relación al quinto objetivo específico

- l. Se determinó que todas las probetas elaboradas a partir de hule natural se reblandecen aproximadamente 2 unidades en la escala Shore A y cuando son vulcanizados alcanzan durezas de 60 en la escala Shore A.
- m. Se alcanzó una Dureza Shore A de 60 unidades que está por debajo de la Dureza Shore A de la llanta original con valor de 70 unidades.

## VII. RECOMENDACIONES

Esta fase de investigación es importante ya que se plantea una propuesta que puede ser extrapolada hacia otros procesos abarcando toda la línea de neumáticos reencauchados.

1. Amplificar los tiempos de vulcanización y gramaje de adhesivo utilizado para la unión de un sustrato elaborado a partir de hule natural y otro sustrato elaborado a partir de una llanta usada.
2. Realizar un estudio inmediato para llantas industriales de diferentes tamaños.
3. Diseñar una prensa para mejorar la fijación de ambos sustratos, incrementando la presión en el área de pegado y mejorando la fijación.
4. Determinar la posibilidad de utilización de un rodillo para la aplicación del adhesivo y evaluar si existe mejora en la extensibilidad y la cobertura de la superficie.
5. Implementar un programa de trazabilidad en los instrumentos de medición del proceso de vulcanizado.
6. Realizar un proyecto de estudio de los tipos comerciales de reencauche y emplear los diferentes ensayos para tener un criterio unificado para todos los escenarios posibles de llanta reencauchadas.
7. Realizar un estudio técnico-económico para determinar el impacto en la mejora de calidad de pegado e incrementar el volumen de producción.
8. Ya que el proceso lo permite hacer un análisis de costos más a fondo para determinar el ahorro en horas-hombre que produce utilizar un solvente como vehículo del adhesivo.
9. Utilizar equipo termo resistente cuando se desee ejecutar el proceso de formulación de adhesivo a nivel industrial ya que la reacción de disolución del hule natural en el disolvente Rubber 2 tiene características endotérmicas.
10. Realizar un estudio de estereoscopia de la película de adhesivo para evaluar la posible formación de burbujas sobre la superficie a vulcanizar.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar, (2014). *Polímeros*. (1era ed.) Guatemala: Julio Alberto Aguilar Schafer.
2. Ali Express (2015). *Venta al por mayor neumáticos parche rodillo*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://es.aliexpress.com/w/wholesale-tire-patch-roller.html>. [Último acceso 17 de marzo de 2015].
3. Allbiz (). *Guillotina Mod. 1*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://buenos-aires.all.biz/guillotina-mod-1-g49942#.VOqVEPmG-So>. [Último acceso 22 febrero 2015].
4. Anyi Instrument Corporation Co. Ltd. (). *Vernier Calipers (Mono-block Vernier)*. [EN LÍNEA] Disponible en: [http://www.aylj.com/en/vermier\\_calipers\\_vernier\\_calipers\\_\(mono-block\\_vernier\).htm](http://www.aylj.com/en/vermier_calipers_vernier_calipers_(mono-block_vernier).htm). [Último acceso 22 febrero 2015].
5. Booth y Brodie, (2008). *Physics*. (1ra ed.) England: Letts and Lonsdale.
6. Burato Stelio Comacchio (). *Envasadoras de alta tecnología para la Industria Química, Farmacéutica, Cosmética y Alimenticia*. [EN LÍNEA] Disponible en: [http://www.bscargentina.com.ar/llenadora\\_LPMass-1.html](http://www.bscargentina.com.ar/llenadora_LPMass-1.html). [Último acceso 22 febrero 2015].
7. De Máquinas y Herramientas (2015). *Durómetro Shore*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.demaquinasyherramientas.com/wp-content/uploads/2015/02/Escala-de-dureza-Shore.jpg>. [Último acceso 22 abril de 2015].
8. Direct Industry (). *Durómetros Shore*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/durometro-shore-81162.html>. [Último acceso 22 febrero 2015].
9. Encyclopedia (2014). *Vulcanization*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.encyclopedia.com/topic/vulcanization.aspx>. [Último acceso 21 abril de 2015].
10. Escuela de ingenierías industriales. (2015). *El caucho*. [EN LÍNEA] Disponible en [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/automovil/paginas/EI\\_caucho.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/automovil/paginas/EI_caucho.htm) [Último acceso 29 abril de 2015].

11. Firestone (2015). *Choosing the right tire*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.firestoneag.com/en/tire-info/frequently-asked-questions/default.aspx>. [Último acceso 3 febrero de 2015].
12. Grupo Introsa (2015). *Fincas*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.grupointrosa.com/index.php/es/procesos-es/procesos-fincas-es>. [Último acceso 22 abril de 2015].
13. Gauges Thermometers (). *Adjustable-Angle Air Duct Thermometer AS6 - 9" SCALE*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.gauges-thermometers.com/thermometer/industrial-thermometers/as6-9.html>. [Último acceso 22 febrero 2015].
14. Hibbeler, (2005): *Mechanics of materials*, 6ta edición. Prentice Hall.
15. International rubber study group, I.R.S.G. (2008). *Comportamiento del caucho natural en Colombia y el mundo*. [EN LÍNEA] Disponible en: [http://www.agronet.gov.co/www/docs\\_agronet/20084915429\\_Bullets\\_Caucho\\_2008.pdf](http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/20084915429_Bullets_Caucho_2008.pdf) [Último acceso 6 marzo de 2015].
16. Kay Iron Works (). *Industrial Boilers*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.kayironjorian.com/industrial-boilers.html>. [Último acceso 22 febrero 2015].
17. Lanzani (2014). *Escareado-preparación para la reparación de cráteres. SLTCAUCHO*. 4ta edición (), pp.50-51
18. Liesa y Bilurbina (1990). *Adhesivos Industriales*. 1era ed. España: Marcombo, S.A.
19. Magna Bosco S.R.L. (). *Autoclave for tyres retreading and repairing*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.magnabosco.com/sp/en/reconstruction-autoclaves>. [Último acceso 22 febrero 2015].
20. Mark, Erman, Burak, Eirich. Freferick (2005). *Science and Technology of Rubber*. 3era Edición: San Diego California: Elsevier Academic Press.
21. Mejía. (2010). *Potencialidades para la implementación de cultivos de caucho (Hevea Brasiliensis) en el municipio de Yopal Casanare*: Tesis inédita: Universidad Nacional de Colombia.

22. Memidex (2015). *Vulcanization*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.memidex.com/vulcanizations>. [Último acceso 21 abril de 2015].
23. Merck Millipore (2015). *Tolueno*. [EN LÍNEA] Disponible en: [http://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Tolueno,MDA\\_CHEM-100849](http://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Tolueno,MDA_CHEM-100849). [Último acceso 22 abril de 2015].
24. Mitchell Instrument Company Inc. (). *3D Accu-Drive 2554 High Accuracy Analog Pressure Gauge - 0.25% accuracy*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.mitchellinstrument.com/pressure-gauge-high-accuracy-analog-scale.html>. [Último acceso 22 febrero 2015].
25. Moore, (2015). *Just the Facts 101*. 5ta Edición. : Cram101.
26. Ohaus (). *Scout Pro*. [EN LÍNEA] Disponible en: [http://www.ohaus.com.mx/scout\\_pro.htm](http://www.ohaus.com.mx/scout_pro.htm). [Último acceso 22 febrero 2015].
27. Petrie. (2006). *Handbook of Adhesives and Sealants* : McGraw-Hill.
28. Polaski, Means, Stull, Warren, Allen, Mowrey and Carney, (2004). *Bonding Elastomers: A Review of Adhesives and Processes*. (9na ed.) United Kingdom: Rapra.
29. Puritronic (). *Tanques Agitadores/Mezcladores*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.puritronic.com.mx/tanques-agitadores-mezcladores.php>. [Último acceso 22 febrero 2015].
30. R.L. Hudson & Company (). *Elongation*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.rlhudson.com/O-Ring%20Book/selecting-physical5.html>. [Último acceso 10 marzo 2014].
31. Ramalingam, (1996) *Handbook of Engineering Terms*, .: New Age International Publishers
32. Rani, (2013). *Practical Guide to Latex Technology*. 1era ed. United Kingdom: Smithers Rapra Technology Ltd.
33. Real Academia Española (2015). *Diccionario de Lengua Española*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=adhesivo>. [Último acceso 17 de marzo de 2015].

34. Real Academia Española (2015). *Diccionario de Lengua Española*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=endotermica>. [Último acceso 17 de marzo de 2015].
35. Real Academia Española (2015). *Diccionario de Lengua Española*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=neumatico>. [Último acceso 17 de marzo de 2015].
36. Real Academia Española (2015). *Diccionario de Lengua Española*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://lema.rae.es/drae/?val=tolueno>. [Último acceso 17 de marzo de 2015].
37. Reid, Prausnitz y Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids*, 3era edición, apéndice A. Nueva York, McGraw-Hill, 1977.
38. Royal Botanic Gardens (). *Hevea brasiliensis (rubber tree)*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.kew.org/science-conservation/plants-fungi/hevea-brasiliensis-rubber-tree>. [Último acceso 3 febrero de 2015].
39. Rosal, (2003). *Certificación ISO-9002 de una planta de adhesivo de hule natural para la fabricación de neumáticos*. Tesis inédita: Universidad Rafael Landívar.
40. Secaira, (2004). *Programa de administración y conservación de la energía térmica en el proceso de producción de neumáticos*. Tesis inédita: Universidad Rafael Landívar.
41. Spectrum Chemical (2015). *Methyl Ethyl Ketone*. [EN LÍNEA] Disponible en: <https://www.spectrumchemical.com/chemicals/Methyl-Ethyl-Ketone>. [Último acceso 22 abril de 2015].
42. Técnica Industriale (<http://www.tecnicaindustriale.net/>). *Bomba de Desplazamiento Positivo*. [EN LÍNEA] Disponible en: [http://www.tecnicaindustriale.net/es/bomba\\_de\\_desplazamiento\\_positivo.htm](http://www.tecnicaindustriale.net/es/bomba_de_desplazamiento_positivo.htm). [Último acceso 22 febrero 2015].
43. Todo Ferretería y Construcción (2015). *Martillo, tipos*. [EN LÍNEA] Disponible en: <http://www.todoferreteria.com.mx/martillo-tipos-de>. [Último acceso 17 de marzo de 2015].

