

**DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE  
MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ETILENO-  
PROPILENO-DIENO (EPDM)**

**WILLIAM RICARDO SÁNCHEZ FONSECA**

**FÉLIX GONZALO SIERRA LÓPEZ**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**FLORIDABLANCA**

**2014**

**DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE  
MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ETILENO-  
PROPILENO-DIENO (EPDM)**

**WILLIAM RICARDO SÁNCHEZ FONSECA**

**FÉLIX GONZALO SIERRA LÓPEZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de**

**INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR**

**ALFONSO SANTOS JAIMES**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**FLORIDABLANCA**

**2014**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bucaramanga, Enero 17 de 2014**

## DEDICATORIA

Gracias infinitas a Papá Dios, que es el intermediario y guía para cumplir mis metas.

A Martha Yanett López Berbesí, quien me ha indicado el mejor camino para seguir, con sus consejos y regaños, pero con todo el amor.

A Zulay Yamile López Berbesí a quien amo con todo mi corazón y quien ha estado a mi lado en todo momento, brindándome su amor, cariño y consejos.

A Félix Antonio López Arias, quien ha sido un amigo y compañero en este proceso.

A Gladys Marina Berbesí, quien siempre me ha brindado un apoyo único y son un ejemplo intachable de vida; a mi familia, por su total respaldo en cada etapa de mi vida.

Al ingeniero Félix Fabián López Berbesí, quien ha sido un ejemplo a seguir.

A Andry Ardila Bautista, quien ha sido un apoyo incondicional y siempre ha estado a mi lado en cada situación que se ha presentado.

A Martha Isabel López Parra, quien fue mi ángel de la guarda y mi consejera en la Universidad.

A Gonzalo Gómez Cote, Fredy Bayona, Jairo Martinez, Marlon Mendoza, Jhonatan Hurtado, Hugo Zárate, Camilo Gutierrez, Cristian Camilo González, quienes de una u otra manera, me dieron su mano y compartieron un poco de sabiduría en este proceso de aprendizaje.

A los respetados docentes, por transmitirme y brindarme su conocimiento; por su paciencia y dedicación a la hora de enseñar.

*Félix Gonzalo Sierra López.*

## DEDICATORIA

Primero que todo me gustaría dedicarle esta tesis a Dios por darme la oportunidad de culminar este logro en mi vida.

A Julia Azucena Fonseca y a Ana María Gross Fonseca, que me apoyaron incondicionalmente en cada paso que di y fueron el sustento que no me dejó decaer en el camino, a Fiona por su compañía y a todas las personas que me acompañaron en el proceso.

*William Ricardo Sánchez Fonseca.*

## **AGRADECIMIENTOS**

De manera especial al Ingeniero Alfonso Santos Jaimes, por brindarnos su confianza y apoyo para la elaboración de este proyecto, de igual manera a todos los docentes de la escuela de ingeniería mecánica, quienes hicieron parte fundamental en nuestra formación académica.

A aquellas personas que estuvieron presentes en todos esos momentos de felicidad y preocupación, que nos ayudaron a sortear inconvenientes y a demostrar que todo es posible si se anhela y trabaja por ello.

A Jorge Guzman Neira por su apoyo incondicional en este proyecto.

*William Ricardo Sánchez Fonseca*

*Félix Gonzalo Sierra López*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	20
1.OBJETIVOS .....	22
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
2.MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	23
2.1.1 Moldeo.....	23
2.1.2 Conformado o deformación plástica.....	23
2.1.3 Procesos con arranque de material.....	24
2.1.4 Tratamiento térmico.....	24
2.1.5 Tratamientos superficiales, acabado.....	24
2.1.6 Tecnología química.....	24
2.2 SOLDADURA .....	24
2.2.1 Soldadura aplicada 6013.....	25
2.3 LÁMINA DE ACERO AISI-SAE 1045.....	25
2.4 CONTROLADOR DIGITAL DE TEMPERATURA.....	25
2.5 MOLDE DE ALUMINIO FUNDIDO POR INYECCIÓN.....	26
2.6 TERMOCUPLA TIPO J.....	26
2.7 MOTOR HIDRÁULICO .....	27
2.8 BOMBA HIDRÁULICA.....	27
2.9 VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN .....	28
2.10 VÁLVULA DE SEGURIDAD .....	28
2.11 ELASTÓMEROS .....	28
2.12 FORMULACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS .....	29
2.13 CARGAS DEL PROCESO DE VULCANIZACIÓN.....	29

2.14 ACELERANTES .....	29
2.14.1 Sistema de aceleración simple. ....	29
2.14.2 Combinación de dos o más acelerantes.....	30
2.14.3 Acelerantes de acción retardada. ....	30
2.14.4 Accionamiento de los acelerantes. ....	30
2.14.5 Activadores de aceleración.....	30
2.14.5.1 Inorgánicos. ....	30
2.14.5.2 Ácidos orgánicos. ....	30
2.14.5.3 Sustancias alcalinas. ....	30
2.14.5.4 Agentes de resistencia al envejecimiento.....	31
2.14.5.5 Ingredientes misceláneos. ....	31
2.15 TIPOS DE CARGA .....	31
2.15.1 Negro de humo.....	31
2.15.2 Cargas claras inorgánicas. ....	31
2.15.3 Cargas orgánicas de color claro. ....	32
2.15.4 Cargas celulósicas.....	32
2.16 MEZCLAS.....	32
2.17 VULCANIZACIÓN.....	32
2.18 TIPOS DE VULCANIZACIÓN.....	33
2.18.1 Vulcanización sin azufre. ....	33
2.18.2 Vulcanización con azufre.....	33
2.19 ETAPAS DE LA VULCANIZACIÓN .....	33
2.20 TÉCNICAS DE VULCANIZACIÓN .....	34
2.20.1 Moldeo por compresión. ....	34
2.20.2 Moldeo por inyección.....	35
2.20.3 Curado abierto.....	35
2.21 CAUCHO NATURAL .....	35
2.22 VULCANIZACIÓN CAUCHO NATURAL .....	36
2.23 MEZCLAS CAUCHO NATURAL .....	37
2.24 CAUCHO SINTÉTICO.....	37

2.25 HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM) .....	38
2.25.1 Propiedades EPDM. ....	38
2.26 VULCANIZACIÓN DEL HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO(EPDM).....	39
2.27 DUREZA.....	40
2.28 INSTRUMENTO MEDIDOR DE DUREZA HARTIP1500.....	40
2.29 ENSAYO A LA COMPRESIÓN PARA CAUCHOS .....	41
2.30 NORMAS PARA EL USO DE LA MÁQUINA UNIVERSAL.....	42
3.CONSTRUCCIÓN DE LA VULCANIZADORA.....	44
3.1 ¿QUÉ ES UNA VULCANIZADORA? .....	44
3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA VULCANIZADORA.....	45
4.METODOLOGÍA.....	50
4.1 REVISAR BIBLIOGRAFÍA DEL HULE SINTÉTICO Y NATURAL .....	50
4.2 EJECUTAR LA COMPRA DE MATERIALES REQUERIDOS .....	50
4.3 CANTIDAD DE PROBETAS PARA LOS ENSAYOS ESTIPULADOS.....	51
4.4 CONSTRUCCIÓN DE LAS PROBETAS .....	51
4.5 VULCANIZACIÓN CON DIFERENTES PORCENTAJES DE MEZCLA .....	55
4.6 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y DUREZA .....	56
4.6.1 Prueba de dureza shore. ....	56
4.6.2 Ensayo de resistencia a la compresión. ....	58
5.CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS .....	61
5.1 DUREZA.....	61
5.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	62
5.3 CONSTRUCCIÓN DE LA VULCANIZADORA.....	63
6. CONCLUSIONES.....	64
7. RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXO A.....	69
ANEXO B.....	73
ANEXO C. ....	83
ANEXO D. ....	87

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Curva de vulcanizado .....	34
Figura 2. Durómetro.....	41
Figura 3. Vulcanizadora de cauchos.....	44
Figura 4. Soporte del molde Vulcanizadora .....	45
Figura 5. Vulcanizadora .....	46
Figura 6. Tablero de control.....	47
Figura 7. Unidad hidráulica .....	48
Figura 8. Válvulas .....	48
Figura 9. Vulcanizadora .....	49
Figura 10. Balanza digital .....	52
Figura 11. Medición de acelerantes .....	52
Figura 12. Proceso de laminado .....	54
Figura 13. Vulcanizadora .....	54
Figura 14. Molde Vulcanizadora .....	56
Figura 15. Durómetro Hartip 1500 .....	57
Figura 16. Control de mando máquina universal .....	59
Figura 17. Probetas .....	59
Figura 18. Probeta deformada .....	60
Figura 19. Vulcanizadora ensamblada.....	63
Figura 20. Planos diseño vulcanizadora 1 .....	83
Figura 21. Planos vulcanizadora 2.....	83
Figura 22. Planos Vulcanizadora 3 .....	84
Figura 23. Planos vulcanizadora 4.....	84
Figura 24. Planos vulcanizadora 5.....	85
Figura 25. Plano vulcanizadora 6.....	85

Figura 26. Plano vulcanizadora 7.....	86
Figura 27. Plano vulcanizadora 8 .....	86
Figura 28. Sistema hidráulico vulcanizadora fluid sim .....	87
Figura 29. Sistema eléctrico vulcanizadora fluid sim .....	88

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Promedio de dureza Vs Porcentaje de EPDM.....	61
Gráfica 2. Resistencia a compresión .....	62
Gráfica 3. Resistencia a la compresión 10% EPDM .....	73
Gráfica 4. Resistencia a la compresión 20% EPDM .....	74
Gráfica 5. Resistencia a la compresión 30% EPDM .....	75
Gráfica 6. Resistencia a la compresión 40% EPDM .....	76
Gráfica 7. Resistencia a la compresión 50% EPDM .....	77
Gráfica 8. Resistencia a la compresión 60% EPDM .....	78
Gráfica 9. Resistencia a la compresión 70% EPDM .....	79
Gráfica 10. Resistencia a la compresión 80% EPDM .....	80
Gráfica 11. Resistencia a la compresión 90% EPDM .....	81
Gráfica 12. Resistencia a la compresión 100% EPDM .....	82

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Porcentaje de componentes básicos para la vulcanización de Caucho Natural.....	36
Tabla 2. Valor de Dureza Probeta1 80gr EPDM .....	69
Tabla 3. Valor de Dureza Probeta 4 320 gr. Epdm.....	70
Tabla 4. Valor de Dureza Probeta 5. 400 gr epdm.....	71
Tabla 5. Valor de Dureza Probeta 6. 480 gr. Epdm .....	71
Tabla 6. Valor de Dureza Probeta 7. 560 gr. Epdm .....	71
Tabla 7. Valor de Dureza Probeta 8. 640gr Epdm .....	72
Tabla 8. Valor de Dureza Probeta 9. 720gr. Epdm .....	72
Tabla 9. Valor de Dureza Probeta 10. 800 gr. Epdm .....	72
Tabla 10. Resistencia a la compresión 10% EPDM.....	73
Tabla 11. Resistencia a la compresión 20% EPDM.....	74
Tabla 12. Resistencia a la compresión 30% EPDM.....	75
Tabla 13. Resistencia a la compresión 40% EPDM.....	76
Tabla 14. Resistencia a la compresión 50% EPDM.....	77
Tabla 15. Resistencia a la compresión 60% EPDM.....	78
Tabla 16. Resistencia a la compresión 70% EPDM.....	79
Tabla 17. Resistencia a la compresión 80% EPDM.....	80
Tabla 18. Resistencia a la compresión 90% EPDM.....	81
Tabla 19. Resistencia a la compresión 100% EPDM.....	82

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A.....	69
ANEXO B.....	73
ANEXO C.....	83
ANEXO D.....	87

## RESUMEN

**TÍTULO:** DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM)

**AUTORES:** William Ricardo Sánchez Fonseca, Félix Gonzalo Sierra López.

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Mecánica.

**DIRECTOR:** Alfonso Santos Jaimes.

El proyecto de grado “DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM)” tiene como objetivo efectuar la caracterización mecánica de la mezcla de caucho natural Heveas Brasiliensis y el hule Etileno-Propileno-Dieno EPDM a través de ensayos de dureza Shore y resistencia a la compresión.

Durante el desarrollo del presente proyecto se realizó la construcción de una máquina vulcanizadora de caucho funcional, tomando como guía los planos del diseño por parte de 2 estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.

Se fabricaron 10 probetas con diferentes porcentajes de mezcla de caucho natural y hule EPDM, se realizaron ensayos de dureza Shore y resistencia a la compresión a cada probeta, organizando los resultados en tablas y gráficas y se realizó el análisis de los resultados obtenidos.

La culminación del proyecto permite concluir: 1.) Se realizó el vulcanizado de las 10 probetas con los diferentes porcentajes de composición de mezcla de caucho natural y hule sintético. 2.) Se realizó la curva de correlación entre los diferentes porcentajes de mezcla de caucho y la dureza, y la resistencia a la compresión y los diferentes porcentajes de mezcla de caucho natural y sintético EPDM.

Para los datos obtenidos, se manejó un coeficiente de determinación superior a 0.90 ( $R^2 = 0.90$ ), mediante el uso del software Excel, lo que indica: Un valor de dureza máximo promedio de 76.6, lo cual se obtuvo en la probeta 10 con 100% de hule sintético EPDM (800gr); y un valor de dureza mínimo promedio de 61.71, que se obtuvo en la probeta 1, con 10% de caucho natural y 90% de hule sintético. El valor mayor de resistencia a la compresión se obtuvo en la probeta 10, con 100% de EPDM y el menor se encontró en la probeta 2, con 20% de caucho

sintético y 80% de caucho natural, cuyos valores fueron 12036.1991 [KPA] y 7239.8190 [KPA] respectivamente.

**PALABRAS CLAVES:** Aleación de cauchos, Vulcanización, Mezcla, Prueba, Dureza, Prueba de compresión.

---

**V°B° Director de Trabajo de Grado**

**Alfonso Santos Jaimes**

## **ABSTRACT**

**TITLE:** DETERMINATION OF THE STRENGTH AND COMPRESION RESISTANCE OF SYNTHETIC RUBBER ETHYLENE PROPYLENE DIENE AND NATURAL RUBBER HEVEAS BRASILIENSIS MIXING.

**AUTHORS:** William Ricardo Sánchez Fonseca.

Félix Gonzalo Sierra López.

**FACULTY:** Faculty of Mechanical Engineering.

**DIRECTOR:** Alfonso Santos Jaimes.

The thesis named “DETERMINATION OF THE STRENGHT AND THE COMPRESSION RESISTANCE OF THE MIXING OF SYNTHETIC RUBBER ETHYLENE-PROPILENE-DIENE (EPDM) AND NATURAL RUBBER HEVEAS BRASILIENSIS” aims to make the mechanical characterization of this mixture through trials of Shore hardness and compressive strength.

A functional rubber vulcanizing machine was built, guided by the design drawings of two Mechanical Engineering students of the Universidad Pontificia Bolivariana, from Bucaramanga.

10 specimens with different mixing ratios of natural rubber and EPDM rubber were fabricated. Shore hardness and compressive strength tests were conducted on each specimen, arranging the results in tables and charts, the results of these tests were analyzed.

By the end of the project can be concluded: 1.) Vulcanization of the 10 specimens with different percentages of composition blend of natural rubber and synthetic rubber was made. 2.) The correlation curve between the different percentages of rubber and the hardness and the resistance to compression and the various mixing ratios of natural and synthetic rubber EPDM was performed.