44. Wade.(2004) *Química Orgánica*. 5ta Edición. :Prentice-Hall.
45. Walpole, Myers, Myers, Ye, Levin, Rubin, Heizer, Render, (2009). *Probabilidad y Estadística*. 1era ed. México: Pearson Educación.

## IX. GLOSARIO

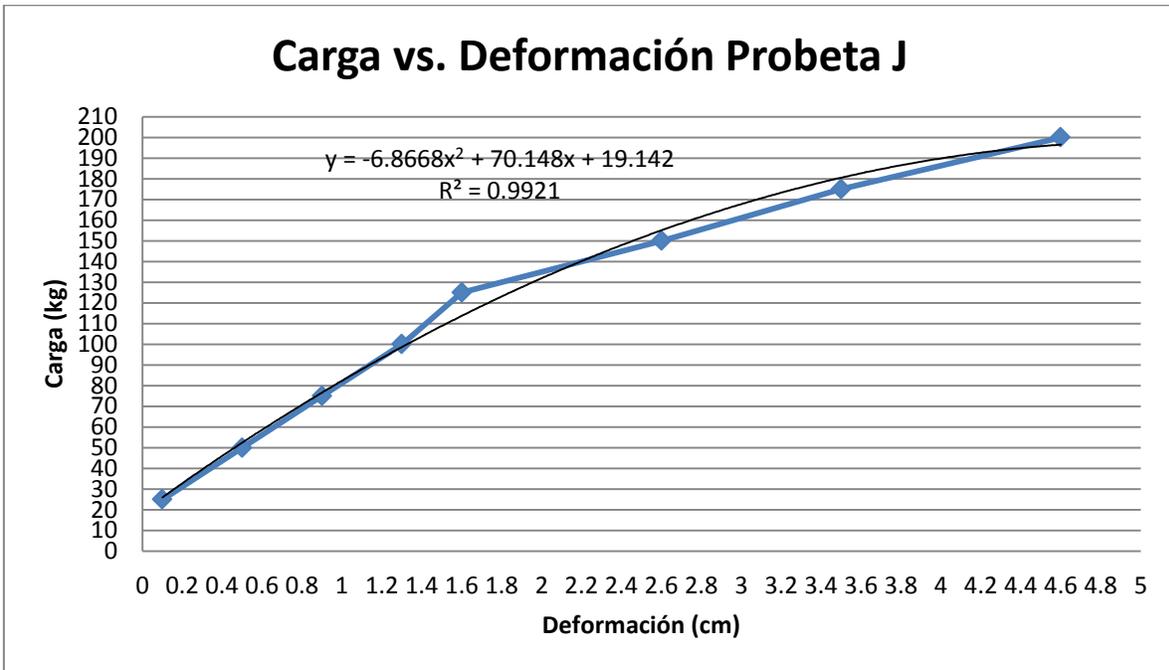
1. Adhesivo: sustancia que, interpuesta entre dos cuerpos o fragmentos, sirve para pegarlos.
2. ASME: La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos.
3. ASTM: La Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.
4. Cojín de reencauche: hule natural con forma de lámina delgada que posee dimensiones correspondientes a un espesor de 1/32 de pulgada (0.8 mm) y un ancho de 9 3/8 de pulgada.
5. Cross-linking: es un enlace químico que une una cadena carbonada a otra.
6. Elastómero: es un material que tiene la habilidad de resistir altas deformaciones elásticas y regresar a su estado natural de forma reversible
7. Endotérmico: dicho de un proceso: Que va acompañado de absorción de calor.
8. Enlace disulfuro: enlace covalente entre grupos tiol.
9. Tensión Cortante: es la tensión que media vez se encuentre fijado al plano actúa tangente al mismo.
10. Espesor de Película de Adhesivo: es el espesor de la capa de adhesivo empleada para la unión de los sustratos.
11. Hexano: Hidrocarburo alifático saturado con una estructura carbonada de seis carbonos.
12. Isopreno: unidad monomérica del polímero de caucho natural.
13. Neumático: pieza de caucho con cámara de aire o sin ella, que se monta sobre la llanta de una rueda.
14. Plasticidad: describe la deformación irreversible que sufre un material en respuesta de una fuerza aplicada. La deformación irreversible se da posteriormente a sobrepasar el límite elástico
15. Tacking: es la propiedad de un adhesivo de adherirse a otra superficie con el mínimo de contacto.
16. Tolueno: Hidrocarburo aromático derivado del benceno, que se emplea como disolvente en la industria química

17. Sección de junta: sección donde convergen ambos sustratos y el adhesivo, fijando una sección de unión.
18. Stitcher: herramienta para reparación de llantas que posee incorporada una cabeza metálica giratoria que permite fijar de mejor manera los sustratos.
19. Vulcanizar: combinar azufre con goma elástica para que esta conserve su elasticidad en frío y en caliente.

## X. ANEXOS

### ANEXO 1

Gráfica 2. Prueba J: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 2.5 Horas de Vulcanización.



Prueba J	<b>FALLO UNIÓN</b>	
<b>TIEMPO: 2.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS</b>	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta J (cm <sup>2</sup> )
25	0.1	48.78
50	0.5	
75	0.9	
100	1.3	
125	1.6	
150	2.6	
175	3.5	
200	4.6	
220	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

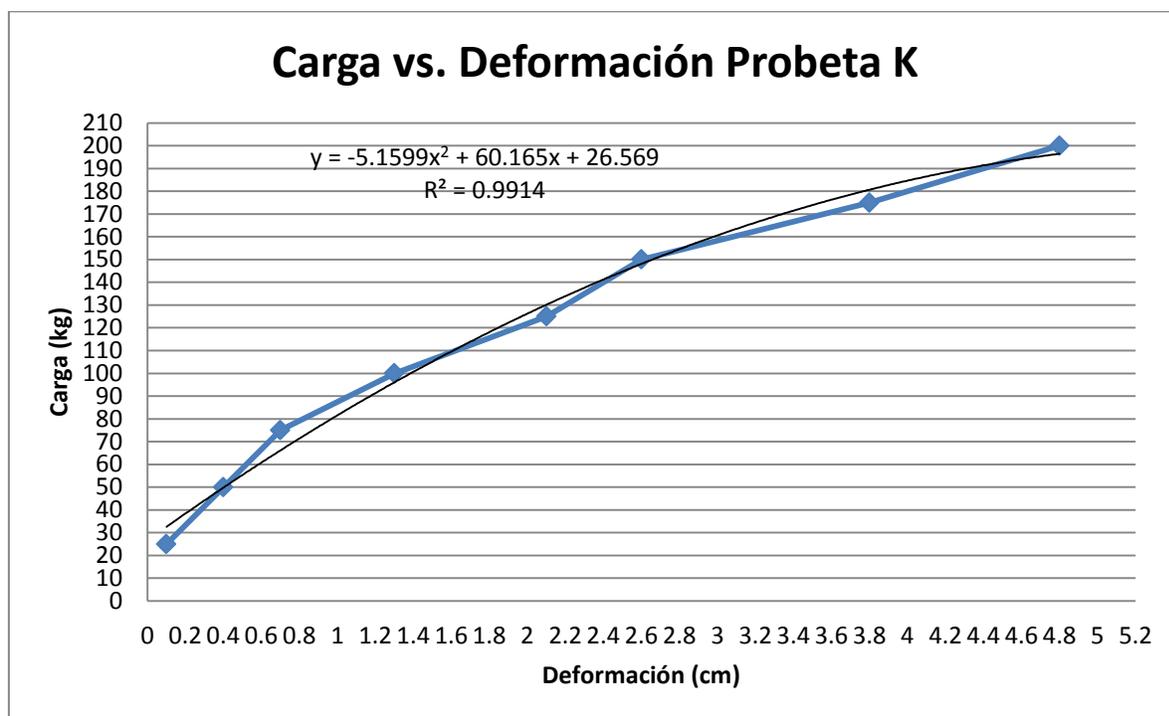
Esfuerzo: 4.51 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 4.6 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04100 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 2

Gráfica 3. Prueba K: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 2.5 Horas de Vulcanización



Prueba K	<b>FALLO UNIÓN</b>	
<b>TIEMPO: 2.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS</b>	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta K (cm <sup>2</sup> )
25	0.1	48.49
50	0.4	
75	0.7	
100	1.3	
125	2.1	
150	2.6	
175	3.8	
200	4.8	
305	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

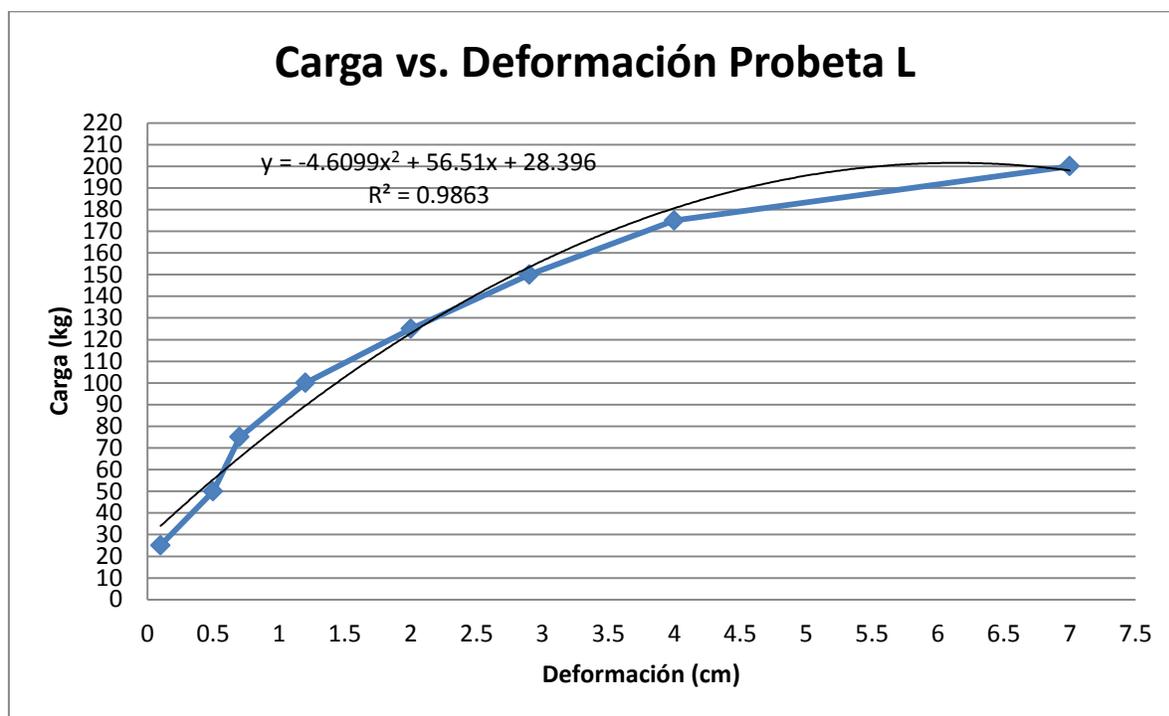
Esfuerzo: 6.29 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 4.8 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04125 g/cm<sup>2</sup>

### ANEXO 3

Gráfica 4. Prueba L: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 2.5 Horas de Vulcanización.