For the data obtained, a determination coefficient greater than 0.90 ( $R^2=0.90$ ) was found using the Excel software, indicating it was handled: A maximum average hardness value equal to 76.6, which was obtained in the specimen 10, made of 100% of synthetic rubber EPDM (800g), and the minimum average value of the hardness equal to 61.71, which was obtained in the testing cylinder 2, with 20% of natural rubber and 80% of synthetic rubber. The highest value of compressive strength is obtained in the cylinder 10, with 100% of EPDM and the lowest value was found in the cylinder 1, with 10% of synthetic rubber and 90% of natural rubber.

**KEYWORDS:** Rubber mixing, Vulcanization, Mixing, Assay, Hardness.

## INTRODUCCIÓN

El ser humano, desde su inicio, ha tratado de mejorar las cosas que tiene a su mano, cuando no las crea. Esto lo realiza, para mejorar su calidad de vida, satisfacer sus necesidades y hacer de su alrededor algo más confortable y sencillo.

Inicialmente, el caucho fue usado para la recreación, al pasar el tiempo, y con el avance de la ciencia, se tornó esencial para diferentes industrias como la deportiva, el sector automotriz y otros campos industriales. Actualmente se fabrican miles de artículos de caucho, para el cumplimiento de diversas funciones y tareas, pues se caracteriza por sus excelentes propiedades de elasticidad y resistencia ante los ácidos y sustancias alcalinas.

Hoy en día, los procesos de fabricación usados para elaborar productos de consumo a importantes empresas, se encuentran dentro de un cambio y mejoramiento constante debido a la globalización, por ende, es de suma importancia desarrollar nuevos y superiores insumos que permitan suplir la demanda y los requerimientos específicos y detallados de los consumidores modernos.

La industria va de la mano con cada uno de los sectores económicos y en el caso del sector industrial, el requerimiento de mejores productos que brinden a los consumidores mayor confiabilidad, ahorro de tiempo y dinero, mejor calidad, mayor resistencia y durabilidad, entre otros aspectos.

Tomando como referencia lo anterior, se decidió incursionar y profundizar en temas de mezcla de cauchos, con diferentes porcentajes de mezcla, para probar, analizar y llegar a una conclusión de la mejora que tienen estos en sus propiedades, y las funciones que ciertas aleaciones puedan cumplir en el sector industrial.

En el presente, las instituciones educativas muestran un notable interés y compromiso con temas que se relacionen con fomentar la investigación en temas de ingeniería, que aporten avances significativos y respuestas contundentes ante situaciones y procesos que los estudiantes y profesionales pueden encontrar.

Una institución educativa que cumple con las características mencionadas es la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, la cual se esmera por la formación académica de sus estudiantes, creando laboratorios con equipos especializados para desarrollar técnicas avanzadas y de esta manera analizar fenómenos físicos, basándose en normas de calidad para la implementación de métodos o pruebas de ensayo.

Empleando la maquinaria y los equipos mecánicos que se encuentran en el taller de resistencia de materiales ubicado en el edificio K, salón K 003, al servicio de los estudiantes, se realizó la construcción de las máquinas necesarias para realizar las mezclas de caucho y pruebas de dureza Shore y resistencia a la compresión.

Siguiendo ese orden de ideas, es justificable el planteamiento del proyecto de grado “DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM)” que propone realizar aleaciones con diferentes porcentajes de caucho natural Hevea Brasiliensis con caucho sintético hule Etileno-Propileno-Dieno (EPDM), las cuales permiten caracterizar el comportamiento de las nuevas propiedades que se adquieren al realizar dichas mezclas.

En conclusión, el proyecto es coherente con las necesidades del sector industrial actual Colombiano y contribuye a los planes investigativos y formativos de la Universidad, empleando herramientas tangibles que aportan al proceso educativo.

# 1. OBJETIVOS

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar mecánicamente la mezcla de caucho hevea brasiliensis y hule etileno-propileno-dieno (EPDM), a través de ensayos de Dureza y Resistencia a la compresión, para determinar la correlación de estas propiedades con el porcentaje de cada uno de los cauchos presentes en la mezcla.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir y probar una vulcanizadora de caucho, para la fabricación de probetas requeridas para ensayos de resistencia a la compresión y dureza. **Resultado:** Vulcanizadora funcional. **Indicador:** Se utilizarán los planos detallados que se obtuvieron del diseño de este equipo a través del proyecto de grado de dos estudiantes de Ingeniería Mecánica.
- Fabricar probetas con diferentes porcentajes de mezcla de caucho hevea brasiliensis y hule etileno-propileno-dieno (EPDM), para obtener las gráficas de correlación entre los parámetros involucrados, utilizando el software Excel. **Resultado:** Probetas de ensayo. **Indicador:** Por medio de una balanza digital se garantizará los 10 diferentes porcentajes de mezcla.
- Realizar los ensayos de dureza y resistencia a la compresión de los diferentes porcentajes de mezcla. **Resultado:** Datos de dureza Shore y Resistencia a la compresión. **Indicador:** Las pruebas se realizarán hasta los 100KN de capacidad de la máquina universal.
- Obtener la curva de correlación entre la resistencia a la compresión y el porcentaje de mezcla de cauchos; y entre la dureza y el porcentaje de mezcla de cauchos; a través del uso del software Excel. **Resultado:** Curvas de correlación. **Indicador:** Se utilizará un coeficiente de determinación igual o superior a 0.90 ( $R^2 = 0.90$ ).

## **2. MARCO TEÓRICO**

Para la elaboración del marco teórico del presente proyecto, se hizo una investigación acerca de los procesos de fabricación empleados en la construcción de una vulcanizadora funcional de cauchos y el desarrollo de unas probetas de mezcla de diferentes porcentajes de hule natural Heveas Brasiliensis junto con el caucho sintético EPDM.

### **2.1 PROCESOS DE FABRICACIÓN**

Los procesos de fabricación son el conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de las materias primas. Estas características pueden ser muy variadas tales como la resistencia, el tamaño, la forma o la estética.

Para la obtención de un determinado producto serán necesarias algunas operaciones, desde la extracción de los recursos naturales necesarios, hasta el fin y adecuado funcionamiento para el cual es construido el producto.

La producción, la transformación industrial, la distribución, la comercialización y el consumo son las etapas del proceso productivo.

Se expondrán algunos de los procesos de fabricación más utilizados en la industria. [1]

#### **2.1.1 Moldeo.**

- Fundición.
- Pulvimetalurgia.
- Moldeo por inyección.
- Moldeo por soplado.
- Moldeo por compresión.

#### **2.1.2 Conformado o deformación plástica.**

- Laminación.
- Forja.
- Extrusión.
- Estirado.
- Conformado de chapa.
- Encogimiento.
- Calandrado.

### **2.1.3 Procesos con arranque de material.**

- Mecanizado.
- Torneado.
- Fresado.
- Taladrado.
- Electroerosión.

### **2.1.4 Tratamiento térmico.**

- Templado-Revenido.
- Recocido.
- Nitruración.
- Sinterización.

### **2.1.5 Tratamientos superficiales, acabado.**

- Eléctricos.
- Electro pulido.
- Abrasivos.
- Pulido.

### **2.1.6 Tecnología química.**

- Procesos físicos.
- Proceso químicos.
- Tratamientos Superficiales.
- Pasivado.

## **2.2 SOLDADURA**

La soldadura se describe como el procedimiento por el cual dos elementos de metal se unen por medio de la aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que han de soldarse.

El procedimiento de soldar como tal, consiste en reunir las partes integrantes de una construcción asegurando la continuidad de la materia entre ellas, entendiendo

por continuidad no sólo la de carácter geométrico, sino la homogeneidad en todo tipo de propiedades.

También se puede considerar soldadura a la aportación mediante fusión de material sobre una pieza para modificar las dimensiones iniciales de la misma, o para conseguir características superficiales distintas a las originales. [2]

### **2.2.1 Soldadura aplicada 6013.**

Es un electrodo celulósico de alta penetración para la aplicación en aceros al mediano y bajo carbón. Es recomendado especialmente para soldar en todas posiciones, incluyendo la vertical descendente en pasos múltiples o sencillos, en líneas de tubería de alta y baja presión, calderas y pailería en general.

Esta es la soldadura más recomendable para soldaduras temporales en montajes, esto debido a su rápida solidificación y altas propiedades mecánicas como la resistencia y temperatura. [3]

## **2.3 LÁMINA DE ACERO AISI-SAE 1045**

Es un tipo de acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarios en condiciones de suministro. Este acero al medio carbono puede ser forjado con martillo.

Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado.

Cuando se realizan prácticas de soldadura adecuadas, presenta soldabilidad adecuada, siendo de esta manera óptima para la fabricación de componentes de maquinaria. [4]

## **2.4 CONTROLADOR DIGITAL DE TEMPERATURA**

El controlador de temperatura es un dispositivo el cual establece la temperatura que se desee en un medio. La función de este dispositivo es monitorear la temperatura de operación por medio de un control inalámbrico o una computadora

en donde se observa en todo momento la temperatura actual en la zona de trabajo.

Los controladores digitales son pequeñas instalaciones inteligentes que se componen de una entrada de un sensor, un indicador digital y una salida de regulación. Existen controladores digitales para diferentes trabajos de medición, control y regulación. Los controladores digitales se configuran a través de las teclas del propio controlador. Existe la posibilidad de establecer valores nominales para definir así el proceso de regulación. Varios controladores digitales disponen, además de la salida de regulación, salidas para señales normalizadas, a las que puede conectar un sistema de visualización para controlar el proceso de regulación. [5]

## **2.5 MOLDE DE ALUMINIO FUNDIDO POR INYECCIÓN**

La fundición de piezas consiste fundamentalmente en llenar un molde con la cantidad de metal fundido requerido por las dimensiones de la pieza a fundir, para que después de la solidificación, obtener la pieza que tiene el tamaño y la forma del molde.

En el método de fundición por inyección de aluminio a presión se funden piezas idénticas al máximo ritmo de producción, forzando el aluminio fundido bajo grandes presiones en los moldes metálicos. Las dos partes de la matriz de metal son engatilladas de forma segura para poder resistir la alta presión. El aluminio fundido es obligado a repartirse por las cavidades de la matriz. Cuando el aluminio se ha solidificado, las matrices son desbloqueadas y abiertas para extraer la pieza fundida caliente. [6]

## **2.6 TERMOCUPLA TIPO J**

Las termocuplas son los sensores de temperatura más comúnmente utilizados industrialmente.

Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto *Seeback*) del orden de los [mV], el cual aumenta con la temperatura. Por ejemplo, una termocupla tipo J está hecha con un alambre de hierro y otro de constantán (aleación de Cobre y *Nickel*).

Al colocar la unión de estos metales a 750°C, debe aparecer en los extremos 42.2 [mV].

Normalmente, las termocuplas industriales se consiguen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vainas). En un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

Las termocuplas tipo J se usan principalmente en la industria del plástico, goma (extrusión e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas. [7]

## **2.7 MOTOR HIDRÁULICO**

Simplificando, si se llena un tubo de agua y se colocan dos tapones en los extremos, al golpear uno de ellos, el otro sale disparado con la misma fuerza que se le ha aplicado al primero. De la misma forma si en cada extremo del tubo se colocan dos cilindros hidráulicos iguales y se empuja uno de ellos con una fuerza determinada, el otro se impulsará en sentido contrario respondiendo con la misma fuerza ejercida.

Además de poder transmitir la fuerza a cualquier punto, también se podría variar la misma, cambiando la superficie sobre la que es ejercida.

Generalmente la fuerza hidráulica se consigue empujando el aceite por medio de una bomba conectada a un motor, se transmite a través de tuberías metálicas, conductos, latiguillos, etc. y se proyecta en cilindros hidráulicos, motores, etc.

Un circuito hidráulico básico podría constar de un depósito de aceite, una bomba que lo impulsa, una tubería que lo transmite y un cilindro que actúa. [8]

## **2.8 BOMBA HIDRÁULICA**

Las bombas son los elementos los cuales se destinan a elevar un fluido desde un nivel determinado a otro más alto, o bien, a convertir la energía mecánica en hidráulica. Según el tipo de aplicación se usará uno u otro tipo de bomba. Actualmente las bombas son los aparatos más utilizados después del motor eléctrico, y existe una gran variedad de bombas para traslado de líquidos y gases, y para presurizar o crear vacío en aplicaciones industriales.

Generalmente las bombas se clasifican en dos tipos: De desplazamiento no positivo (hidrodinámicas), y de desplazamiento positivo (hidrostáticas). Las primeras se emplean para traslado de fluidos y las segundas para la transmisión de energía. [9]

## **2.9 VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN**

La válvula reguladora de presión es una válvula automática que reduce una alta presión de entrada a una presión de salida menor y variable de acuerdo a los requerimientos del sistema distribuidor, y constante (de acuerdo con la nueva tecnología se visualiza la ventaja de las auto reguladoras que entregan una presión variable en función de la demanda), cualquiera que sea la variación en el caudal y en la presión de entrada. [10]

## **2.10 VÁLVULA DE SEGURIDAD**

La válvula de seguridad es un dispositivo empleado para evacuar el caudal de fluido necesario de tal forma que no sobrepase la presión de timbre del elemento protegido.

La válvula de seguridad se encuentra prácticamente en todos los sistemas hidráulicos. Su objetivo es limitar la presión hasta un valor máximo predeterminado mediante la derivación de parte o de todo el caudal del sistema.

Las válvulas de seguridad, también llamadas de acción directa, consisten en una bola u obturador mantenido en su asiento, en el cuerpo de la válvula, mediante un muelle fuerte. Cuando la presión en la entrada es insuficiente para vencer la fuerza del muelle, la válvula permanece cerrada. Cuando se alcanza la presión de abertura, la bola u obturador es desplazado de su asiento y ello permite el paso del fluido al tanque mientras se mantenga la presión. En la mayoría de estas válvulas se dispone de un tornillo de ajuste para variar la fuerza del muelle. [11]

## **2.11 ELASTÓMEROS**

Se conoce que los elastómeros deben estirarse rápidamente bajo tensión, con poca pérdida de energía y calor. Cuando se liberan de la fuerza, deben retomar sus dimensiones originales por efecto del rebote, esta recuperación se debe desarrollar con la menor deformación posible. Los elastómeros no se vuelven plásticos (no son deformables), y no se funden a temperaturas elevadas, se descomponen y el material se destruye. Los elastómeros no son fusibles, no son soldables y son insolubles, pero son resolubles.

Los aspectos ya mencionados indican que sus fuerzas intermoleculares son débiles además de que su estructura es flexible y por último, para prevenir la deformación permanente y para permitir la rápida retracción, sus cadenas están permanentemente entrecruzadas.

La elasticidad de un material elastómero se define por el grado de reticulación. El proceso de enlace se denomina vulcanización o curado. Un elastómero vulcanizado también se denomina "goma".

## **2.12 FORMULACIÓN DE LOS ELASTÓMEROS**

Para la obtención de los elastómeros se utiliza como materia prima el caucho, el cual es mezclado con algunos compuestos y luego vulcanizado para que presente las características que definen al elastómero, mencionadas anteriormente. En la industria se seleccionan los compuestos que se deben mezclar con el caucho, de tal manera que modifiquen sus propiedades, a ello se le denomina formulación. Los materiales que se utilizan en las formulaciones de elastómeros son: [12]

## **2.13 CARGAS DEL PROCESO DE VULCANIZACIÓN**

Se añaden al elastómero para reforzar el producto vulcanizado. La carga más común en la industria del caucho es el negro de humo.

Los ayudantes del procesamiento son agregados que modifican las propiedades del caucho durante el proceso, entre ellos se destacan los lubricantes y los plastificantes. Estos últimos se utilizan cuando se desea incrementar la flexibilidad de la mezcla. Los más comunes son los aceites de hidrocarburos.

Otro tipo de carga son los agentes vulcanizantes, los cuales promueven el enlace espacial de las cadenas del caucho. Se utilizan entre otros el azufre (S), peróxidos como el dicumil peróxido (DCP) y resinas fenólicas. [13]

## **2.14 ACELERANTES**

Son materiales que combinados con los agentes vulcanizantes reducen el tiempo de vulcanización y mejoran las propiedades físicas del producto.

Los acelerantes se aplican de las siguientes formas:

### **2.14.1 Sistema de aceleración simple.**

Se basa en la aplicación de un acelerante primario. Este se define como aquel cuya actividad produce un curado satisfactorio en tiempos específicos.

#### **2.14.2 Combinación de dos o más acelerantes.**

Consiste en la aplicación del acelerante primario acompañado de un acelerante con menor actividad llamado secundario.

#### **2.14.3 Acelerantes de acción retardada.**

No son afectados por la temperatura de procesamiento, pero producen curados satisfactorios a temperaturas ordinarias de vulcanización, de esta manera ofrecen protección si se presenta un curado prematuro.

#### **2.14.4 Accionamiento de los acelerantes.**

Con respecto a la actividad relativa de los acelerantes, entre los lentos se tiene la anilina, entre los moderadamente rápidos, la Difenilguanidina (DPG) y la Hexametilenotetramina, entre los rápidos el 2-mercaptobenzotiazol (MBT) y el Disulfuro de Benzotiacilo (MBTS), y por último, los ultraacelerantes, como el Disulfuro de Tetrametil Tiuram (TMTD), Ditiocarbamatos y Xantatos.

#### **2.14.5 Activadores de aceleración.**

Son sustancias que forman complejos con los acelerantes, para activarlos, lo que conduce a obtener los máximos beneficios del sistema por el incremento de la velocidad de vulcanización.

Los activadores están agrupados de la siguiente manera:

##### **2.14.5.1 Inorgánicos.**

Principalmente óxidos de metales como Óxido de Zinc, además de Cal Hidratada, Litargirio, Óxido de Plomo, Óxido de Magnesio, e hidróxidos.

##### **2.14.5.2 Ácidos orgánicos.**

Normalmente son usados con Óxidos Metálicos, y son por lo general Ácidos Monobásicos de alto peso molecular o mezclas de Ácido Esteárico, Láurico, Palmítico y Mirístico y Aceites Hidrogenados de palma, castor, pescado y linaza.

##### **2.14.5.3 Sustancias alcalinas.**

Ejemplos de éstas son Aminas, sales de aminas con ácidos débiles; estas incrementan la velocidad de curado a través del incremento del pH del caucho.

#### **2.14.5.4 Agentes de resistencia al envejecimiento.**

Son incluidos todos los agentes que ayudan a evitar la ruptura de las cadenas o alteraciones químicas de las mismas que producen el envejecimiento del caucho vulcanizado. Un ejemplo de estos agentes son los Antioxidantes.

#### **2.14.5.5 Ingredientes misceláneos.**

Entre ellos destacan los Colorantes y los Agentes Retardantes a la llama. [14]

### **2.15 TIPOS DE CARGA**

El mezclado de cauchos con ayuda de las cargas brinda versatilidad al elastómero obtenido, tiene el propósito de mejorar las propiedades de los artículos finales y abaratar los costos.

El efecto de las cargas puede ser reforzante o diluyente. Las reforzantes se emplean por razones preferentemente técnicas, para aumentar las propiedades mecánicas del vulcanizado, mientras que las diluyentes se usan por razones económicas.

A continuación se citan las cargas usadas con mayor frecuencia:

#### **2.15.1 Negro de humo.**

Es la carga por excelencia y más utilizada en la industria del caucho. Al disminuir el tamaño de la partícula o aumentar su superficie específica, aumenta el poder reforzante de esta carga, obteniéndose vulcanizados con mayor resistencia a la tracción, al desgarrar y a la abrasión, además de mayor dureza y rigidez. Sin embargo, presenta desventajas como el aumento en la viscosidad de la mezcla antes de curar, lo cual hace difícil la dispersión correcta de las partículas y aumenta la histéresis, es decir, la energía absorbida en una deformación y transformada en calor.

#### **2.15.2 Cargas claras inorgánicas.**

Se ha optado por sustituir al Negro de humo en el reforzamiento de los cauchos, por ello se usan compuestos inorgánicos. La carga inorgánica más importante es la Sílice Precipitada, el tamaño de su partícula es similar al más fino de los negros de carbono por lo que presenta las desventajas de ellos, incluso más acentuadas debido a que es menos afín con el caucho por su naturaleza inorgánica.

Como cargas diluyentes, se usa un sinnúmero de materiales inorgánicos como el Carbonato de calcio natural molido, la Alúmina, Baritas y Talco.

### **2.15.3 Cargas orgánicas de color claro.**

Se emplean generalmente para fabricar artículos de color claro y de dureza elevada. Entre ellas se tienen, las resinas de Estireno Butadieno, que se mezclan generalmente con el SBR y con el Caucho Natural. Otra carga de este tipo son las Resinas Fenólicas en un grado intermedio de condensación, las cuales actúan como endurecedores y reforzantes.

### **2.15.4 Cargas celulósicas.**

La aplicación de compuestos celulósicos como cargas, se debe a que satisfacen ciertos requerimientos destacando el hecho de que son recuperables y añaden biodegradabilidad a los plásticos, además poseen generalmente alta resistencia y módulo, son menos densos que las cargas tradicionales y su bajo costo está asegurado por la versatilidad de su fuente. Sin embargo, se han encontrado inconvenientes en esta aplicación, por lo que en la actualidad, continúan las investigaciones acerca de dichas cargas. [15]

## **2.16 MEZCLAS**

En términos químicos, una mezcla es la unión de dos o más sustancias en estado puro que se combinan químicamente. Para la integración de los compuestos ya mencionados, se utiliza comúnmente un molino de rodillos o un mezclador interno. En ambos equipos hay que tener en cuenta los siguientes aspectos para producir un mezclado óptimo:

En primer lugar, para cada caucho existe un rango óptimo de temperatura de operación, además es necesario incorporar los ingredientes en un orden específico. Por otro lado, el mezclado se lleva a cabo por etapas y el tiempo de duración de las mismas es importante controlarlo, al igual que se debe controlar la temperatura final del proceso para evitar la vulcanización prematura. [16]

## **2.17 VULCANIZACIÓN**

La vulcanización es un proceso fundamental para la obtención de los elastómeros ya que mejora su resistencia mecánica y térmica. Esta se define como la reacción química que produce la formación de enlaces entre las cadenas de un polímero. La tridimensionalidad de la estructura formada restringe la libertad de movimiento de las moléculas, lo que conduce a la reducción de la tendencia a la cristalización, mejora la elasticidad y dureza bajo un amplio rango de temperatura.

## **2.18 TIPOS DE VULCANIZACIÓN**

En la industria se encuentran varias formas de vulcanizar el caucho, dependiendo el uso que se le va a dar al producto final.

### **2.18.1 Vulcanización sin azufre.**

Este tipo de vulcanización se puede llevar a cabo por la acción de agentes como el Peróxido u otros compuestos que se mencionan a continuación. En cuanto a la vulcanización por Peróxido, se aplica en cauchos saturados que no pueden ser entrecruzados por el Azufre o los acelerantes. Hay otros sistemas en que los cauchos pueden ser vulcanizados por el uso de ciertos compuestos bifuncionales tal como ocurre en el caso del Policloropreno con Óxido de Zinc. También suelen aplicarse los sistemas de vulcanización por emisión de radiaciones.

### **2.18.2 Vulcanización con azufre.**

Para que se efectúe este tipo de vulcanización, es necesario que existan insaturaciones en el caucho que permitan la incorporación del Azufre en las cadenas. Hay tres sistemas reconocidos de vulcanización con Azufre: El convencional o ineficiente, el EV (curado eficiente) y el semi-EV (semi-eficiente). Estos difieren principalmente en el tipo de enlace con Azufre que se forma, lo que influye en las propiedades del producto vulcanizado. El término “eficiente” se refiere al número de átomos de Azufre por enlace.

La eficiencia del sistema de vulcanización está relacionada con la proporción en que se añade el acelerante y el Azufre. Cuando la relación Acelerante/Azufre es mayor que 1, se habla de sistema eficiente porque se establecen casi exclusivamente enlaces Mono-sulfuros; si dicha relación es menor que 1, se formarán enlaces poli-sulfuros, tratándose de sistemas ineficientes o semi-eficientes.

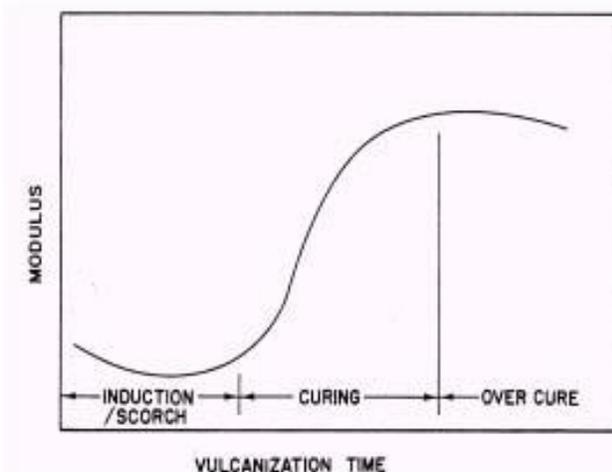
## **2.19 ETAPAS DE LA VULCANIZACIÓN**

En el proceso de vulcanización se distinguen tres etapas: La inducción, el curado y el sobrecurado, representados en la Figura 1.

La inducción representa el tiempo en el que no ocurre enlace, estando la muestra a la temperatura de vulcanización. Tiene gran importancia práctica debido a que se determina la seguridad del material contra la vulcanización prematura.

En la etapa de curado, se forman los enlaces a una velocidad que depende de la temperatura y de la composición del caucho. Luego de cierto tiempo, se alcanza el punto óptimo de curado, en el que se ha producido un 90% de entrecruzamiento. El sobrecurado es la tercera etapa y ocurre si luego del punto óptimo de curado se continúa calentando el caucho. En esta etapa puede ocurrir un endurecimiento o ablandamiento del producto, según el porcentaje de aditivos presentes en la mezcla.

Figura 1. Curva de vulcanizado



*Fuente:* Ramos J – Sanchez S. Vulcanización y formulación de hules.

## 2.20 TÉCNICAS DE VULCANIZACIÓN

En la industria se aplican varias técnicas para conseguir la vulcanización, dependiendo de las características del caucho y del artículo que se desee producir, siendo las más utilizadas para la preparación de artículos acabados, las que se mencionan a continuación:

### 2.20.1 Moldeo por compresión.

Consiste en un moldeo de piezas bajo presión; el caucho crudo fluye y llena el molde por completo, ocurriendo la vulcanización en el interior del molde. A menudo se efectúa una etapa de respiro o descompresión para eliminar las sustancias volátiles, y luego se vuelve a incrementar la presión.

### **2.20.2 Moldeo por inyección.**

Consiste en inyectar un Polímero fundido en un molde cerrado y frío, donde se solidifica y da forma al producto, la pieza se recupera al abrir el molde y es retirada. Se utiliza fundamentalmente en el procesamiento de termoplásticos, sin embargo, modificando las condiciones del proceso, se puede modificar el empleo de esta técnica para trabajarla con los Elastómeros.

### **2.20.3 Curado abierto.**

La forma tradicional consiste en colocar las piezas a curar en una autoclave con enrejados, luego se suministra vapor a la presión necesaria.

Existen otros métodos en los que se vulcaniza por medio de radiación de alta energía, micro-ondas, así como vulcanizaciones en frío que permiten trabajar a temperatura ambiente, que no son tan convencionales como las otras técnicas. [17]

## **2.21 CAUCHO NATURAL**

El Caucho Natural, extraído del sangrado de la corteza de varias Moráceas y Euforbiáceas intertropicales, entre las que se destaca la *Hevea Brasiliensis*. El caucho Natural se produce comercialmente a partir del Látex que da dicha planta que es cultivada en regiones tropicales especialmente en Malasia e Indonesia que son los países productores más importantes a nivel mundial. En Colombia se produce Caucho Natural de diversas presentaciones entre las que se destaca el Caucho en Lámina, el Caucho Ripio y el Caucho Granulado. La fuente natural es un líquido lechoso conocido como Látex, el cual es una suspensión que contiene partículas muy pequeñas de Caucho. La cadena productiva comprende desde el cultivo del Caucho, controlando plagas y enfermedades, la recolección de Látex contenido en la red de vasos laticíferos, y la disolución, filtrado, acidificación, coagulación, laminación secado y empaque del Látex, hasta obtener el Caucho Natural.

El Hule Natural es soluble en Hidrocarburos Alifáticos y en algunos otros solventes que contengan un parámetro de solubilidad similar al del NR.

Debido a su estructura regular, el Hule Natural es capaz de cristalizarse. Así, la temperatura de fusión cristalina "T<sub>m</sub>" es de 25°C, y la velocidad de cristalización alcanza su máximo a -25°C. Además, la cristalización en el NR puede ser inducida por deformación (extensión). Esto permite que el Hule Natural exhiba gran resistencia en pruebas de tensión-elongación; lo anterior no sucede con otros hules como en el SBR, que no cristalizan y tienen que ser formulados con negro de humo para alcanzar la resistencia requerida.

El Hule Natural reaccionará con las sustancias químicas que son reactivas hacia las dobles ligaduras carbón-carbón. Además, la presencia del grupo metilo en el Poli-Isopreno aumenta la reactividad de la doble ligadura (al compararla con el Polibutadieno); esta razón permite que el Hule Natural generalmente sea más reactivo que el SBR y que el Polibutadieno hacia una gran variedad de sustancias químicas, incluyendo las que forman los sistemas de vulcanización.

Se debe notar que también pueden ocurrir importantes reacciones químicas en los átomos de carbono adyacentes a las dobles ligaduras. En este punto los átomos de hidrogeno son más fáciles de abstraer que aquellos en las dobles ligaduras. [18]

## 2.22 VULCANIZACIÓN CAUCHO NATURAL

Un sistema típico de vulcanización para el hule natural incluye cuatro componentes básicos: Azufre, acelerador, activador y Ácido Graso; estos se utilizan en concentraciones, como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Porcentaje de componentes básicos para la vulcanización de Caucho Natural.

<b>Sistema de vulcanización</b>		
	<b>CONVENCIONAL</b>	<b>EFICIENTE</b>
Hule natural	100 phr	100 phr
Azufre	2.0-3.5	0.4-0.8
Acelarador	1.5-0.5	5.0-2.0
Activador (ZnO)	3-5	3-5
Ácido graso (esteárico)	1-2	1-2

Fuente: Autor

Los aceleradores varían enormemente en sus efectos, pero en un caso típico se requiere aproximadamente de 20 minutos a 140°C para la vulcanización de un compuesto de Hule. Es común, además, que por cada 10°C de incremento en la temperatura, se requiere de la mitad del tiempo para su vulcanización: por ejemplo, si a 140°C se requiere de 20 minutos, a 150°C se requerirá de 10 minutos, y a 160°C se requerirá de 5 minutos, etcétera.

Un sistema de vulcanización eficiente tiende a producir una mayor concentración de enlaces mono y disulfuro, en comparación con el sistema convencional, que tiende a producir mayor concentración de enlaces Polisulfuro.

Dependiendo del sistema de vulcanización que se utilice, se ha hecho un estimado del número de átomos de Azufre que se requieren para producir cada entrecruzamiento; en un sistema “Hule-Azufre”, sin acelerador, este número está alrededor de 45; en un sistema convencional “Hule-Azufre-Acelerador”, el número oscila alrededor de 15; en el sistema eficiente “Hule-Azufre-Acelerador”, este número está alrededor de 5.