Prueba L		FALLO UNIÓN	
TIEMPO: 2.5 HORAS		GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta L (cm <sup>2</sup> )	
25	0.1	48.70	
50	0.5		
75	0.7		
100	1.2		
125	2		
150	2.9		
175	4		
200	7		
200	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

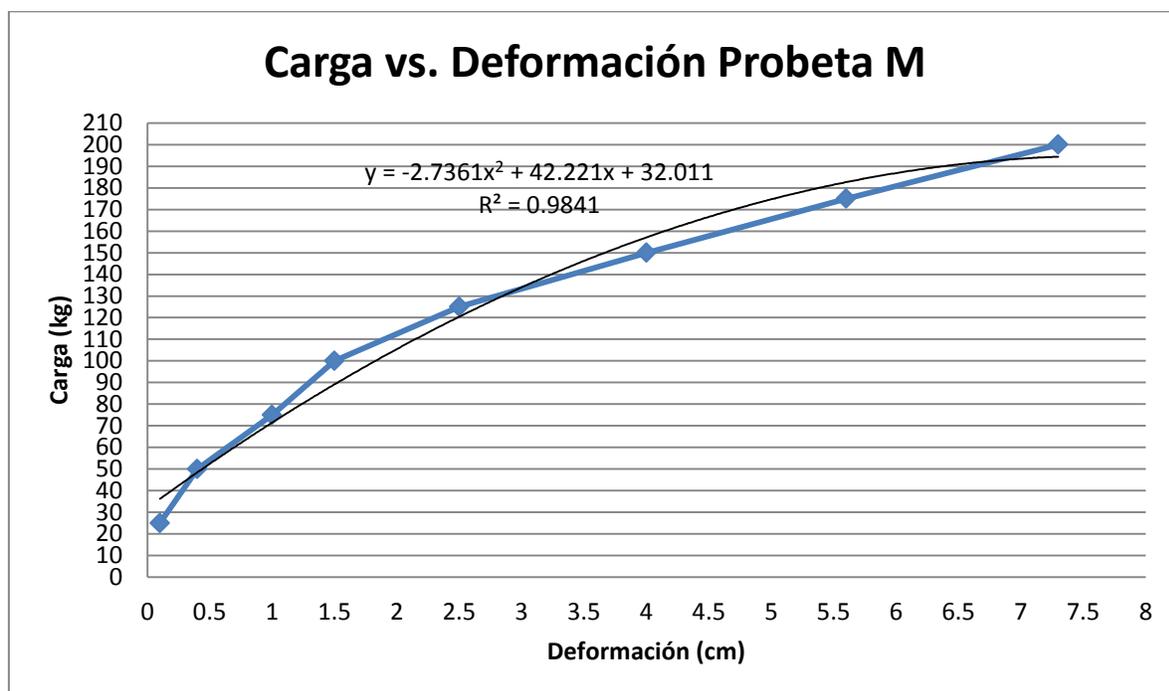
Esfuerzo: 4.11 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 7.0 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04106 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 4

Gráfica 5 Prueba M: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 2.5 Horas de Vulcanización



Prueba M

**FALLO UNIÓN**

**TIEMPO: 2.5 HORAS**

**GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS**

Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta M (cm <sup>2</sup> )
25	0.1	47.32
50	0.4	
75	1	
100	1.5	
125	2.5	
150	4	
175	5.6	
200	7.3	
225	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

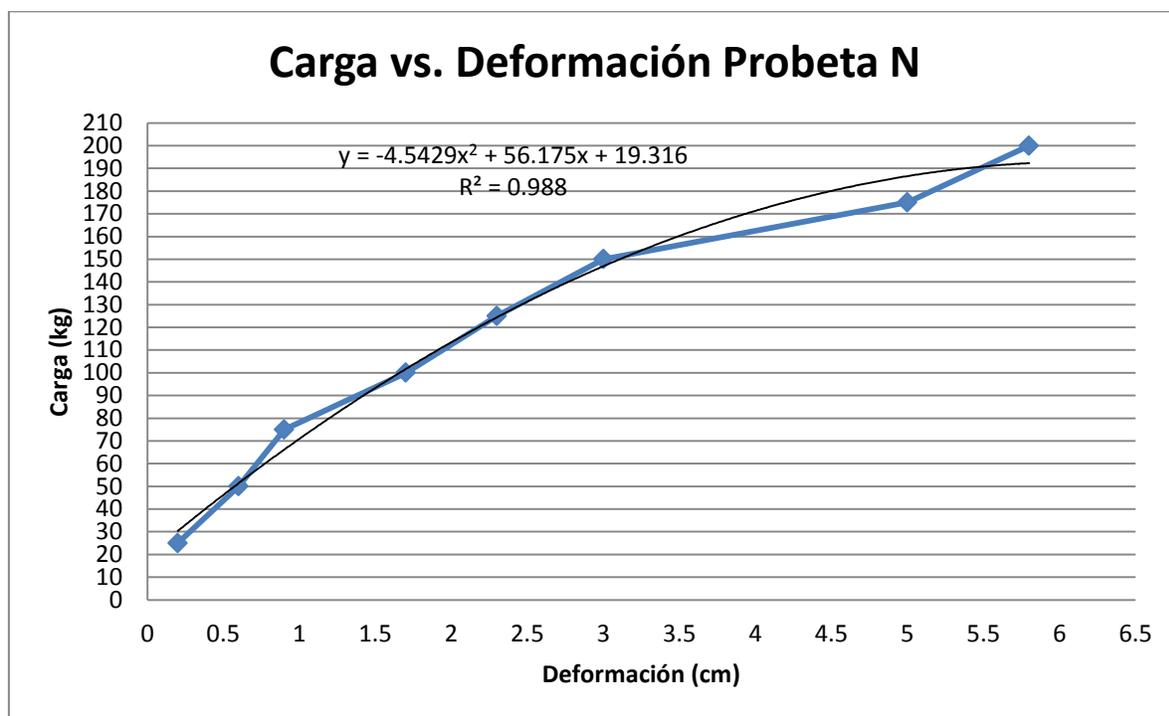
Esfuerzo: 4.76 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 7.3 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.06340 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 5

Gráfica 6. Prueba N: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 2.5 Horas de Vulcanización.



Prueba N	<b>FALLO UNIÓN</b>	
<b>TIEMPO: 2.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS</b>	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta N (cm <sup>2</sup> )
25	0.2	45.86
50	0.6	
75	0.9	
100	1.7	
125	2.3	
150	3	
175	5	
200	5.8	
225	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

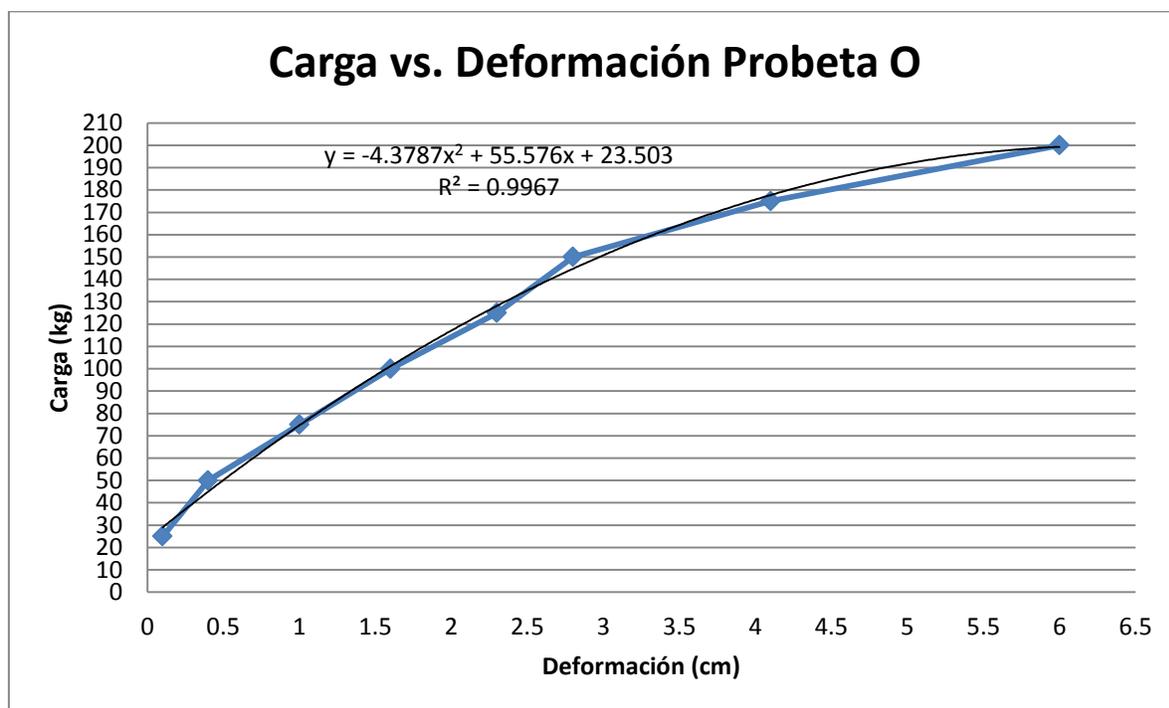
Esfuerzo: 4.91 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 5.8 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.06541 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 6

Gráfica 7. Prueba O: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 2.5 Horas de Vulcanización



Prueba O	<b>FALLO UNIÓN</b>	
<b>TIEMPO: 2.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS</b>	
Carga (kg)	Def.(cm)	Área Probeta O (cm <sup>2</sup> )
25	0.1	47.49
50	0.4	
75	1	
100	1.6	
125	2.3	
150	2.8	
175	4.1	
200	6	
210	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