A pesar de los considerables desarrollos en lo concerniente a los Hules Sintéticos, el estado del Hule Natural es de gran importancia ya que en toneladas producidas por año es el líder mundial y se sigue utilizando por sus incomparables cualidades, haciéndose difícil de sustituir. [19]

### **2.23 MEZCLAS CAUCHO NATURAL**

En términos químicos, una mezcla es la unión de dos o más sustancias en estado puro que no se combinan químicamente, es decir, mantienen sus propiedades químicas. Dicho en otros términos, una mezcla es la combinación física de dos o más sustancias sin alterar su composición química.

En el caso del caucho natural las mezclas más comunes se realizan con:

- IR (Poli-Isopreno)
- SBR (Butadieno-Estireno)
- EPDM (Etileno-Propileno-Dieno)
- NBR
- NBR/PVC (Butadien-Acrílico)
- CR (Cloropreno)

Este tipo de mezclas se realizan para mejorar las propiedades del producto según el uso que se le quiera dar. [20]

### **2.24 CAUCHO SINTÉTICO**

El caucho sintético, es obtenido a partir de productos del Petróleo por reacciones complejas de polimerización. La cadena productiva hasta obtener el Caucho Sintético comienza con la refinación petroquímica y la correspondiente generación de Olefinas y Aromáticos, que sirven como base para obtener el Etil-Benceno, el

Estireno y el Acrilonitrilo. Éstos a su vez, son insumos para la producción de diversos Cauchos Sintéticos: el Estireno-Butadieno (SBR), el Poli-Butadieno (PBR), el Butilo, el Clorobutadieno, el Aquilonitrilo butadieno, el Isopreno y el Etil-Propileno-Dieno (EPDM), entre otros. El Caucho Natural, el Caucho Sintético y las mezclas entre estos dos, así como con otros aditivos (por ejemplo, con el Negro de Humo o con el Sílice), se utilizan como materia prima para la elaboración de semi-productos o formas básicas (caucho sin vulcanizar; hilos y cuerdas de caucho vulcanizado; placas, hojas, tiras, varillas y perfiles de caucho sin endurecer; y tubos de caucho vulcanizado sin endurecer) y otros productos y artículos de diversos usos.

Los primeros Cauchos Sintéticos a partir de derivados del Petróleo se fabrican en escala industrial a partir de 1937 en Alemania, pero el más espectacular desarrollo de estos cauchos se tuvo en Estados Unidos de Norteamérica, durante la Segunda Guerra Mundial, pues al ser esta materia prima de alto valor estratégico en este tiempo, aportó grandes innovaciones en la industria del caucho y sus aplicaciones.

Día a día son descubiertos nuevos elastómeros para usos específicos en el sector industrial de todo el mundo. [13]

## **2.25 HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM)**

Consiste en uno de los hules que están tomando mayor importancia en la industria, ya que, en el mundo occidental tiene una producción de 5'000.000 de toneladas anuales, ubicándose en un segundo lugar, después de los Hules Dienes, utilizados en la industria llantera.

Debido a la ausencia de doble ligadura, es un material susceptible a la vulcanización, con un sistema Azufre-Acelerador y los agentes que se utilizan para su vulcanización, son los Peróxidos a una escala baja. Posteriormente, surgieron los Terpolímeros (Etileno-Propileno-Dieno) que incluyen doble ligadura, facilitando de esta manera, la vulcanización con el Azufre-Acelerador.

En la actualidad, 90% de los Hules derivados del Etileno-Propileno, son Terpolímeros (EPDM). El 10% restantes, son Copolímeros (EPM). [2]

### **2.25.1 Propiedades EPDM.**

- Excelente resistencia química al oxígeno y al ozono.
- Muy buena resistencia al envejecimiento por calor.

- Excelentes características de aislamiento eléctrico.
- Buena resistencia química a los álcalis y a los ácidos.

Además de éstas, tienen buenas propiedades mecánicas, especialmente, cuando son reforzados con Negro de Humo, así la resistencia a la tensión es buena, la resistencia a la abrasión está entre buena y excelente y la resistencia al desgarre es buena.

Cabe mencionar que la densidad de los Hules EP (Ca. 0.86gr/ cm<sup>3</sup>) es de las más bajas entre todos los Polímeros comerciales por ello sigue siendo uno de los más utilizados en la industria. [9]

## **2.26 VULCANIZACIÓN DEL HULE ETILENO-PROPILENO-DIENO (EPDM)**

Comúnmente, se utilizan sistemas con azufre, aunque también se puede realizar la vulcanización con Peróxido que es más recomendado para los Hules EP, la cual le da al Hule mayor resistencia al calor, menor deformación permanente, mayor aislamiento eléctrico, y menores problemas de migración.

Los EPDM tienen un cierto nivel de instauración y pueden ser vulcanizados con Azufre. Sin embargo, como este nivel de instauración es muy bajo, se deben utilizar combinaciones de acelerantes altamente poderosos. No obstante, el sistema utilizado dependerá mayormente del tipo y concentración del tercer monómero, es decir, (el Diene), en el caso del EPDM.

Por el hecho que el EPDM representa actualmente el 10% del consumo mundial de Caucho Sintético, tiene una gran importancia ya que es un Hule que no es utilizado en la industria llantera sino en otros campos por su excelente resistencia al Oxígeno, al Ozono, al calor y en general una buena resistencia química así como sus propiedades de aislamiento eléctrico. Como negativo se puede decir que son poco resistentes a los Aceites de Hidrocarburos y por su alto costo en comparación de otros Hules Sintéticos.

Su mayor campo de uso se centra en la industria automotriz que no implica contacto con aceites ni combustibles. También se le utiliza como recubrimiento de cables eléctricos de media y baja tensión. También es utilizado para fabricar todo tipo de empaques y mangueras para aparatos de línea blanca como lavadoras y secadoras. [11]

## **2.27 DUREZA**

La dureza es la característica de un Caucho que indica su rigidez frente a esfuerzos moderados, como los que frecuentemente ha de soportar cuando se encuentra en servicio; también es la característica de un Caucho que se indica con mayor frecuencia y muchas veces la que sirve para establecer las distintas clases de Caucho en una especificación.

Esta propiedad está relacionada con el Módulo de Elasticidad o Módulo de Young.

El método más popular de medida de dureza de los Cauchos es el Shore A, en el cual se realiza la medición con un instrumento llamado Durómetro, basado en la penetración de una punta troncocónica en contra de la reacción de un resorte metálico calibrado. Cuando con el Durómetro Shore A se obtiene lecturas superiores a 90°, se recomienda el empleo del durómetro Shore D, que dispone de una punta cónica y de un resorte más rígido.

En los diversos tipos de durómetros de bolsillo la fuerza se aplica a mano, y por consiguiente es indeterminada. Se obtiene mayor precisión y reproducibilidad mediante durómetros fijos en soportes, en los que la fuerza aplicada es siempre de 1 Kgf para el Durómetro A y de 5 Kgf para el D.

Para una correcta medición es imprescindible que la superficie sea plana, que este limpia y pulida.

La medición debe realizarse perpendicular al punzón del Durómetro realizar mínimo 3 ensayos y cada vez en puntos distintos. [15]

## **2.28 INSTRUMENTO MEDIDOR DE DUREZA HARTIP1500**

Se basa en la reacción elástica del material cuando dejamos caer sobre él un material más duro. Si el material es blando, absorbe la energía del choque, si el material es duro produce un rebote cuya altura se mide.

Hartip 1500 es un probador de dureza de metal de mano integrada que combina el dispositivo de impacto y procesador en una unidad. Permite realizar las pruebas en un espacio reducido, debido a que la máquina es portátil y de fácil uso, como se observa en la Figura 2. [20]

Figura 2. Durómetro



Fuente: Autor.

## 2.29 ENSAYO A LA COMPRESIÓN PARA CAUCHOS

Especifica las condiciones de ensayo para determinar las características de deformación por compresión de los Cauchos, basada en los principios generales.

Esta prueba se realiza con la máquina Universal para pruebas de Resistencia de Materiales

La máquina sirve para realizar los ensayos de mayor importancia en la Resistencia de Materiales mediante el uso de probetas, los cuales son:

- Zona de Tensión: Ensayo a la resistencia de la Tracción.
- Zona de Compresión: Ensayos de Compresión, Flexión y de Corte.

El movimiento necesario para las pruebas se realiza solamente en la estructura superior. La viga inferior sirve de base para la estructura y alojar el gato hidráulico. La carga generada al accionar el gato hidráulico mediante la palanca de accionamiento hace mover solidariamente la placa inferior y superior de la estructura mientras que la placa intermedia permanece quieta durante la operación. Esto hace que el espacio en la zona de tensión disminuya y en la zona de compresión aumente.

La operación de la máquina siempre es la misma. En un ensayo típico, los aditamentos y accesorios son colocados en la zona que se requiera para la prueba

junto con las probetas. El volante del gato hidráulico se gira para colocar la placa inferior en la posición inicial y de apriete, momento en el cual se cierra la válvula de descompresión y se inicia el accionamiento del gato. El émbolo del gato hidráulico se extiende generando la carga, la cual es leída con un indicador tipo Bourdon, para obtener la medición de la carga ejercida. Este indicador posee dos agujas, una roja y otra negra de arrastre, las cuales son solidarias entre sí y deben encontrarse para que la aguja negra arrastre la roja, de esta manera, al momento de indicar la medición más alta soportada por el material en la prueba que se esté realizando la aguja negra se queda en ese valor para ser medido con mayor precisión mientras que la aguja roja regresa a su posición original. Después de terminar el ensayo, la viga superior, la placa inferior y el gato hidráulico vuelven a su posición original abriendo la válvula de descompresión del gato hidráulico.

Este ensayo representa la Resistencia a la Compresión de un material para resistir las fuerzas que tienden a aplastarlo, como por ejemplo: Las arandelas, ladrillos, columnas, etc. Esta prueba permite determinar el comportamiento de los materiales dúctiles sometidos a esfuerzos de compresión calculando el límite de fluencia a la compresión midiendo el diámetro de la probeta antes y después de aplicada la carga. Cuando el material es cargado más allá de su límite este se deforma incrementando su área lo que ayuda al material a aumentar la carga adicional que se le aplique, lo que hace imposible obtener un valor definitivo máximo a la carga de compresión. Por lo general se asume que ambos valores de tensión y compresión son iguales en un material, pero si existe una diferencia, el mayor de ellos es de compresión. [4]

### **2.30 NORMAS PARA EL USO DE LA MÁQUINA UNIVERSAL**

- La máquina no debe ser cargada por fuera de su centro o la fricción podrá afectar la precisión de los resultados y causar daño a la máquina.
- No debe de excederse nunca la capacidad máxima de la máquina.
- Al usar las mordazas de tensión, debe de asegurarse que los tornillos de sujeción entren en ellas por lo menos 7/8".
- Las mordazas deben ajustarse no muy herméticamente para que durante la prueba se permita un auto alineamiento.

- Las probetas deberán ser colocada cuidadosamente en las garras de las mordazas para el ensayo de tensión. Si la probeta no hace el contacto apropiado en toda la longitud de las garras, se podrán generar grandes fuerzas hacia afuera de las mordazas y estas podrán dañarse.
- Si las garras no están a igual altura, la probeta será sostenida fuera de centro y se creara en ella cargas de tensión y flexión a la vez.
- En el ensayo de compresión se debe localizar el centro de la probeta lo más cerca posible del centro de la máquina. Las dos placas tienen ranuras concéntricas para ayudar a centrar los accesorios y probetas.
- Rutinariamente la maquina requiere lubricación en tres partes: en la palanca de accionamiento como también en las articulaciones del gato hidráulico y las barras laterales antes y después de cada ensayo.
- Chequear antes de iniciar cualquier prueba el nivel de aceite del gato hidráulico.
- Revisar periódicamente el funcionamiento del gato hidráulico, haciendo limpieza de suciedad en la válvula, resorte y balines. [20]

### 3. CONSTRUCCIÓN DE LA VULCANIZADORA

Se construyó una vulcanizadora funcional utilizando los planos detallados que se obtuvieron del diseño de este equipo a través del proyecto de grado de dos estudiantes de Ingeniería Mecánica.

#### 3.1 ¿QUÉ ES UNA VULCANIZADORA?

Es una máquina la cual posee una unidad hidráulica. También posee un cilindro al cual se le adapta una placa de Acero Cold Rolled. Otra placa, preferiblemente de Acero AISI 1045 se encuentra en una mesa de apoyo la cual tiene una serie de resistencias térmicas internas.

Esta máquina es empleada cuando aún se tiene una mezcla heterogénea. La mezcla se coloca entre las planchas las cuales llegan a una temperatura de 140 a 150°C y el cilindro ejerce una presión de 4.41315 a 4.90355 [Mpa]. [8]

De esta manera se pueden obtener las probetas que se utilizarán para la caracterización del presente proyecto como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Vulcanizadora de cauchos



Fuente: Autor.

### 3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA VULCANIZADORA

El proceso de construcción de la vulcanizadora para mezcla de caucho, se desarrolló de la siguiente manera:

- La mesa de la vulcanizadora fue construida con un ángulo de  $\frac{1}{4} * 1" \frac{1}{2}$ , la cual fue debidamente cortada y soldada, según las consideraciones de diseño estipuladas previamente.
- La plantilla de la mesa se construyó con una lámina 5/16 Cold-Rolled de 50\*50 cm. Para este caso, se utilizó soldadura aplicada 6013.
- El área donde se concentra la fuerza hidráulica de la vulcanizadora fue construida en forma de C. Para esto se empleó una lámina reforzada de  $\frac{1}{2}$ " de espesor, con un ángulo de  $\frac{1}{4} * 1" \frac{1}{2}$ . La soldadura aplicada en este caso fue la *wild* 18 de alta penetración, garantizando así la estabilidad de la estructura y del molde, como se observa en la figura 4.

Figura 4. Soporte del molde Vulcanizadora



Fuente: Autor.

- Para brindarle mayor eficiencia al movimiento ascendente y descendente del molde inferior, se hicieron unas guías, las cuales cubren todo el desplazamiento de este, evitando así oscilaciones y pérdidas de presión al realizar el proceso de vulcanizado.
- Las tapas de la mesa se construyeron utilizando lámina de acero AISI-SAE 1045 calibre 16 Cold Rolled, pues brinda excelentes propiedades mecánicas tales como su dureza y tenacidad que son necesarias para la fabricación de componentes de maquinaria.
- El molde de aluminio fundido fue construido según las medidas requeridas para la realización de las probetas, el cual tienen unas medidas internas de 15 cm de largo y un diámetro de 7,5 cm.
- El resultado de la construcción de la vulcanizadora de caucho, se observa en la Figura 5.

Figura 5. Vulcanizadora



Fuente: Autor.

- Para la elaboración de la vulcanizadora se emplearon en total 4 resistencias internas conectadas en paralelo de 220V por 1000 Watt de potencia, las cuales se encargan de llevar el molde a la temperatura necesaria que debe ser mayor a 160°C para realizar el proceso de vulcanizado de las probetas cilíndricas.
- Se instaló un controlador digital de temperatura de 8 dígitos; 4 de ellos empleados para la programación del rango de operación y los otros 4 para controlar el estado de temperatura o nivel de flotamiento, como se observa en la Figura 6.

Figura 6. Tablero de control



Fuente: Autor.

- Se empleó una termocupla tipo J, para controlar la temperatura máxima requerida que es de 160°C, para la obtención de las probetas.
- Se realizó la instalación del control manual de encendido del motor de la bomba hidráulica.
- Se instaló el control manual de encendido.
- Para el control de activación de la presión, se realizó la instalación de una electroválvula la cual trabaja a 220V.
- Para el arranque del sistema hidráulico, se empleó un motor de 1.75 Hp trifásico a 220V, el cual sirve de apoyo a la bomba para lograr la transformación de la energía mecánica en energía hidráulica necesaria para el

desarrollo del trabajo. La unidad hidráulica descrita, se observa en la Figura 7 y los planos correspondientes al sistema hidráulico se observan en el Anexo D.

Figura 7. Unidad hidráulica



Fuente: Autor.

- Para proteger y realizar el control del aceite hidráulico, se instaló una válvula de seguridad y una válvula controladora de presión, las cuales permiten tener el sistema alejado de sobrepresiones, daños y mantener una estabilidad aceptable en el equipo. La válvula de seguridad se contempla en la Figura 8.

Figura 8. Válvulas



Fuente: Autor.

- Se instaló un manómetro de glicerina, para poder visualizar la presión ejercida por el sistema al realizar la compresión del molde en la conformación de las probetas.
- Se realizó el ensamble de toda la estructura y partes de la máquina. La vulcanizadora se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Vulcanizadora



Fuente: Autor.

## **4. METODOLOGÍA**

La metodología propuesta para la realización del proyecto contempla actividades donde la puesta en marcha corresponde a la fecha de aprobación del anteproyecto por parte de los ingenieros encargados, el trámite de entrega de la mercancía (Caucho Natural Heveas Brasiliensis y Caucho Sintético EPDM), por parte de la empresa Quelaris Ltda. De Bogotá y la construcción previa de la máquina vulcanizadora de caucho.

### **4.1 REVISAR BIBLIOGRAFÍA DEL HULE SINTÉTICO Y NATURAL**

Se realizó una documentación por parte de los estudiantes acerca del Caucho Natural y el Caucho Sintético, sus aplicaciones, obtención, características, propiedades y aleación de estos con sus diferentes aditivos, acelerantes y proceso de mezclado y vulcanizado.

La información que se encontró permitió incrementar los conocimientos acerca del tema y contribuyó con la apropiación de aspectos principales relacionados con los temas del Caucho a nivel industrial y productivo.

### **4.2 EJECUTAR LA COMPRA DE MATERIALES REQUERIDOS**

Para efectuar el proceso de compra, se estimó un presupuesto conforme a las cotizaciones realizadas previamente por cada uno de los integrantes del grupo. Inicialmente, se pactó que la financiación total dependería de los estudiantes responsables del proyecto, pero gracias al apoyo y asociación que se logró con la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, se recibió un valioso aporte de una parte del capital requerido, por medio del departamento de investigaciones, organismo que promueve proyectos de ciencia y desarrollo. Presentándose así la situación, los estudiantes se comprometieron a gestionar la ejecución de los recursos según las políticas de la Universidad, en consecuencia, se diligenciaron los formatos establecidos, siguiendo los procedimientos que describen el trámite para solicitud de compra. Con el aporte mencionado anteriormente, se pudieron realizar las siguientes compras:

- 1 bala de Caucho Hebea Brasiliensis (33.30 Kg)
- 1 bala de Caucho Sintético EPDM KELTAN (25 Kg)
- Cilindro hidráulico Equus AC Power Unit

- Válvula de seguridad y válvula anti retorno Vibo.
- Manguera hidráulica flexible
- Racores
- Una pimpina de aceite hidráulico multipropósito

### **4.3 CANTIDAD DE PROBETAS PARA LOS ENSAYOS ESTIPULADOS**

Se elaboraron 10 probetas con el fin de abarcar los diferentes porcentajes de mezcla (del 10 al 100%) de cantidad de caucho sintético para poder realizar el ensayo de dureza Shore y el ensayo a la compresión estipulados para cada una.

### **4.4 CONSTRUCCIÓN DE LAS PROBETAS**

Debido a la carencia de información en los textos bibliográficos acerca de la mezcla de Hules, se hizo una investigación con empresas de la industria del caucho como lo fueron Quelaris Ltda. De la ciudad de Bogotá y Milcauchos S.A de la ciudad de Bucaramanga, junto con personas conocedoras de la industria cauchera, quienes aportaron conocimientos e ideas acerca de técnicas y métodos usados en la elaboración de dichas mezclas y la implementación de acelerantes y aditivos como complemento esencial del proceso.

Para saber el tiempo estipulado en la vulcanización de cada probeta, se hicieron algunas pruebas de vulcanización y se determinó que el tiempo ideal son 15 min para cada probeta.

La cantidad de Negro de Humo, también se determinó con el método prueba y error, debido a que la cantidad normal que se le añade a la mezcla, que en este caso sería el 20% de la del total del peso de los 2 Cauchos (800gr), se redujo a 80gr; de lo contrario, la mezcla se pulveriza al pasar por los rodillos de la laminadora.

- Se procede a cortar tiras de caucho tanto natural como sintético en pedazos no tan gruesos, para hacerlos pasables por la apertura de los rodillos.
- Se pesan los cortes en una balanza digital calibrada previamente.

Se organizan y clasifican las proporciones de caucho para la mezcla en los diferentes porcentajes: 50-50, 60-40, 70-30, 80-20, 90-10, 10-90, 20-80, 30-70, 40-60 y 100% (800gr) de caucho sintético EPDM, debidamente diferenciados en bolsas independientes. La balanza digital utilizada en el proceso de caracterización del caucho se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Balanza digital



Fuente: Autor.

- Se pesan, organizan y clasifican las cantidades de acelerante y el Negro de Humo que se utilizaron en cada mezcla. Se observa el proceso en la Figura 11.

Figura 11. Medición de acelerantes



Fuente: Autor.

- Seguido de esto, se procede a encender el molino y se ajusta la apertura de los rodillos aproximadamente a 1cm de distancia, para poder pasar las primeras muestras de caucho.
- Se hace pasar una cantidad específica de Caucho Natural Heveas Brasiliensis entre los rodillos del molino repetidamente, por aproximadamente 20min, para volverlo más maleable.
- Se repite este proceso con el Caucho Sintético EPDM, hasta poderlos pasar conjuntamente.
- Gradualmente se angosta la apertura de los rodillos de 1cm a 3mm aproximadamente, esto con el fin de mejorar el mezclado.
- La temperatura de los rodillos es controlada con ayuda de un sistema hidráulico, impulsado por una bomba, el cual hace recircular el fluido por el interior de los rodillos liberando de esta manera el exceso de calor. Cada periodo de tiempo, dependiendo del trabajo realizado, se cambia el agua del recipiente, para mejorar el proceso de enfriamiento.
- Se le van agregando pequeñas cantidades de agente acelerante Thiuram (2gr), y se sigue pasando la mezcla a través de los rodillos, hasta que las partículas se homogenicen.
- Seguido de esto, y sin dejar de pasar la mezcla por los rodillos, se le va agregando a la mezcla, de forma continua el agente acelerante MBT (6gr), con el cuál se debieron tomar precauciones con el uso de EPPs (elementos de protección personal), debido a su alta toxicidad.
- En la mezcla para la realización de las probetas se realizó una combinación de dos acelerantes uno rápido como lo es el 2-mercaptobenzotiazol (MBT) y un ultra-acelerante, como el disulfuro de tetrametil Thiuram (TMTD).
- Inmediatamente después, se procede a agregar el agente vulcanizante Negro de Humo (80gr), el cual brinda dureza y el color característico del caucho.
- Por último, se agregan 8gr de Azufre, para finalizar la mezcla.

El proceso de mezclado o laminado se observa en la Figura 12.

Figura 12. Proceso de laminado



Fuente: Autor.

- Los residuos que caen a la base del molino son reincorporados nuevamente a la mezcla, para de esta manera maximizar la eficiencia del proceso.
- Al obtener la mezcla final, la pesamos en la balanza digital, obteniendo un peso de 976gr aproximadamente.
- Cuando se culmina un proceso de mezclado, es importante retirar los residuos de la base del molino, para no alterar las características de la siguiente mezcla.
- Se introducen en la vulcanizadora, para poder darle forma cilíndrica a la mezcla y así obtener las probetas.
- Se enciende la vulcanizadora, se espera que el tablero de mando, por medio de la termocupla, registre 160°C. El tablero de mando se observa en la parte superior derecha de la Figura 13.

Figura 13. Vulcanizadora



Fuente: Autor.

- Se introduce la mezcla al molde y se le va dando forma a la probeta, antes de alcanzar esta temperatura; esto se logra cerrando y abriendo el molde por un corto periodo de tiempo.
- Cuando el control de mando indica los 160°C, aproximadamente 40min después de haber activado el sistema, se le aplica spray desmoldante al interior y en los alrededores del molde, para evitar que por la alta temperatura se adhieran a éste partículas de Caucho.
- Se esperan 15min para que la probeta logre un vulcanizado homogéneo y se procede a retirar la probeta ya vulcanizada, empleando guantes de protección contra calor. Durante el proceso de vulcanizado, se estuvo pendiente de la presión, para que ésta no descendiera y lograr un vulcanizado óptimo.
- Al retirar la probeta de la vulcanizadora, es necesario recortar el caucho sobrante de los alrededores, para darles la forma cilíndrica final.

#### **4.5 VULCANIZACIÓN CON DIFERENTES PORCENTAJES DE MEZCLA**

- Teniendo previamente las mezclas del Caucho Natural con el Caucho Sintético, se procedió a encender la vulcanizadora, para alcanzar la temperatura de vulcanización.
- Se enrolló el Caucho mezclado, tratando de darle forma de cilindro, se cortó teniendo en cuenta la longitud del molde y se pesó en la balanza digital, buscando un peso aproximado de 650 gr.
- Al alcanzar una temperatura de aproximadamente 100°C en el molde, se procedió a introducir la mezcla debidamente cortada, con el fin de darle forma a la probeta, y así sucesivamente hasta alcanzar la temperatura ideal. Al alcanzar la temperatura de cocinado que es 160°C, se introduce la mezcla, dejándola alrededor de 15min, para posteriormente retirar la probeta vulcanizada y poder darle continuidad a la elaboración de cada una de las 10 probetas.
- El molde, el cual le dio forma a las probetas se observa en la Figura 14.

Figura 14. Molde Vulcanizadora



Fuente: Autor.

## 4.6 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y DUREZA

Al obtener físicamente las probetas vulcanizadas con la forma cilíndrica estipulada, se procedió a realizar las pruebas de dureza Shore, empleando el Durómetro Hartip 1500 y las pruebas de resistencia a la compresión, empleando la Máquina Universal Shimadzu UH-500 KNI.

### 4.6.1 Prueba de dureza shore.

La dureza es la característica de un Caucho que indica su rigidez frente a esfuerzos moderados, como los que frecuentemente ha de soportar en servicio, es la característica de un Caucho que se indica con mayor frecuencia y muchas veces la que sirve para establecer las distintas clases en una especificación. Esta propiedad está relacionada con el Módulo de Elasticidad o Módulo de Young.

Es una propiedad que se puede determinar de forma sencilla y rápida, y con un equipo poco costoso.

Es un ensayo no destructivo, que muy frecuentemente se puede realizar directamente sobre el artículo terminado.

El método más popular de medida de dureza de los Cauchos es el Shore A, se realiza la medición con un instrumento llamado Durómetro, basado en la penetración de una punta troncocónica en contra de la reacción de un resorte metálico calibrado. Cuando con el Durómetro Shore A se obtiene lecturas superiores a 90°, se recomienda el empleo del durómetro Shore D, que dispone de una punta cónica y de un resorte más rígido.

En los diversos tipos de Durómetros de bolsillo la fuerza se aplica a mano, y por consiguiente es indeterminada. Se obtiene mayor precisión y reproducibilidad mediante Durómetros fijos en soportes, en los que la fuerza aplicada es siempre de 1 Kgf para el durómetro A y de 5 Kgf para el D.

Para una correcta medición es imprescindible que la superficie sea plana, que este limpia y pulida.

La medición debe realizarse perpendicular al punzón del Durómetro. Realizar mínimo 3 ensayos y cada vez en sitios diferentes.

El instrumento utilizado para realizar las pruebas de dureza de las probetas de mezcla de Cauchos, se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Durómetro Hartip 1500



Fuente: Autor.

- El durómetro debe cargarse completamente durante un tiempo estimado de una hora, para poder realizar las pruebas a las 10 probetas vulcanizadas.
- Se enciende el durómetro oprimiendo el botón ON/OFF
- Se mantiene oprimido el botón M durante 4 segundos. De ésta manera se configura la dirección en la cual se tomarán las pruebas, realizando los cambios con el botón C.
- Se presiona M durante 1 segundo. Esto para buscar el material al que se la va a realizar la prueba de dureza, en este caso, se selecciona M1, que es la apropiada para el caucho.
- De nuevo se presiona M durante 1 segundo, para seleccionar el tipo de prueba, con C, se selecciona la opción Hsd, que es la prueba de dureza Shore.
- Se oprime M durante 1 segundo y con el botón C se selecciona la opción AVER, que muestra el valor promedio de las pruebas hechas.
- Automáticamente, al oprimir la tecla M, luego de la lectura del valor promedio, queda listo el instrumento para una nueva medición de dureza.

#### **4.6.2 Ensayo de resistencia a la compresión.**

Para la realización de este ensayo fue necesario el empleo de la Máquina Universal Shimadzu UH-500 KNI, la cual permite obtener la lectura de la fuerza y la deformación de cada una de las probetas con sus diferentes porcentajes de mezcla y con ello poder hallar el esfuerzo para cada una.

- Se enciende la máquina universal, se revisa que el tablero esté sincronizado y las unidades de deformación y fuerza son las correctas para realizar las pruebas, tal como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Control de mando máquina universal



Fuente: Autor.

- Se organizan las probetas, teniendo en cuenta el porcentaje de mezcla, para posteriormente poder realizar los cálculos y el análisis de resultados, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Probetas



Fuente: Autor.

- Se levanta la plancha principal de la máquina universal, para permitir ubicar la probeta de caucho mezclado. Esto se logra activando la bomba de la máquina, por medio de los botones de mando.

- Se ubica una guía de forma cuadrada, la cual impide que la plancha principal golpee la base de la máquina.
- Se observa cómo se va deformando la probeta, mientras se toman los datos de fuerza y deformación. Para facilitar la toma de datos, se realizaron grabaciones durante las pruebas.
- La fuerza de compresión se retira 3 milímetros antes de hacer contacto con la base.
- Se desplaza la plancha principal verticalmente para proceder a retirar la probeta deformada y ubicar la nueva probeta, y de esa manera continuar con las pruebas.

Después de la prueba de resistencia a la compresión, las probetas se deforman como se observa en la Figura 18.

Figura 18. Probeta deformada



Fuente: Autor.