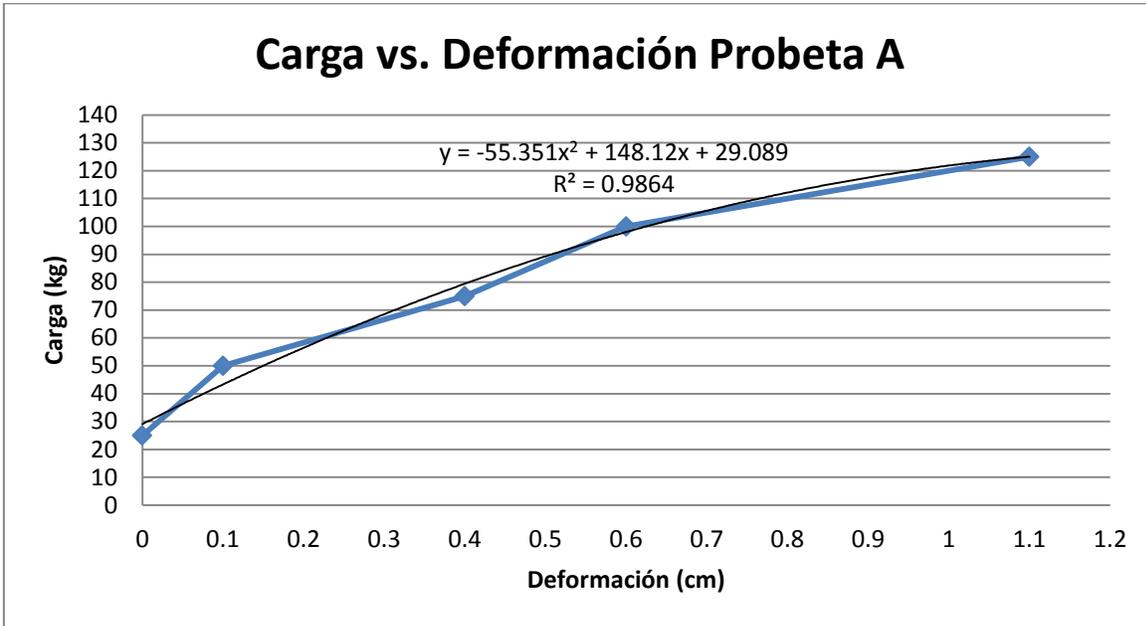
Esfuerzo: 4.42 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 6.0 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.06317 g/cm<sup>2</sup>

**ANEXO 7**

Gráfica 8. Prueba A: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 3.5 Horas de Vulcanización.



Prueba A	<b>FALLO UNIÓN</b>	
<b>TIEMPO: 3.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS</b>	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta A (cm <sup>2</sup> )
25	0	46.80
50	0.1	
75	0.4	
100	0.6	
125	1.1	
275	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

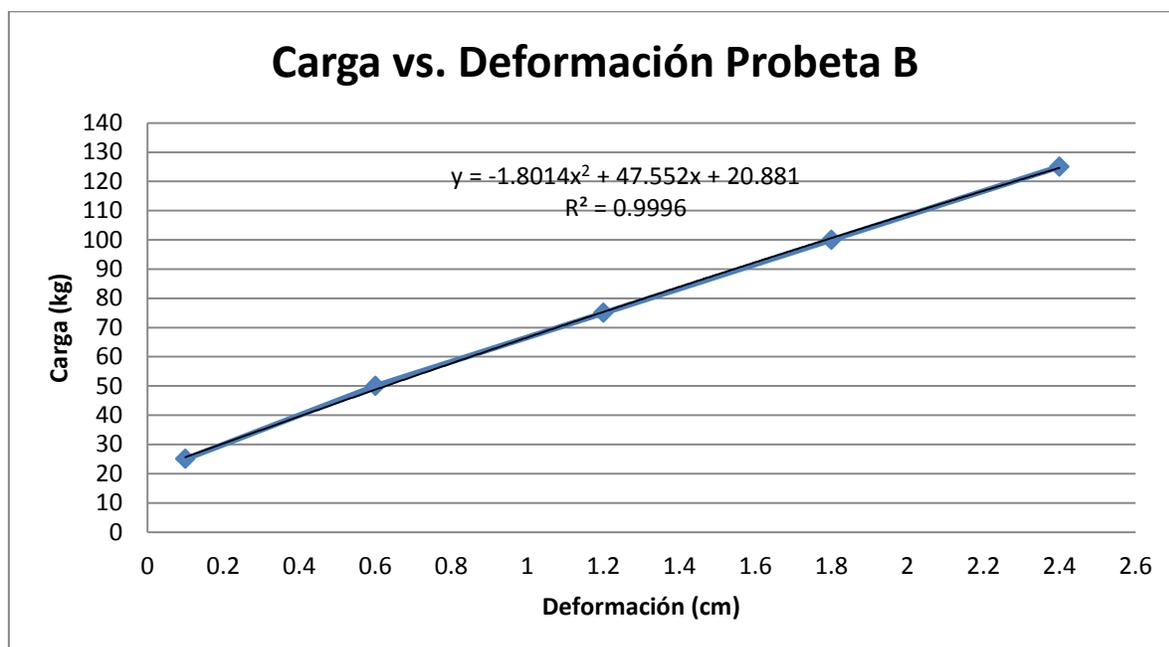
Esfuerzo: 5.88 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 1.1 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04274 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 8

Gráfica 9. Prueba B: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos, 3.5 Horas de Vulcanización.



Prueba B

**FALLO UNIÓN**

TIEMPO: 3.5 HORAS		GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta B (cm <sup>2</sup> )	
25	0.1	44.76	
50	0.6		
75	1.2		
100	1.8		
125	2.4		
215	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

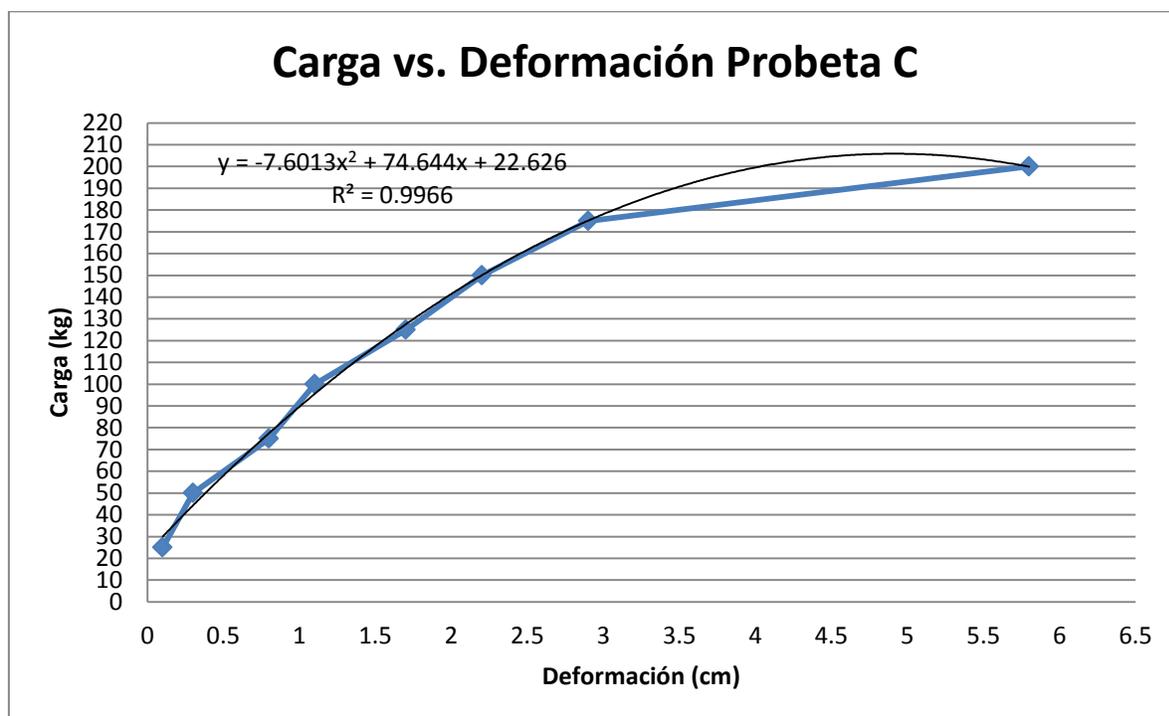
Esfuerzo: 4.80 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 2.4 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04469 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 9

Gráfica 10 Prueba C: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 3.5 Horas de Vulcanización



Prueba C		FALLO MATERIAL BASE	
TIEMPO: 3.5 HORAS		GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS	
Carga (kg)	Def.(cm)	Área Probeta C (cm <sup>2</sup> )	
25	0.1	44.68	
50	0.3		
75	0.8		
100	1.1		
125	1.7		
150	2.2		
175	2.9		
200	5.8		
200	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

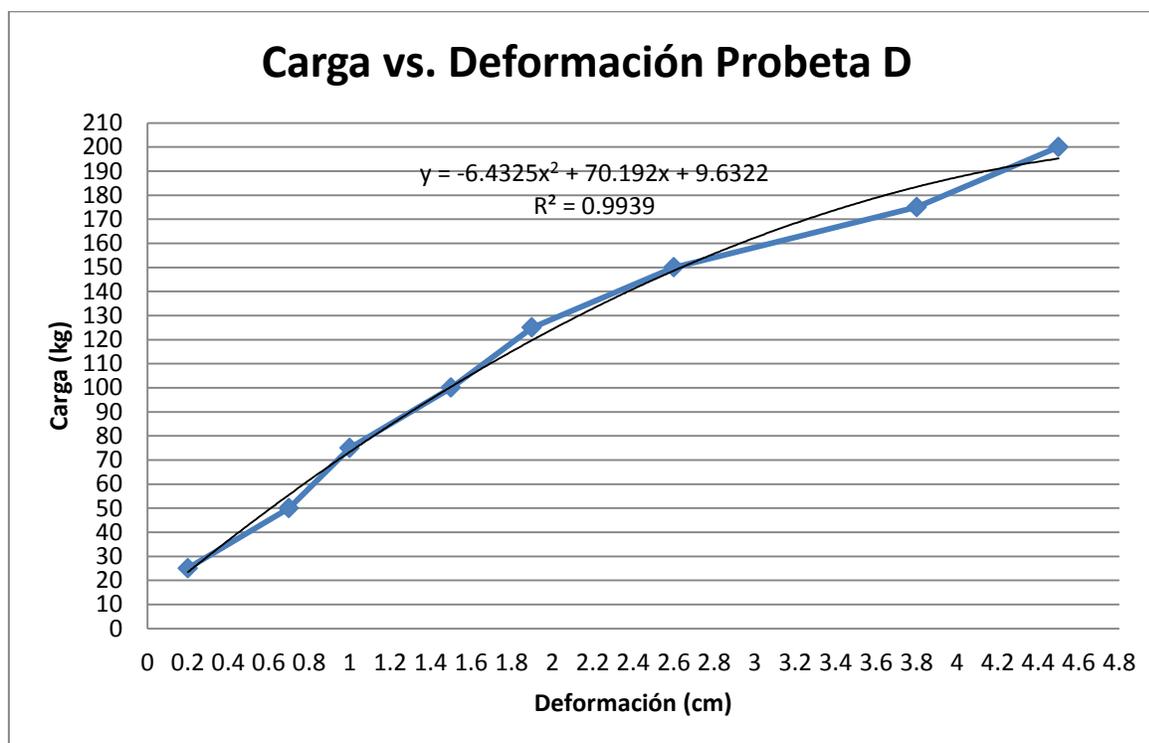
Esfuerzo: 4.48 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 5.8 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04477 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 10