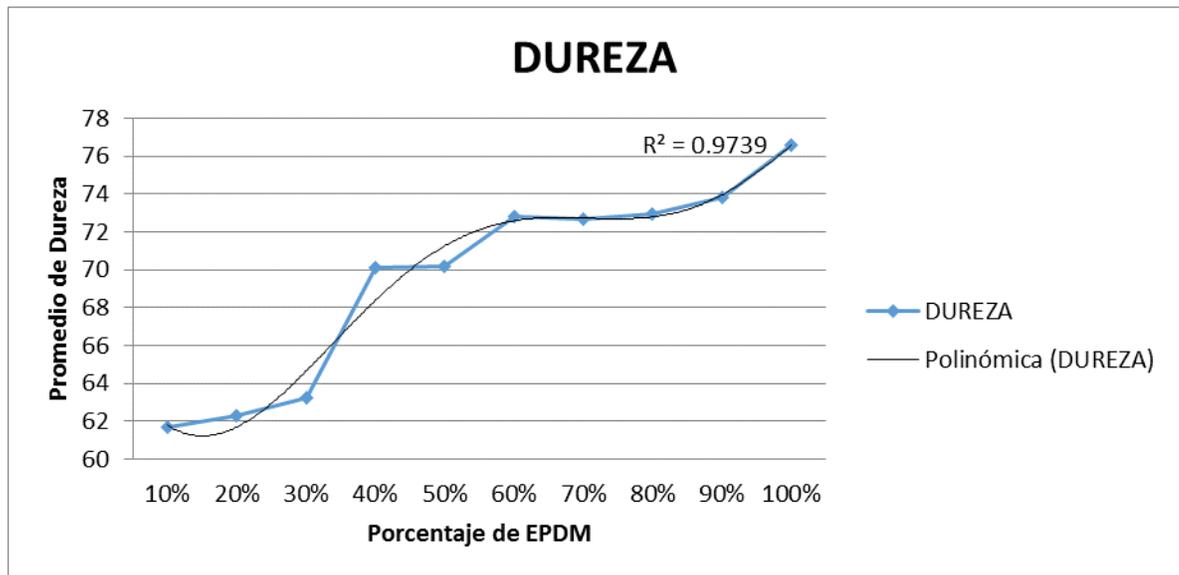
## 5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

En seguida de la fabricación de las 10 probetas con los diferentes porcentajes de mezcla de caucho sintético, se procede a realizar los ensayos de dureza y resistencia a la compresión.

### 5.1 DUREZA

El método más popular para medir la dureza de un caucho es el Shore A, basado en la medición de la penetración de una punta troncocónica en contra de la reacción de un resorte metálico calibrado.

Gráfica 1. Promedio de dureza Vs Porcentaje de EPDM



Fuente: Autor.

El análisis de dureza para los diferentes porcentajes de mezcla entre el EPDM y el caucho natural se evidencia en la Gráfica 1, los datos se encuentran tabulados en el anexo A. De esto se infiere que a mayor composición de Caucho Sintético EPDM, la dureza aumenta proporcionalmente. Se puede ultimar que el número de dureza más bajo equivale al menor porcentaje de EPDM siendo el 10% del total de

la mezcla, determinando una dureza de 61,71 y para la probeta que está hecha totalmente con Caucho Sintético, el valor de la dureza es de 76,6 siendo la máxima representada en este ensayo.

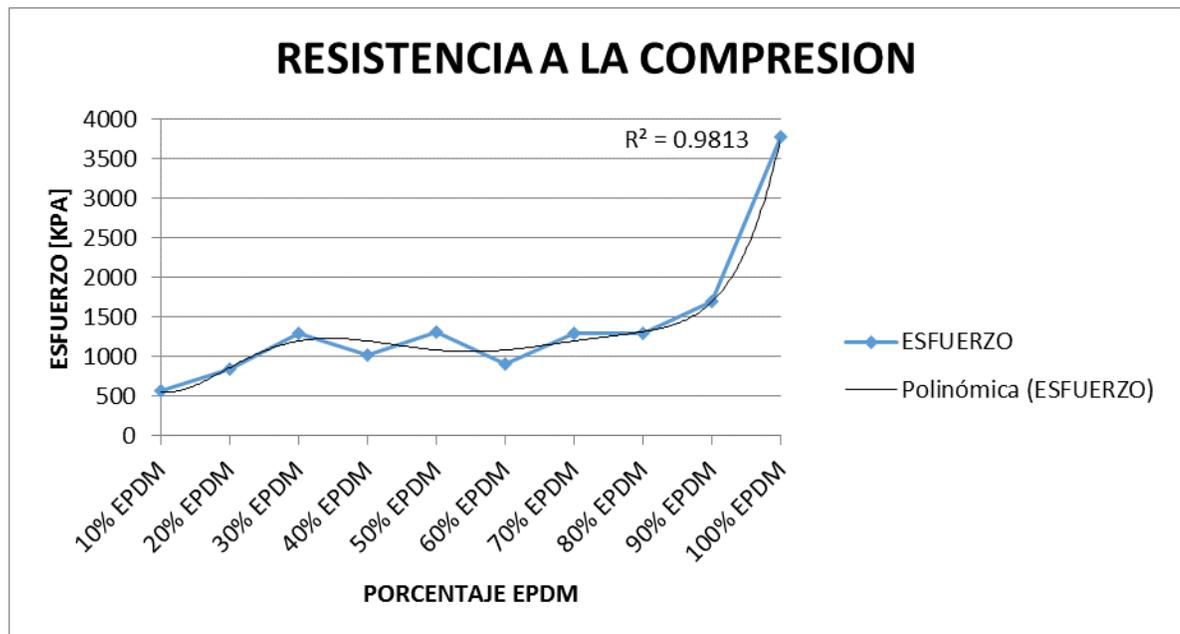
Se determina que la dureza es proporcional también al Negro de Humo que se le añade a la mezcla aunque a todas las probetas se le adicionó la misma cantidad (80gr) de este agente vulcanizante. Se obtuvo una ecuación polinomial de grado 6 cuyo valor de la curva de correlación es de 0.9739, aproximándose a un valor de tendencia real.

Para ver los detalles de los datos tabulados, ver Anexo A.

## 5.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En este ensayo se especifican las condiciones para determinar las características de deformación por compresión que tienen los Cauchos. Esta prueba se realizó con la Máquina Universal que se encuentra en el laboratorio de resistencia de materiales del edificio K de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.

Gráfica 2. Resistencia a compresión



Fuente: Autor.

En el análisis de la Gráfica 2, concerniente al ensayo a la compresión de las probetas, tomando el valor del esfuerzo a 10cm de deformación, se denota que a mayor porcentaje de Caucho Sintético EPDM, la resistencia a la compresión aumentó considerablemente, presentando picos descendentes en el 40 y 80% de EPDM, dando un esfuerzo mínimo de 565,6108 [KPA] con la probeta de 10% de caucho sintético y un valor de esfuerzo máximo de 12036.1991 [KPA] para la probeta con el 100% de caucho EPDM, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.9546 de la curva de correlación, con una ecuación polinomial de grado 6.

Los datos empleados en el análisis del ensayo a la compresión para Cauchos, se encuentran en el Anexo B.

### 5.3 CONSTRUCCIÓN DE LA VULCANIZADORA

La construcción de la vulcanizadora se efectuó tomando como referencia los planos presentados por un grupo de compañeros de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, los cuales se pueden observar en el Anexo C, pudiendo elaborar las diferentes probetas de diferentes composiciones de mezcla.

El ensamblaje de la vulcanizadora se observa en la Figura 19.

Figura 19. Vulcanizadora ensamblada



Fuente: autor.

## 6. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de los resultados referentes a las diferentes tipos de mezcla para la elaboración de las probetas y la construcción de la vulcanizadora se concluye lo siguiente:

- En la determinación de la dureza del caucho, se encontraron valores entre 61,71 y 76,6 siendo el primero el de menor porcentaje de mezcla de EPDM y el segundo, el de mayor cantidad. Se infiere que a mayor porcentaje de Caucho Sintético Etileno-Propileno-Dieno en la mezcla, la dureza de esta es mayor, hallando un coeficiente de correlación superior a 0.90, con una ecuación polinomial de grado 6 en la curva de correlación.
- Después de realizar algunas pruebas de mezclas de Caucho Hevea Brasiliensis y Hule Etileno-Propileno-Dieno (EPDM), se determinó que el tiempo de vulcanizado debe ser 15min, ya que después de este tiempo, la probeta se sobrecocina, perdiendo sus propiedades mecánicas como la dureza y resistencia.
- Se determinó que la cantidad ideal de Negro de Humo para el proceso de mezclado es el 10% del peso total de la mezcla de los dos cauchos, ya que con un porcentaje mayor, la mezcla no se homogeniza y se pulveriza.
- La cantidad de aditivos utilizados para elaborar las mezclas fue constante para cada una de las probetas. Este valor es el 18% del peso total de la mezcla, siendo el peso total anteriormente descrito de (976gr). El factor que influye en los resultados de las pruebas realizadas a las probetas es la cantidad de Caucho Sintético presente en las mismas.
- Al realizar la prueba de resistencia a la compresión, se determinó que a mayor porcentaje de Caucho Sintético EPDM, la resistencia es mayor, siendo el valor mínimo de esfuerzo 565.61 [KPA], en la probeta con el 10% de Caucho Sintético y su valor máximo de 3778.28 [KPA], en la probeta con el 100% de Hule Sintético EPDM. Estos valores de esfuerzo, fueron tomados a 0.1m de desplazamiento. Observando que entre los valores del 30 al 70% de contenido de caucho sintético EPDM, estos no aumentan proporcionalmente con la fuerza aplicada, por lo cual no se obtiene una correlación acertada, ya que harían falta más pruebas de resistencia a la compresión en cada porcentaje de caucho sintético, que verifiquen dichos valores.
- Se realizó la construcción y prueba de una vulcanizadora funcional, utilizando los planos detallados que se obtuvieron del diseño de este equipo a través del

proyecto de grado de dos estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, con la cual se fabricaron 10 probetas de diferentes porcentajes de mezcla de Caucho Natural Heveas Brasiliensis y Caucho Sintético EPDM, realizando posteriormente los ensayos de dureza Shore y resistencia a la compresión.

## 7. RECOMENDACIONES

Para la manipulación de las máquinas vulcanizadora y laminadora de Caucho que se emplearon en la elaboración de las probetas, de igual manera con los acelerantes y aditivos que se manipularon, se establecen las siguientes recomendaciones:

- Para realizar un trabajo seguro en la máquina laminadora, se debe realizar con camisa manga corta ya que las mangas pueden atorarse en los rodillos o los piñones y lastimar al operario.
- Para la optimización y mejoramiento en la obtención de las probetas, se recomienda hacer moldes intercambiables en la vulcanizadora, pues al retirar la probeta caliente y enfrentarse al aire ambiente, sufre un choque térmico lo cual afecta las propiedades mecánicas de la mezcla.
- Se podría mejorar el diseño de la vulcanizadora instalando un refuerzo en el perfil de soporte, ya que este sufre grandes cargas y tiende a desplazarse horizontalmente al activar el cilindro hidráulico.
- Realizar el proceso de mezclado en un ambiente cerrado debido a que los residuos y pérdida de material son en ocasiones molestos y evidentes, además, el acelerante MBT es tóxico y puede generar alteraciones en la salud de quienes manipulen estos elementos.
- Operar con responsabilidad las máquinas, haciendo uso elementos de protección personal (EPPs), pues en el proceso de mezclado y vulcanizado se manejan grandes fuerzas y altas temperaturas que pueden lastimar al operario.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Procesos básicos de manufactura, de H. C. Kazanas, genn E. Backer, Thomas Gregor. Mc Graw Hill.
- [2]. Blow C.M. "Rubber Technology and Manufacture" published for the institution of rubber industry newness – butterworts London. England. (1971)
- [3]. Bolz. R—Tuve.G. Crc handbook of tables for applied engineering science. 1 ed. Cleveland. Oh.1973.
- [4]. Morton, M. Rubber Technology. 2ª edición; Editorial Van Nostrand Reinolds. New York, 603. (1981)
- [5]. Ismail, H and Mega, L. The effects of a compatibilizer and a Silane Coupling Agent on the Mechanical Properties of White Rice Husk Ash filled Polypropylene/Natural Rubber Blend. Polym. –Plast. Technol. Eng., Vol 40, 463-478 (2001)
- [6]. J. W. M, Noordermer. Standarization of EPDM Characterization Test for QC and Specification Purposes. Rubber World, Vol 216, 18-22 (1997)
- [7]. Royo, Joaquín. Manual de tecnología del caucho. 2º Ed. Consorcio Nacional de Industrias Del Caucho. Barcelona.439.
- [8]. Barlow. F.Rubber compounding and techniques.2 ed. New york. Marcel dekker.1993.
- [9]. Morton, M, Ed. Rubber technology. 2ed. New york: Van nostrand reinhold. 1973.
- [10]. Kumar, Anil. Fundaments of Polymer Science and Engineering, Editorial McGraw Hill. New Delhi. (1978).
- [11]. Wake, W .Analysis of rubber and rubber.1 ed. London.1958.
- [12]. Brydson, J.A. Rubber Materials and Their Compounds. Editorial Elsevier, Londres. (1988)
- [13]. Hua Huang, Junling Yang, Xin Liu y Yinxi Zhang. Dynamically vulcanized ethylene propylene diene terpolymer/nylon thermoplastic elastomers. European Polymer Journal, Vol 38, 857-861 (2002)
- [14]. Ismail, H; Mega, L. And Khalil, Abdul. Effect of Silane Coupling Agent on the Properties of White Rice Husk Ash- Polypropylene/Natural Rubber Composites. Polymer International, Vol 50, 606-611 (2001)

- [15]. S. H. El-Sabbagh. Compatibility study of natural rubber and ethylene-propylene diene rubbers blends. Vol 22, 93-100 (2003)
- [16]. Ramos J – Sanchez S. Vulcanización y formulación de hules. I. Mexico. Limusa noriega editores . 2003
- [17]. Hofman, Werner. Vulcanization and Vulcanizing Agents. Mc Laren & Son. Gran Bretaña. 371, (1967)
- [18]. Naunton. W. J. S. Ciencia y tecnología del caucho. Mexico : cec sa, 1967.
- [19]. Fath, Michael A. Tech Service. (rubber cure system)(part four of a five-part series). Rubber World, Vol 209, 18-23 (1994)
- [20]. Zlata Hrnjak Murgic, Jasenka Jelencil, Leonard Murjic, The mechanism of triallylcianurate as coagent in EPDM peroxide vulcanization, Polymer Engineering and Science, Vol 38, 689-692 (1998)

## ANEXO A.

Tablas de dureza Shore para cada mezcla de caucho natural y sintético.

Tabla 2. Valor de Dureza Probeta1 80gr EPDM

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	71.6	65.7	60.1	60.9	56.2	69.2	67.2	64.4	56.6	69.5
2	70.9	51.3	55	60.4	64.2	57.7	70.2	67.1	67.1	47.9
3	74.5	59.6	58.5	56	54.6	34.8	71.1	64.4	57.5	59.6
4	69.2	54.6	55.5	52.8	59	62.9	68.9	58.4	61.9	66.2
5	72.1	62.8	64.2	61.9	53.1	63.5	69.7	62.9	59.3	66.4
PROMEDIO	71.6	58.8	58.6	58.4	57.4	57.6	69.4	63.4	60	61.9
PROMEDIO TOTAL	61.71									

Fuente: Autor.

Tabla 3. Valor de Dureza Probeta2 160gr EPDM

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	62.4	62.5	63.4	63.1	62.5	61.2	61.4	61.9	62.9	62.7
2	53.7	62.4	63.5	63.2	62.2	61.9	63.1	62.8	62.8	63.1
3	54.1	62.2	62.7	63.7	62.6	62.8	63.4	59.3	62.7	62.9
4	63.6	62.7	62.9	62.7	62.7	63.2	62.7	61.7	62.1	62.7
5	61.9	62.5	62.4	63.3	63.2	62.6	62.5	62	63.2	63.2
PROMEDIO	59.14	62.46	62.98	63.2	62.64	62.34	62.62	61.54	62.74	62.92
PROMEDIO TOTAL	62.258									

Fuente: Autor.

Tabla 4. Valor de Dureza Probeta3 240gr EPDM

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	63.3	66.1	63.3	64.3	63.9	63.1	62.3	63.8	63.4	62.7
2	64.2	63.5	62.4	63.8	63.9	62.5	63.7	62.6	62.7	63
3	63.9	62.9	64.1	62.4	63.5	63.9	63.7	62.6	63.7	62.3
4	62.2	63.6	63.3	63.1	62.2	62.3	62.1	62.9	62.9	63.2
5	63.2	63.6	62.4	63.1	63.6	63.7	63	63.2	63.7	63.3
PROMEDIO	63.36	63.94	63.1	63.34	63.42	63.1	62.96	63.02	63.28	62.9
PROMEDIO TOTAL	63.242									

Fuente: Autor.

Tabla 3. Valor de Dureza Probeta 4 320 gr. Epdm.

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	73,1	65,2	64,6	69,5	67,9	60,1	74,0	74,7	72,6	72,2
2	73,3	69,4	64,4	68,9	68,5	69,7	73,3	72,4	68,1	74,5
3	73,5	66,7	65,2	70,2	69,1	69,9	72,4	71,9	73,1	72,2
4	73,3	67,4	66,7	70,5	69,1	69,5	72,8	69,1	70,9	73,1
5	73,3	70,2	67,7	65,7	69,2	71,2	73,8	72,4	71,4	74,0
PROMEDIO	73.3	67.7	65.6	68.9	68.3	68	73.2	72.1	71.2	73.2
PROMEDIO TOTAL	70.15									

Fuente: Autor.

Tabla 4. Valor de Dureza Probeta 5. 400 gr epdm

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	69,4	68,1	69,5	65,7	67,4	72,6	70,5	70,2	73,3	71,9
2	69,7	71,8	70,4	66,5	66,9	73,1	70,5	69,1	73,3	71,8
3	70,4	70,1	70,9	66,9	67,4	71,6	70,7	70,2	73,1	71,9
4	70,5	67,5	71,1	66,9	67,9	71,9	69,9	70,1	72,9	71,6
5	70,9	68,4	71,2	67,7	69,9	71,4	69,7	70,4	72,8	71,9
PROMEDIO	70.1	69.3	70.7	66.7	67.9	72.1	70.2	70	73	71.8
PROMEDIO TOTAL	70.18									

Fuente: Autor.

Tabla 5. Valor de Dureza Probeta 6. 480 gr. Epdm

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	76,3	77,3	70,2	66,9	75,4	62,0	67,7	66,5	71,6	68,7
2	78,4	78,1	73,8	71,1	79,5	72,9	71,4	69,9	72,0	73,5
3	75,7	76,1	74,0	73,7	79,1	68,7	71,1	70,4	72,6	72,6
4	78,1	75,7	75,2	73,3	78,1	68,4	70,4	71,4	69,9	68,4
5	77,5	75,6	75,7	74,2	77,1	73,3	70,1	74,4	70,5	68,1
PROMEDIO	77.2	76.5	73.7	71.7	77.8	69	70.1	70.5	71.3	70.2
PROMEDIO TOTAL	72.8									

Fuente: Autor.

Tabla 6. Valor de Dureza Probeta 7. 560 gr. Epdm

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	74,3	68,5	72,2	75,2	73,8	74,0	70,4	74,7	70,9	69,9
2	73,3	72,6	72,6	74,3	74,5	75,0	70,2	74,2	73,1	74,2
3	76,4	61,0	72,9	72,1	75,2	76,3	65,7	73,6	70,9	73,1
4	76,3	74,2	72,1	72,6	74,9	76,6	68,5	74,3	73,3	72,1
5	75,9	72,1	73,3	73,8	74,2	74,2	66,2	74,3	70,5	72,2
PROMEDIO	75.2	69.6	72.6	73.6	74.5	75.2	68.2	74.2	71.7	72.3
PROMEDIO TOTAL	72.71									

Fuente: Autor.

Tabla 7. Valor de Dureza Probeta 8. 640gr Epdm

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	74,9	68,9	72,6	75,8	74,8	75,0	71,4	75,7	71,9	70,9
2	73,7	72,9	73,5	74,8	75,5	76,0	71,2	75,2	74,1	75,2
3	76,9	61,8	73,6	72,8	76,2	77,3	66,7	74,6	71,9	74,1
4	76,8	74,8	73,3	72,7	75,9	77,6	69,5	75,3	74,3	73,1
5	76,9	72,9	74,2	73,9	75,2	75,2	67,2	75,3	71,5	73,2
PROMEDIO	76.2	70.6	73.6	74.6	75.5	76.2	69.2	75.2	72.7	73.3
PROMEDIO TOTAL	73.91									

Fuente: Autor.

Tabla 8. Valor de Dureza Probeta 9. 720gr. Epdm

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	72,8	71,1	71,1	70,1	77,9	72,9	69,2	70,9	70,5	73,6
2	74,2	73,3	71,9	72,2	77,0	74,9	70,1	70,9	73,8	74,0
3	75,2	72,9	71,6	72,4	73,3	75,0	73,8	73,8	71,1	72,2
4	75,2	72,1	71,6	73,3	73,3	75,4	74,2	68,7	73,8	72,2
5	75,0	71,2	72,2	73,5	73,5	75,4	73,8	74,1	73,8	72,8
PROMEDIO	74.4	72.1	71.6	72.3	75	74.7	72.2	71.8	72.6	72.9
PROMEDIO TOTAL	72.96									

Fuente: Autor.

Tabla 9. Valor de Dureza Probeta 10. 800 gr. Epdm

PRUEBA	PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8	PUNTO 9	PUNTO 10
1	77,5	74,2	76,3	76,3	76,3	78,6	78,9	75,2	76,8	78,1
2	77,9	75,0	76,4	76,8	76,1	77,0	79,5	74,5	77,3	75,7
3	78,6	75,4	74,5	78,1	76,1	72,9	79,3	73,8	78,4	76,6
4	78,6	75,2	77,1	78,6	75,0	72,2	79,4	74,5	78,1	77,0
5	78,8	76,1	72,9	78,1	78,1	78,2	80,2	74,2	77,5	79,3
PROMEDIO	78.2	75.1	75.4	77.5	76.3	74.7	79.5	74.4	77.6	77.3
PROMEDIO TOTAL	76.6									

Fuente: Autor.

## ANEXO B.

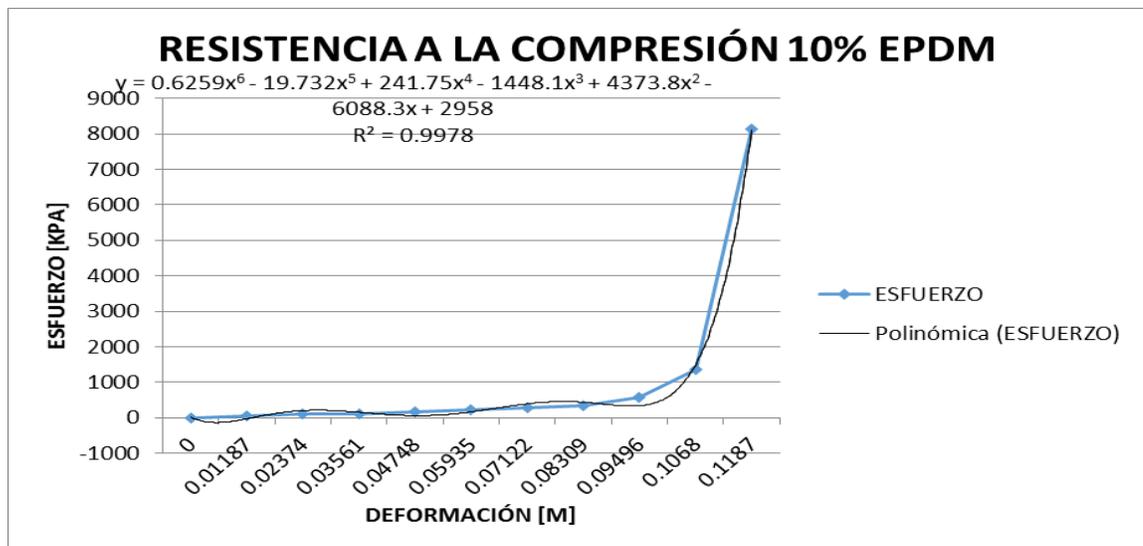
Tablas de resistencia a la compresión para cada mezcla de caucho natural y sintético.

Tabla 10. Resistencia a la compresión 10% EPDM.

10% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACIÓN (M)
0	0	0
0.2	45.24886878	0.01187
0.5	113.1221719	0.02374
0.5	113.1221719	0.03561
0.7	158.3710407	0.04748
1	226.2443439	0.05935
1.2	271.4932127	0.07122
1.5	339.3665158	0.08309
2.5	565.6108597	0.09496
6	1357.466063	0.1068
36	8144.79638	0.1187

Fuente 1: Autor.

Gráfica 3. Resistencia a la compresión 10% EPDM



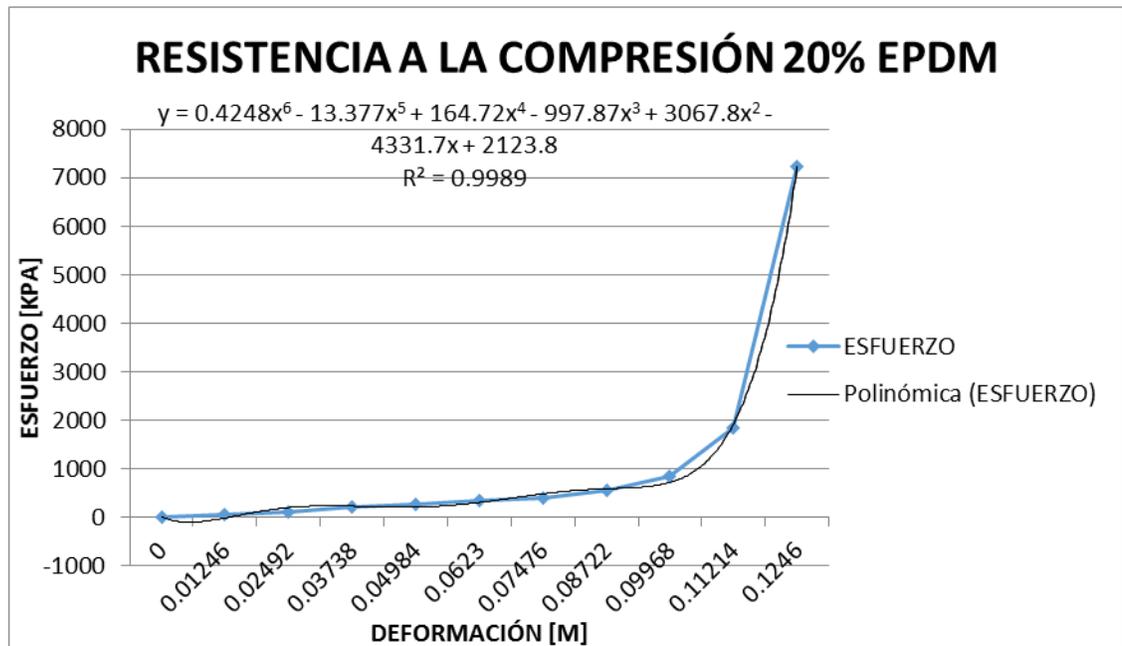
Fuente: Autor.

Tabla 11. Resistencia a la compresión 20% EPDM.

20% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACIÓN [M]
0	0	0
0.2	45.24886878	0.01246
0.5	113.1221719	0.02492
1	226.2443439	0.03738
1.2	271.4932127	0.04984
1.5	339.3665158	0.0623
1.7	384.6153846	0.07476
2.5	565.6108597	0.08722
3.7	837.1040724	0.09968
8.2	1855.20362	0.11214
32	7239.819005	0.1246

Fuente: Autor.

Gráfica 4. Resistencia a la compresión 20% EPDM



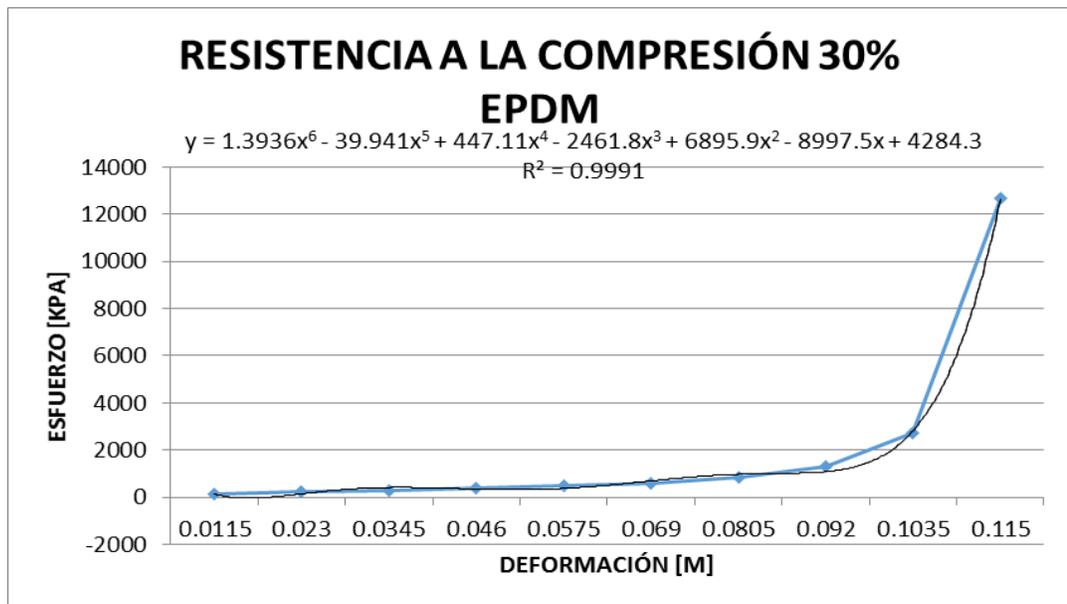
Fuente: Autor.

Tabla 12. Resistencia a la compresión 30% EPDM.

30% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACIÓN [M]
0	0	0
0.5	113.1221719	0.0115
1	226.2443439	0.023
1.2	271.4932127	0.0345
1.7	384.6153846	0.046
2.2	497.7375566	0.0575
2.7	610.8597285	0.069
3.7	837.1040724	0.0805
5.7	1289.59276	0.092
12	2714.932127	0.1035
56	12669.68326	0.115

Fuente: Autor.

Gráfica 5. Resistencia a la compresión 30% EPDM



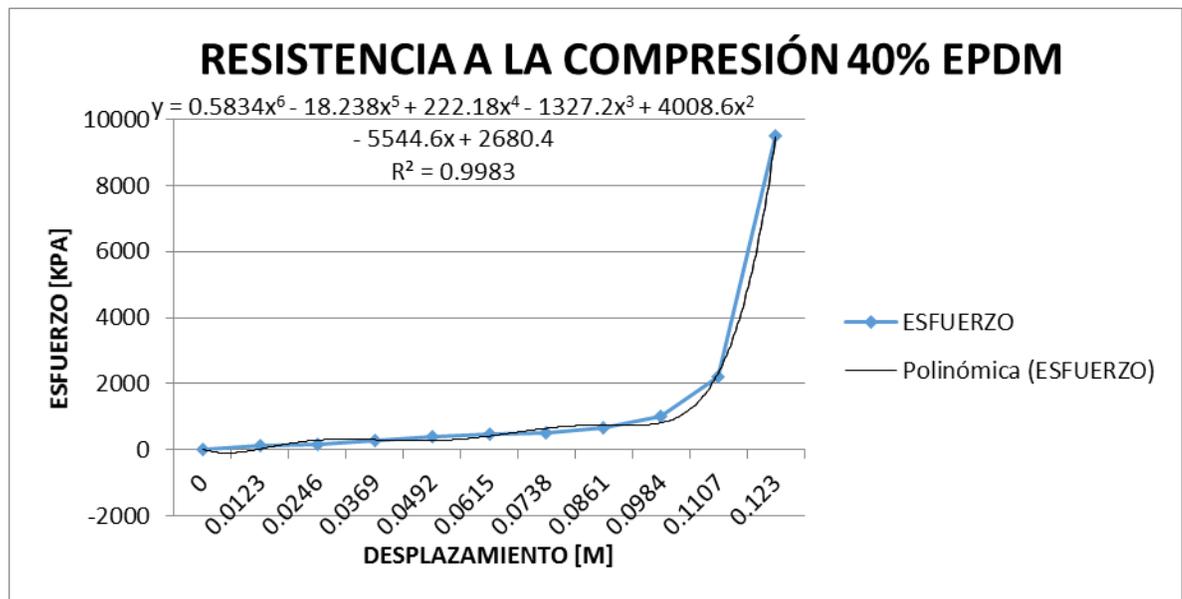
Fuente: Autor.