Gráfica 11 Prueba D: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 3.5 Horas de Vulcanización



Prueba D	<b>FALLO UNIÓN</b>	
<b>TIEMPO: 3.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS</b>	
Carga (kg)	Def.(cm)	Área Probeta D (cm <sup>2</sup> )
25	0.2	48.19
50	0.7	
75	1	
100	1.5	
125	1.9	
150	2.6	
175	3.8	
200	4.5	
260	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

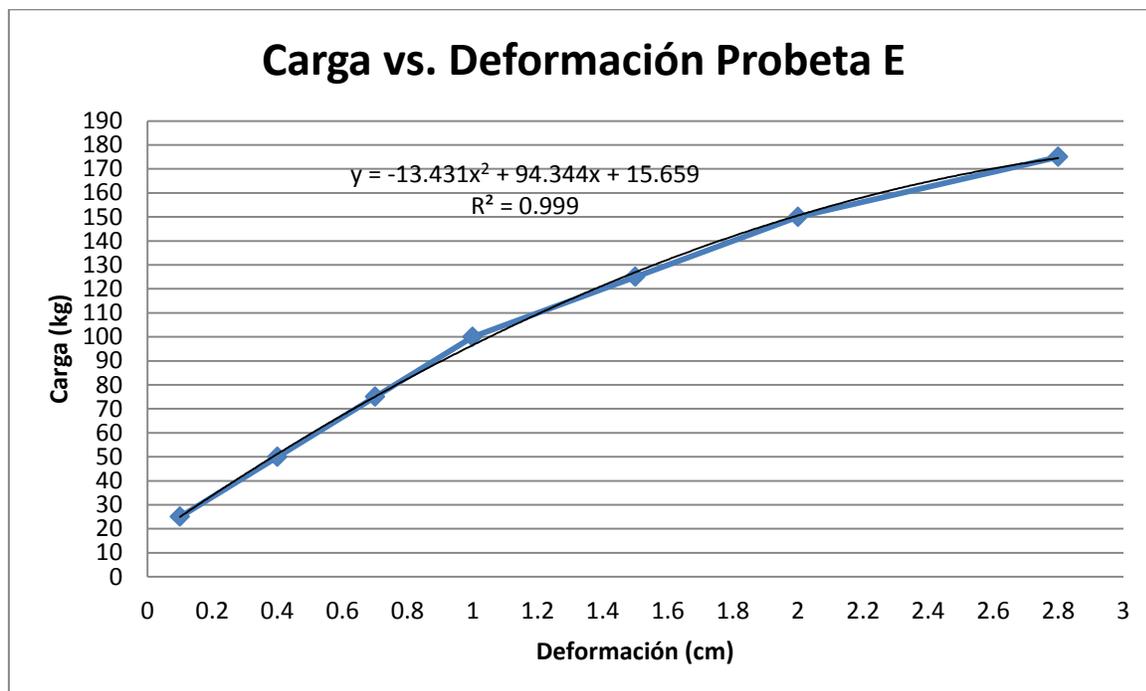
Esfuerzo: 5.39 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 4.5 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.06225 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 11

Gráfica 12 Prueba E: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 3.5 Horas de Vulcanización



Prueba E		FALLO MATERIAL BASE Y UNIÓN	
TIEMPO: 3.5 HORAS		GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS	
Carga (kg)	Def.(cm)	Área Probeta E (cm <sup>2</sup> )	
25	0.1	47.56	
50	0.4		
75	0.7		
100	1		
125	1.5		
150	2		
175	2.8		
290	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

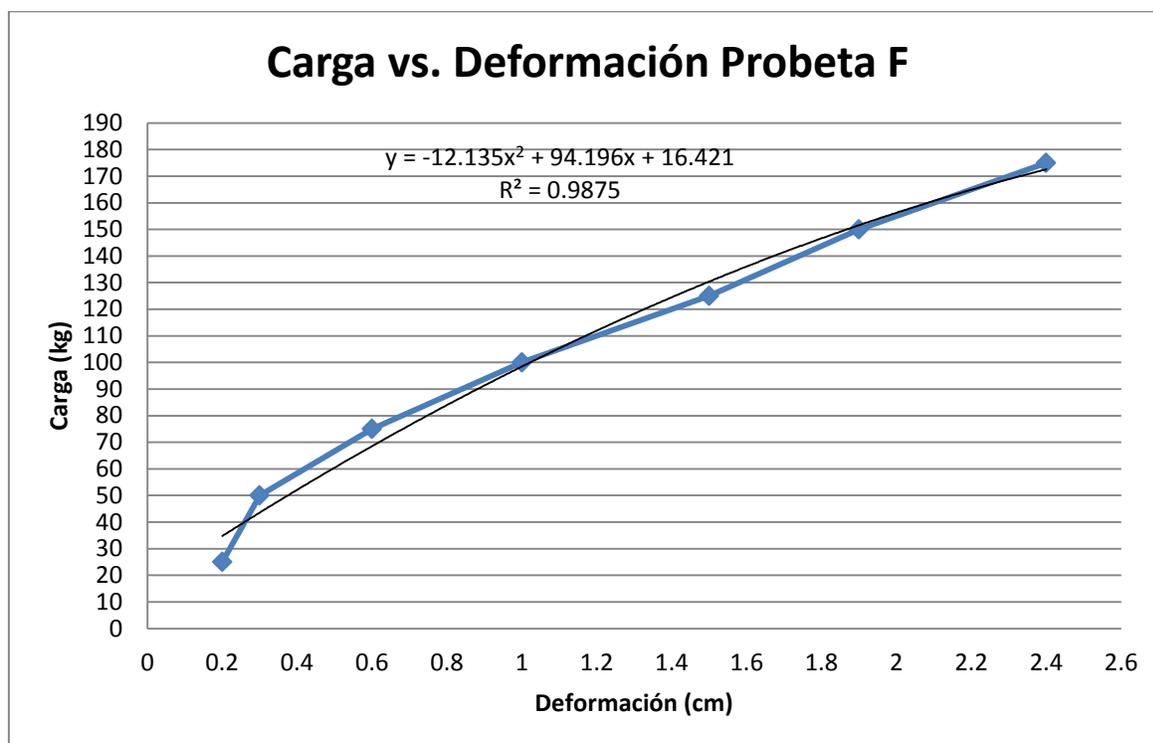
Esfuerzo: 6.10 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 2.8 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.06307 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 12

Gráfica 13 Prueba F: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 3.5 Horas de Vulcanización



Prueba F	<b>FALLO UNIÓN</b>	
<b>TIEMPO: 3.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS</b>	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta F (cm <sup>2</sup> )
25	0.2	46.74
50	0.3	
75	0.6	
100	1.0	
125	1.5	
150	1.9	
175	2.4	
265	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

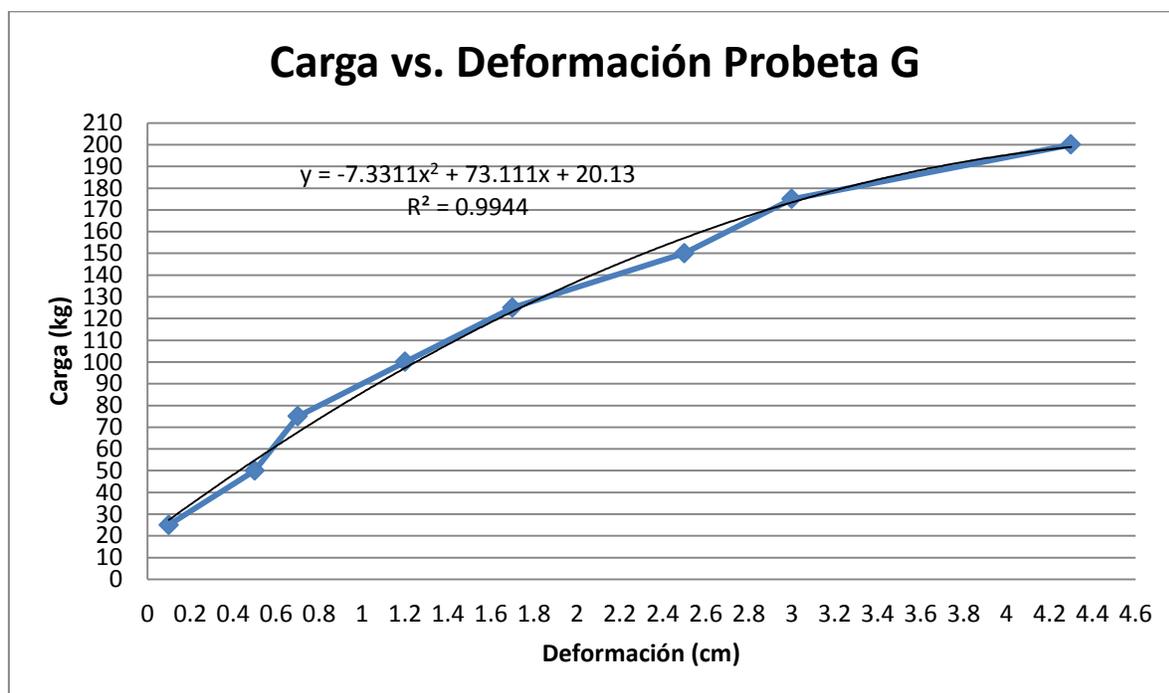
Esfuerzo: 5.67 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 2.4 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.06419 g/cm<sup>2</sup>

### ANEXO 13

Gráfica 14 Prueba G: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 4.5 Horas de Vulcanización



Prueba G

**FALLO MATERIAL**

TIEMPO: 4.5 HORAS		GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta G (cm <sup>2</sup> )	
25	0.1	47.94	
50	0.2		
75	0.6		
100	1.3		
125	1.9		
150	2.5		
175	3.4		
200	4.5		
255	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

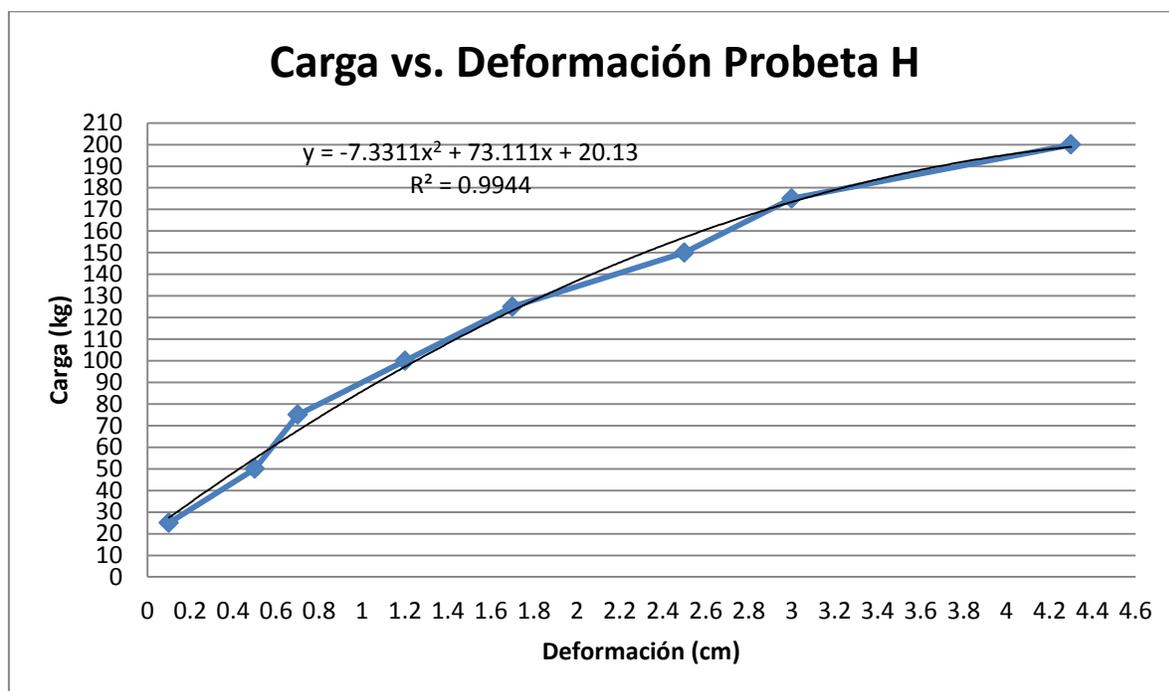
Esfuerzo: 5.32 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 4.5 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04172 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 14

Gráfica 15 Prueba H: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 4.5 Horas de Vulcanización.



Prueba H

**FALLO MATERIAL**

TIEMPO: 4.5 HORAS		GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta H (cm <sup>2</sup> )	
25	0.1	48.75	
50	0.5		
75	0.7		
100	1.2		
125	1.7		
150	2.5		
175	3		
200	4.3		
326	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

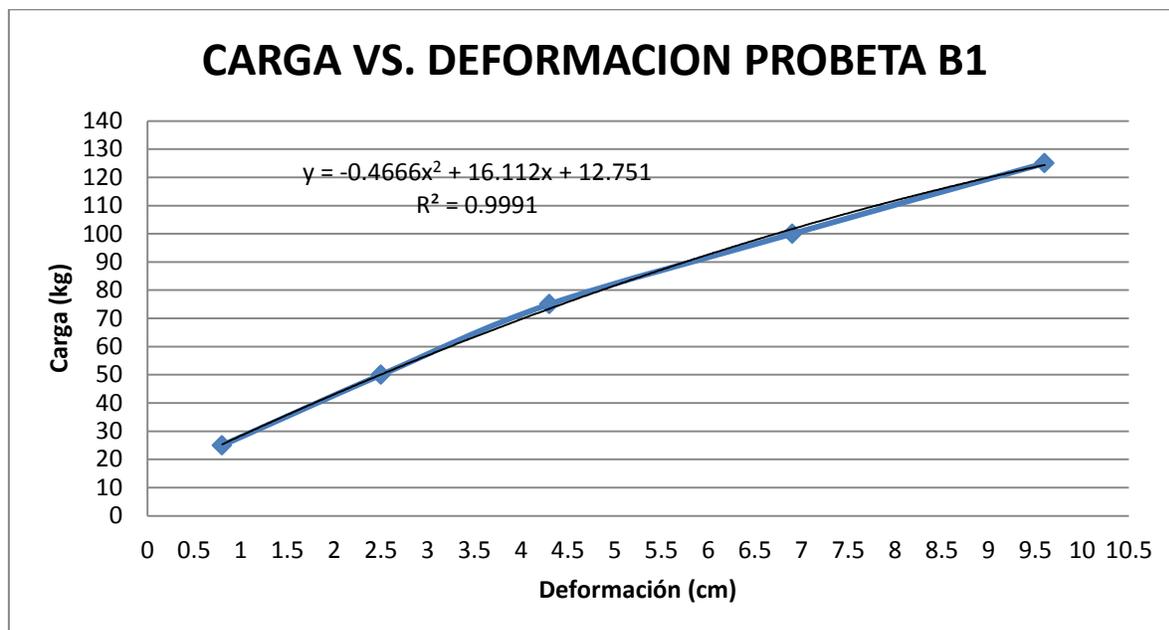
Esfuerzo: 6.69 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 4.3 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.04103 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 15

Gráfica 16 Prueba B1: Tratamiento correspondiente a 2 Gramos y 4.5 Horas de Vulcanización.



Prueba B1 (ENSAYOS PRELIMINARES)		FALLO EN UNIÓN	
TIEMPO: 4.5 HORAS		GRAMOS DE ADHESIVO: 2 GRAMOS	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta B1 (cm <sup>2</sup> )	
25	0.8	34.26	
50	2.5		
75	4.3		
100	6.9		
125	9.6		
145	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

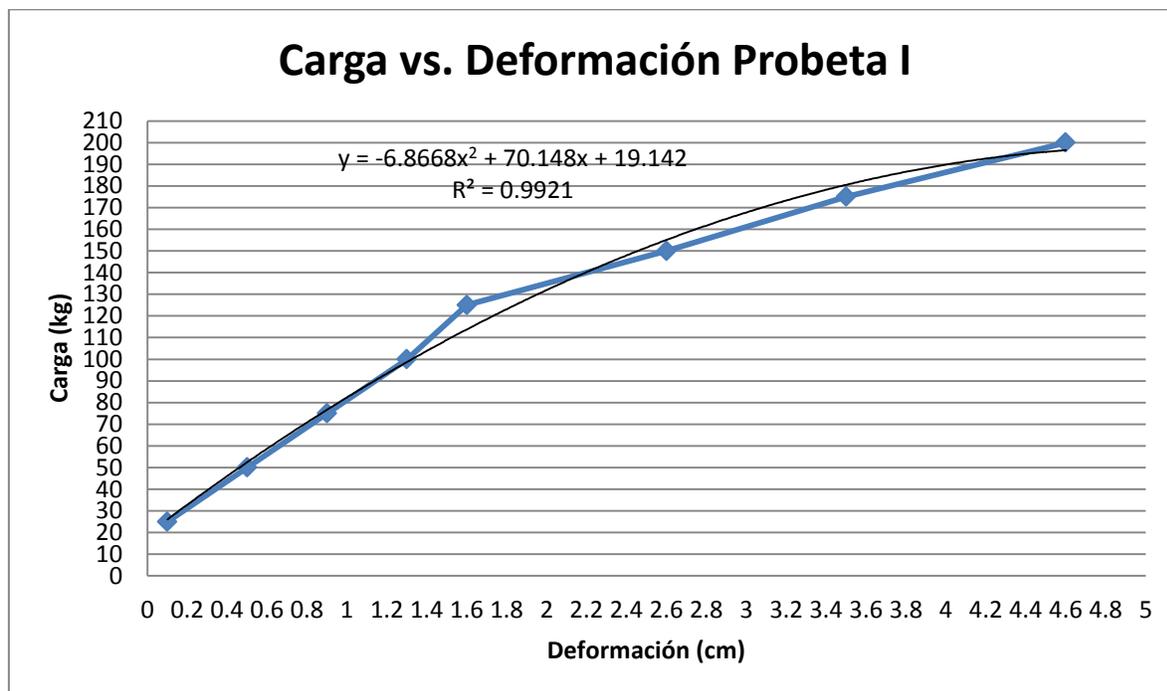
Esfuerzo: 4.23 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 9.6 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.05838 g/cm<sup>2</sup>

**ANEXO 16**

Gráfica 17. Prueba I: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 4.5 Horas de Vulcanización



Prueba I	<b>FALLO UNIÓN</b>		
<b>TIEMPO: 4.5 HORAS</b>	<b>GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS</b>		
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta I (cm <sup>2</sup> )	
25	0.1	51.959	
50	0.5		
75	0.9		
100	1.3		
125	1.6		
150	2.6		
175	3.5		
200	4.6		
220	MAX		

Fuente: Elaboración propia (2014)

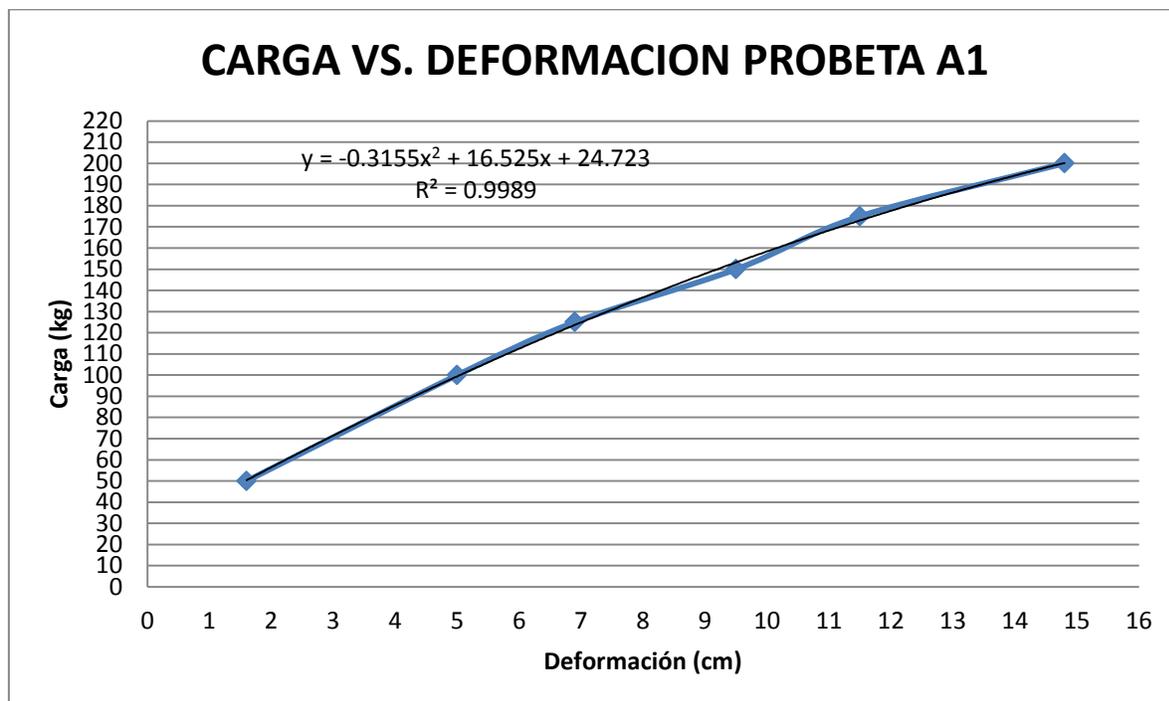
Esfuerzo: 4.23 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 4.6 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.05774 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 17

Gráfica 18. Prueba A1: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 4.5 Horas de Vulcanización.



Prueba A1 (ENSAYOS PRELIMINARES)		FALLO EN UNIÓN
TIEMPO: 4.5 HORAS	GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta A1 (cm <sup>2</sup> )
50	1.6	34.53
100	5	
125	6.9	
150	9.5	
175	11.5	
200	14.8	
200	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

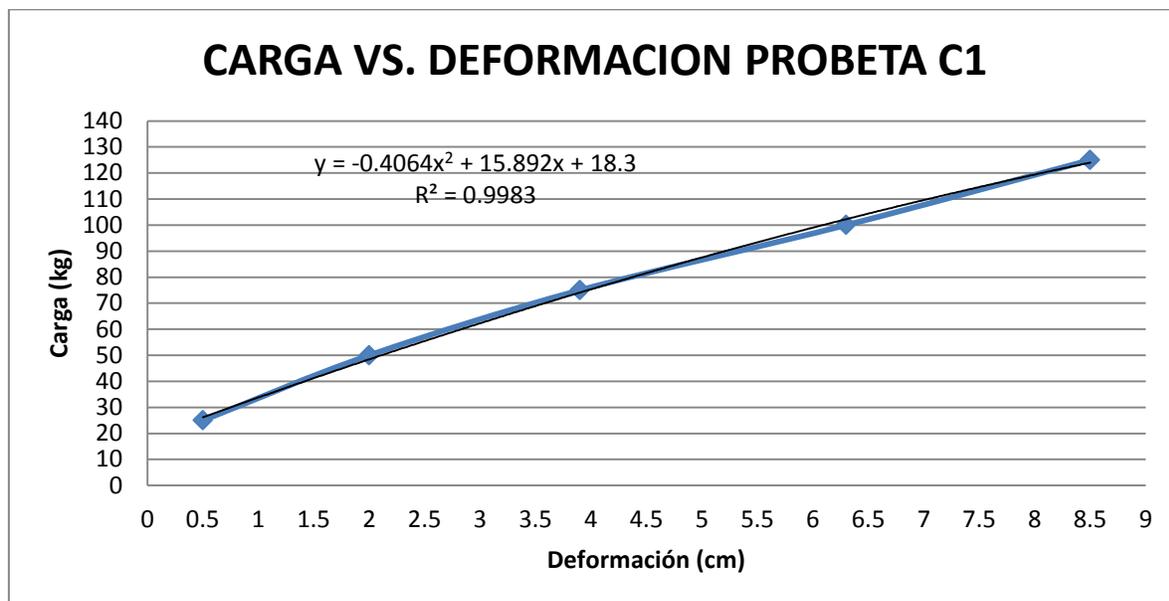
Esfuerzo: 5.79 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 14.8 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.08688 g/cm<sup>2</sup>

## ANEXO 18

Gráfica 19 Prueba C1: Tratamiento correspondiente a 3 Gramos y 4.5 Horas de Vulcanización



Prueba C1 (ENSAYOS PRELIMINARES)		<b>FALLO EN UNIÓN</b>
TIEMPO: 4.5 HORAS	GRAMOS DE ADHESIVO: 3 GRAMOS	
Carga (kg)	Def. (cm)	Área Probeta C1 (cm <sup>2</sup> )
25	0.5	32.70
50	2	
75	3.9	
100	6.3	
125	8.5	
140	MAX	

Fuente: Elaboración propia (2014)

Esfuerzo: 4.28 kg/cm<sup>2</sup>

Elongación Máxima: 8.5 cm

Gramos/Cm<sup>2</sup>: 0.09174 g/cm<sup>2</sup>

### ANEXO 19

Gráfica 20. Porcentaje de fallas en secciones según cantidad de gramos de adhesivo.



Fuente: Elaboración propia (2014)

El 75% de las fallas se vieron en las probetas con 2 gramos de adhesivo y el 25 % de las fallas se vieron en probetas con 3 gramos de adhesivo.

### ANEXO 20

Gráfica 21. Porcentaje de fallas en secciones según cantidad de horas de vulcanización

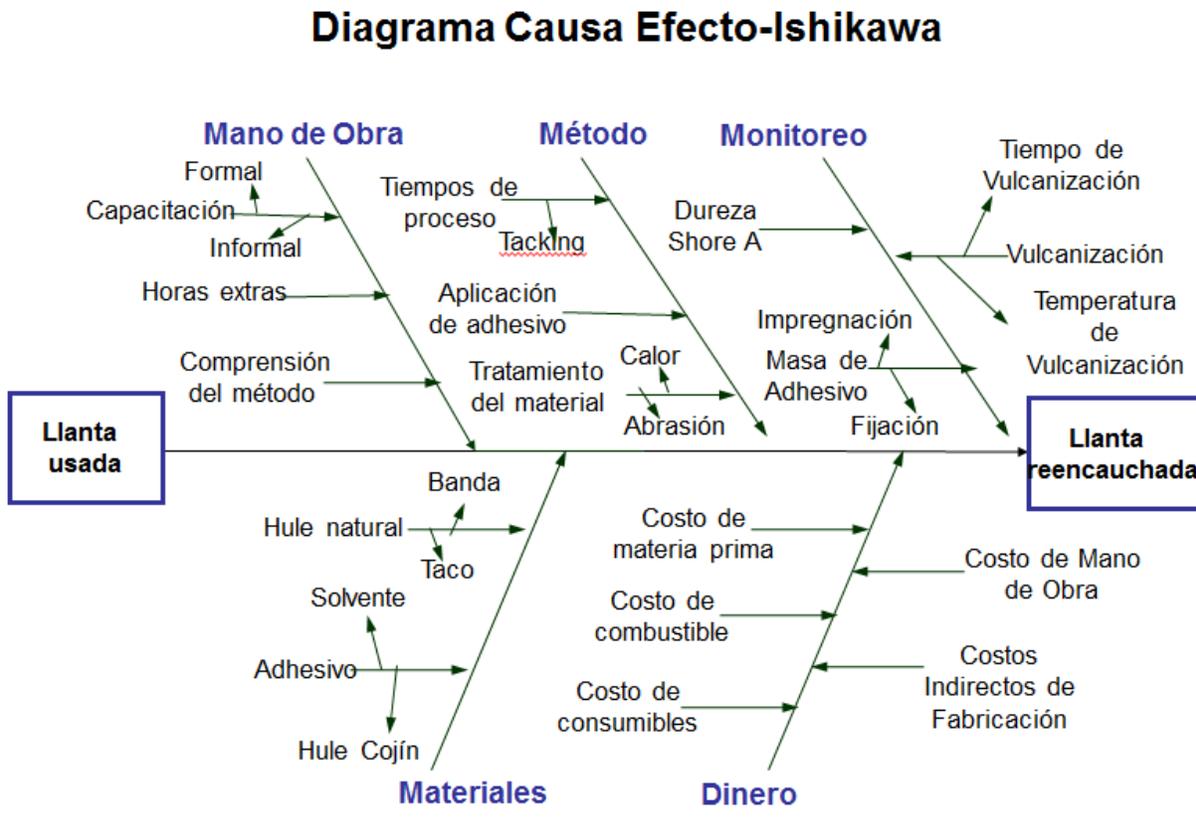


Fuente: Elaboración propia (2014)

El 50% de las fallas se vieron en probetas con tiempo de vulcanización correspondientes a 4.5 horas mientras que el otro 50% de las fallas se vieron en probetas con tiempos de vulcanización correspondientes a 3.5 horas.

## ANEXO 21

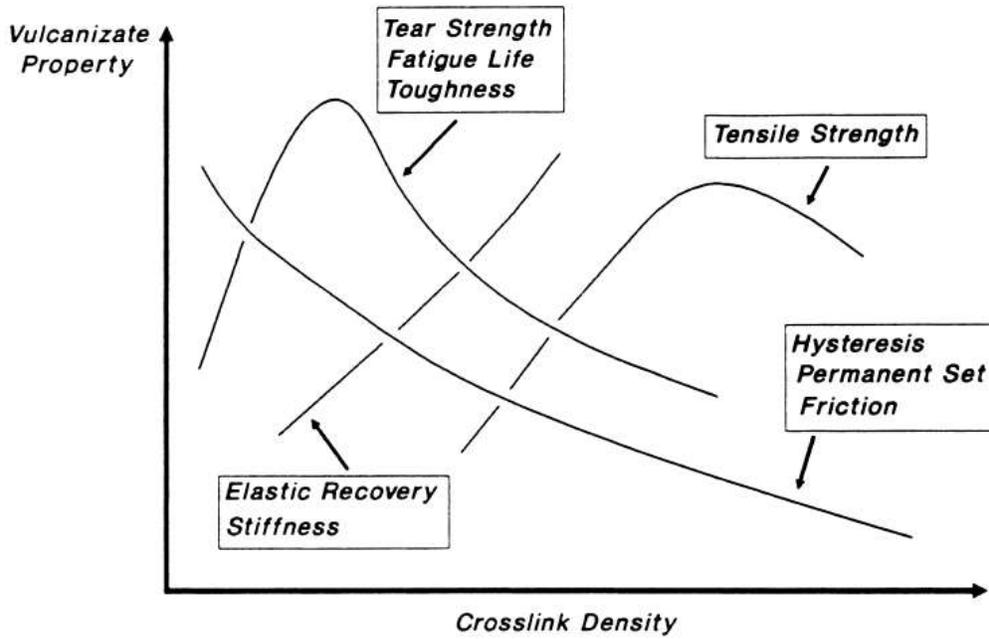
### Diagrama Causa-Efecto Ishikawa



Fuente: Elaboración propia (2014)

**ANEXO 22**

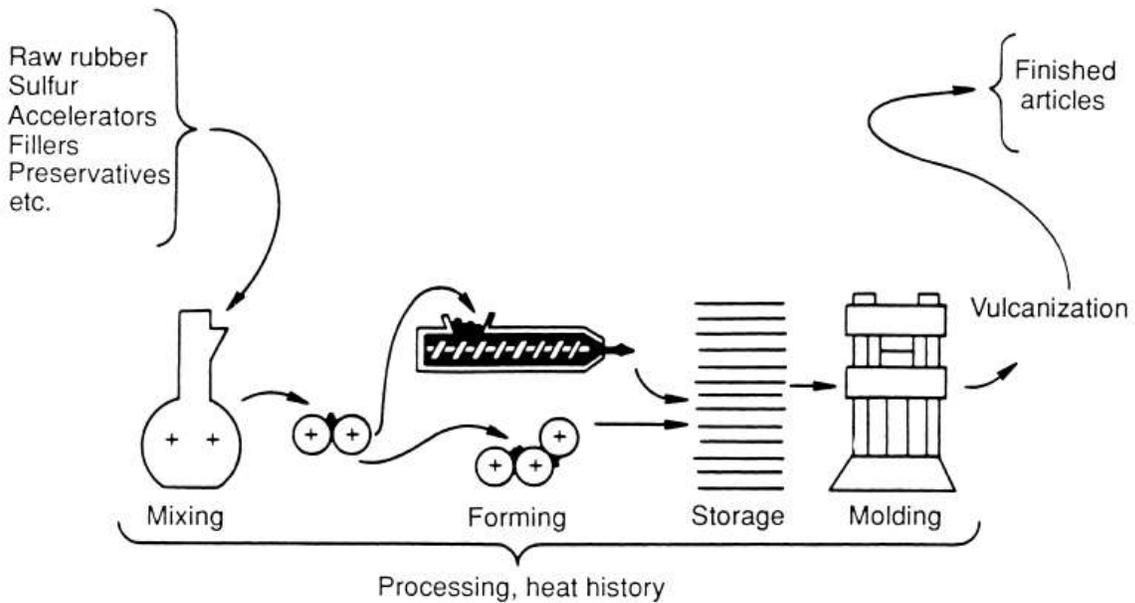
Grafica 22 Propiedades del vulcanizado vrs. Densidad de Cross-link



(Mark, James. E. 2005).

**ANEXO 23**

Figura 55 Proceso de extrusión del hule



(Mark, James. E. 2005)

# ANEXO 24

## Hoja Técnica Rubber Solvent

**BRENTAG** BRENTAG GUATEMALA, S.A.

### CERTIFICADO DE CALIDAD

**MEZCLA:** RUBBER 2  
**LOTE:** 46  
**PRODUCCIÓN:** 06-mar-14  
**VENCIMIENTO:** 05-mar-16

#### COMPOSICION DEL PRODUCTO

Solvente	Contenido
Acetona	-
Hexano	90%
MIBK	-
Tolueno	10%

#### ANÁLISIS DEL PRODUCTO

CARACTERÍSTICA	RESULTADO	LÍMITES
Densidad @ 25/25 (en g/mL)	0.7225	reportado
Índice de refracción @ 25/25	1.4043	reportado
Transparencia	ok	transparente
Partículas	ok	sin partículas
Fases	ok	sin fases



\_\_\_\_\_  
Responsable de Analisis

## ANEXO 25

Tabla 11 Propiedades de Polímeros

TABLE III Properties of Typical TPEs Relative to Other Rubbery Polymers

Material	Relative cost	Tensile strength at break (MPa)	Tensile strain at break (%)	Service temperature (°C)	Hardness (Shore A)
Styrene-butadiene rubber	1	15 (reinforced)	500 (reinforced)	high	35-100
Natural rubber	1	30 (reinforced)	500 (reinforced)	high	30-100
Silicone	1.2	5 (reinforced)	150	high	40-100
Polyethylene	1	10	high	-10-50	100
Fluorinated elastomer	1.5	10	200	high	50-90
SBS	2	25	800	-20-80	50-90
Polypropylene-EPM blend	1.5	20	500	0-110	70
Polyurethane	6	50	600	-20-80	50-100
Copolyester	7	40	600	-40-150	>100
Ionomer	5	15	500	-20-100	50-90

(Mark, James. E. 2005).

## ANEXO 26

### Análisis de Varianza Esfuerzo

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
2.5 hrs y 2 grs	3	14.90697909	4.968993029	1.350002113		
2.5 hrs y 3 grs	3	14.08301377	4.694337924	0.061360965		
3.5 hrs y 2 grs	3	15.15694767	5.05231589	0.536264098		
3.5 hrs y 3 grs	3	17.16180644	5.720602148	0.125252197		
4.5 hrs y 2 grs	3	16.23850656	5.412835521	1.512143626		
4.5 hrs y 3 grs	3	14.30785648	4.769285493	0.78592557		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2.328981757	5	0.465796351	0.639398535	0.674372061	3.105875239
Dentro de los grupos	8.741897136	12	0.728491428			
Total	11.07087889	17				
				P<=0,05		
NO HAY INFORMACIÓN SUFICIENTE PARA INDICAR QUE LOS TRATAMIENTOS SON DIFERENTES						

Fuente: Elaboración propia (2014)

## ANEXO 27

### Análisis de Varianza Carga

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
2.5 hrs y 2 grs	3	725	241.6666667	3108.333333		
2.5 hrs y 3 grs	3	660	220	75		
3.5 hrs y 2 grs	3	690	230	1575		
3.5 hrs y 3 grs	3	815	271.6666667	258.3333333		
4.5 hrs y 2 grs	3	726	242	8317		
4.5 hrs y 3 grs	3	560	186.6666667	1733.333333		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	11910	5	2382	0.948563085	0.4851375	3.105875239
Dentro de los grupos	30134	12	2511.166667			
Total	42044	17				
NO HAY INFORMACIÓN SUFICIENTE PARA INDICAR QUE LOS TRATAMIENTOS SON DIFERENTES						

Fuente: Elaboración propia (2014)

## ANEXO 28

### Análisis de Varianza Elongación

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
2.5 hrs y 2 grs	3	16.4	5.466666667	1.77333333		
2.5 hrs y 3 grs	3	19.1	6.366666667	0.66333333		
3.5 hrs y 2 grs	3	9.3	3.1	5.89		
3.5 hrs y 3 grs	3	9.7	3.233333333	1.24333333		
4.5 hrs y 2 grs	3	18.4	6.133333333	9.02333333		
4.5 hrs y 3 grs	3	27.9	9.3	26.49		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	79.29333333	5	15.85866667	2.11058041	0.134195569	3.105875239
Dentro de los grupos	90.16666667	12	7.513888889			
Total	169.46	17				
NO HAY INFORMACIÓN SUFICIENTE PARA INDICAR QUE LOS TRATAMIENTOS SON DIFERENTES						

Fuente: Elaboración propia (2014)

## ANEXO 29

### Fotos de Experimentación



Figura 56. Corte transversal en la sección de la rodadura.



Figura. 57. Sección de llanta usada cortada.



Figura. 58. Delimitación de probeta de llanta usada.

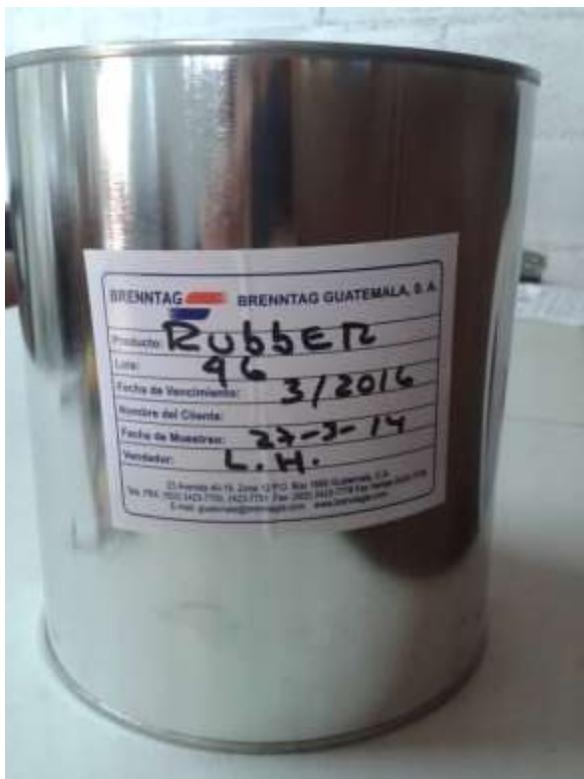


Figura. 59. Solvente Rubber 2 (90:10; Hexano: Tolueno)



Figura. 61. Disolución del hule natural en el solvente.



Figura. 61. Disolución del hule natural en el solvente.



Figura. 62. Delimitación de la probeta de hule natural.



Figura. 63. Estación de trabajo.



Figura. 64. Adición de adhesivo a probetas.



Figura. 65. Unión de probetas



Figura. 66. Utilización de martillo y stitcher para mejor la unión.



Figura. 67. Ensayo físico-mecánico de las probetas de hule.



Figura. 68. Resultado de ensayo físico-mecánico de las probetas de hule.