Tabla 13. Resistencia a la compresión 40% EPDM.

40% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACION [M]
0	0	0
0.5	113.1221719	0.0123
0.7	158.3710407	0.0246
1.2	271.4932127	0.0369
1.7	384.6153846	0.0492
2	452.4886878	0.0615
2.2	497.7375566	0.0738
3	678.7330317	0.0861
4.5	1018.099548	0.0984
9.7	2194.570136	0.1107
42	9502.262443	0.123

Fuente: Autor.

Gráfica 6. Resistencia a la compresión 40% EPDM



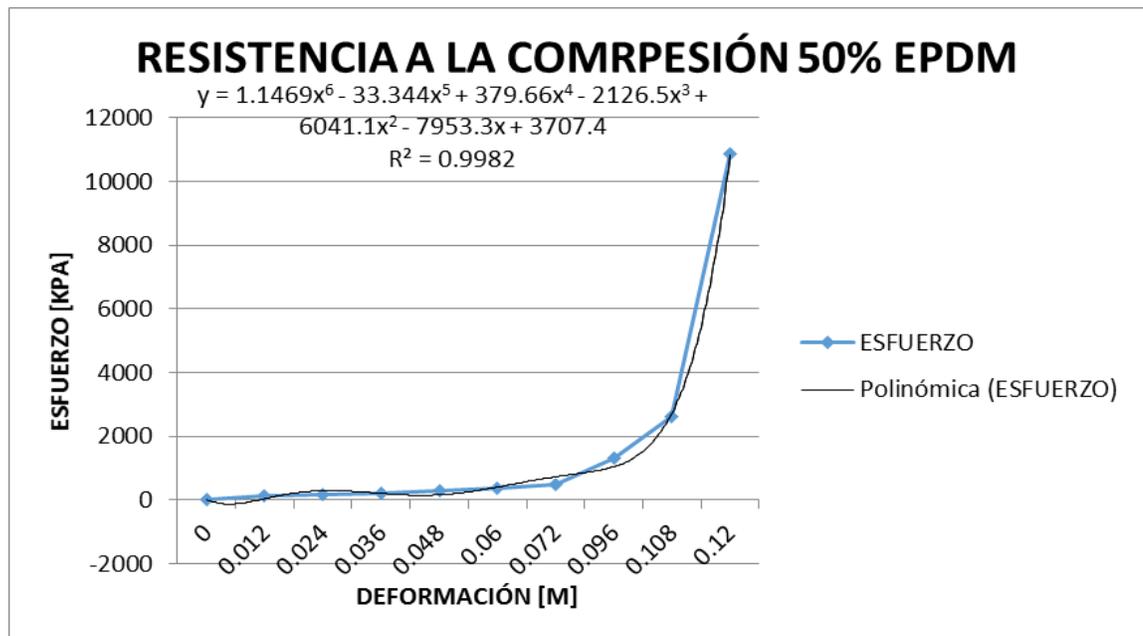
Fuente: Autor.

Tabla 14. Resistencia a la compresión 50% EPDM.

50% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACION [M]
0	0	0
0.5	113.1221719	0.012
0.7	158.3710407	0.024
1	226.2443439	0.036
1.2	271.4932127	0.048
1.7	384.6153846	0.06
2.2	497.7375566	0.072
5.8	1312.217195	0.096
11.5	2601.809955	0.108
48	10859.72851	0.12

Fuente: Autor.

Gráfica 7. Resistencia a la compresión 50% EPDM



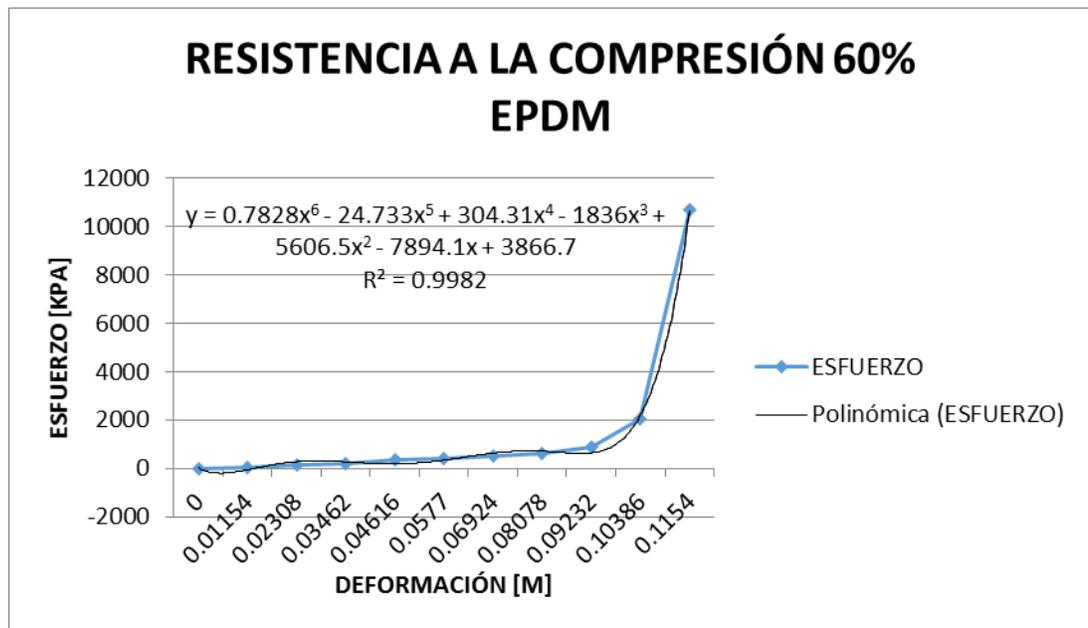
Fuente: Autor.

Tabla 15. Resistencia a la compresión 60% EPDM.

60% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACION [M]
0	0	0
0.2	45.24886878	0.01154
0.7	158.3710407	0.02308
1	226.2443439	0.03462
1.5	339.3665158	0.04616
1.7	384.6153846	0.0577
2.2	497.7375566	0.06924
2.7	610.8597285	0.08078
4	904.9773756	0.09232
9	2036.199095	0.10386
47.2	10678.73303	0.1154

Fuente: Autor.

Gráfica 8. Resistencia a la compresión 60% EPDM



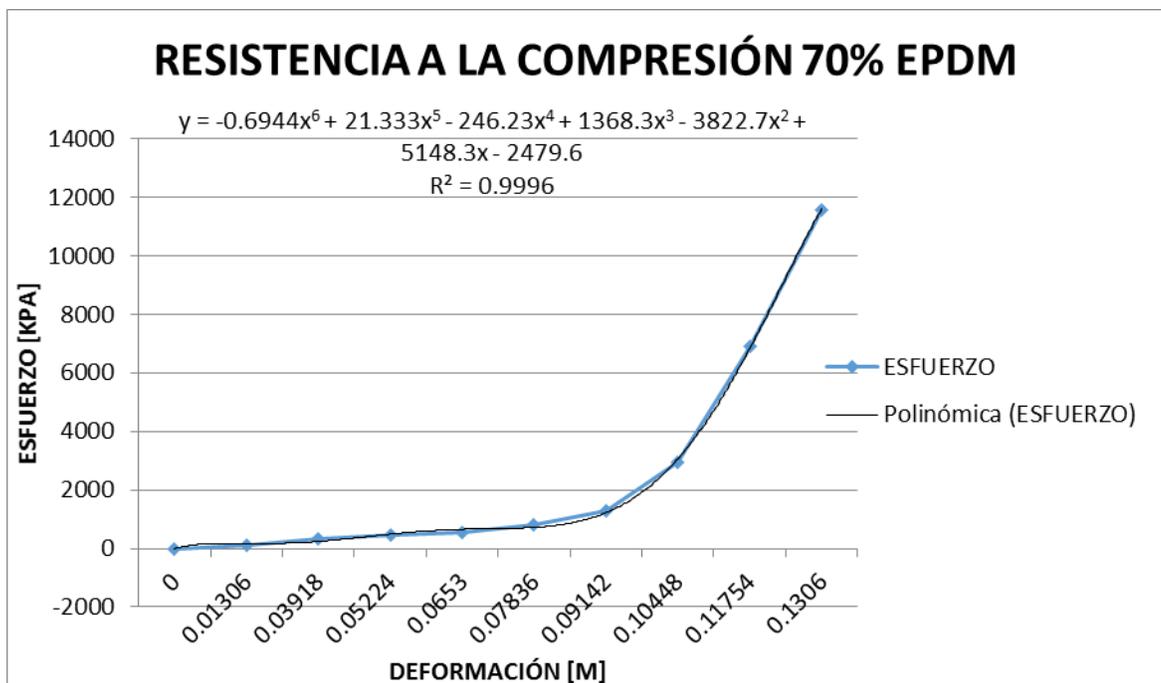
Fuente: Autor.

Tabla 16. Resistencia a la compresión 70% EPDM.

70% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACION [M]
0	0	0
0.5	113.1221719	0.01306
1.5	339.3665158	0.03918
2	452.4886878	0.05224
2.5	565.6108597	0.0653
3.5	791.8552036	0.07836
5.7	1289.59276	0.09142
13	2941.176471	0.10448
30.5	6900.452489	0.11754
51.2	11583.71041	0.1306

Fuente: Autor.

Gráfica 9. Resistencia a la compresión 70% EPDM



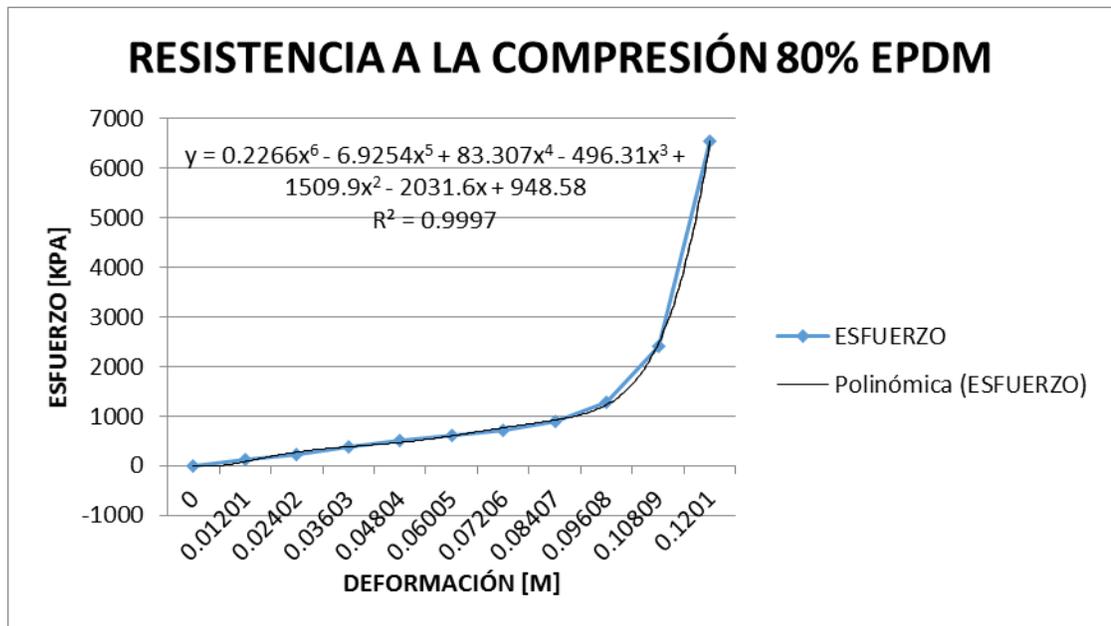
Fuente: Autor.

Tabla 17. Resistencia a la compresión 80% EPDM.

80% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACION [M]
0	0	0
0.5	113.1221719	0.01201
1	226.2443439	0.02402
1.7	384.6153846	0.03603
2.2	497.7375566	0.04804
2.7	610.8597285	0.06005
3.2	723.9819005	0.07206
4	904.9773756	0.08407
5.7	1289.59276	0.09608
10.7	2420.81448	0.10809
28.9	6538.461538	0.1201

Fuente: Autor.

Gráfica 10. Resistencia a la compresión 80% EPDM



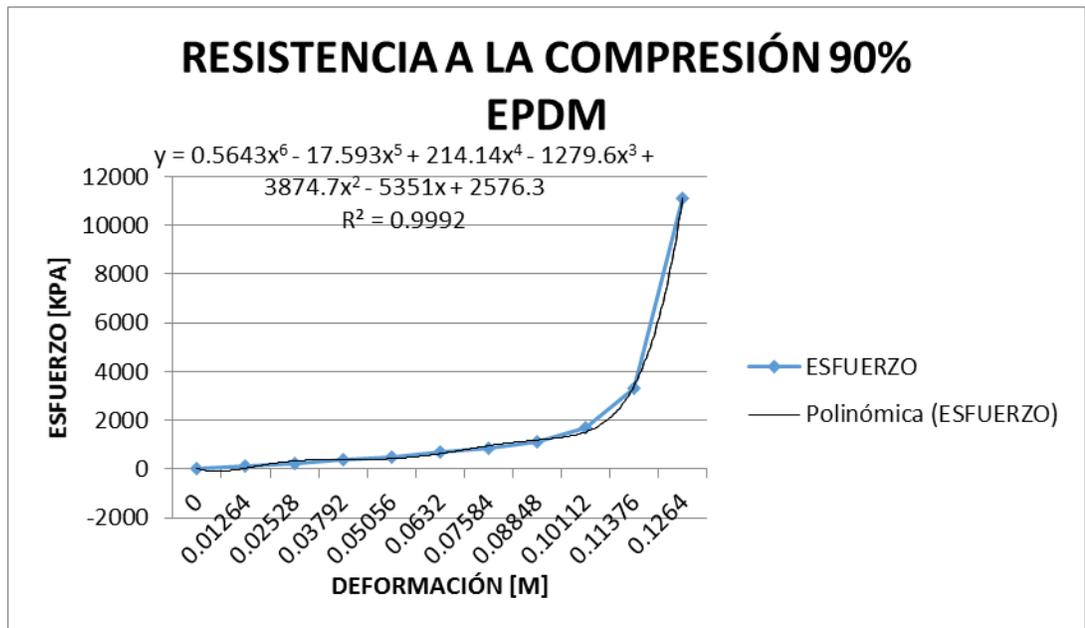
Fuente: Autor.

Tabla 18. Resistencia a la compresión 90% EPDM.

90% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACION [M]
0	0	0
0.5	113.1221719	0.01264
1	226.2443439	0.02528
1.7	384.6153846	0.03792
2.2	497.7375566	0.05056
3	678.7330317	0.0632
3.7	837.1040724	0.07584
5	1131.221719	0.08848
7.5	1696.832579	0.10112
14.7	3325.791855	0.11376
49.2	11131.22172	0.1264

Fuente: Autor.

Gráfica 11. Resistencia a la compresión 90% EPDM



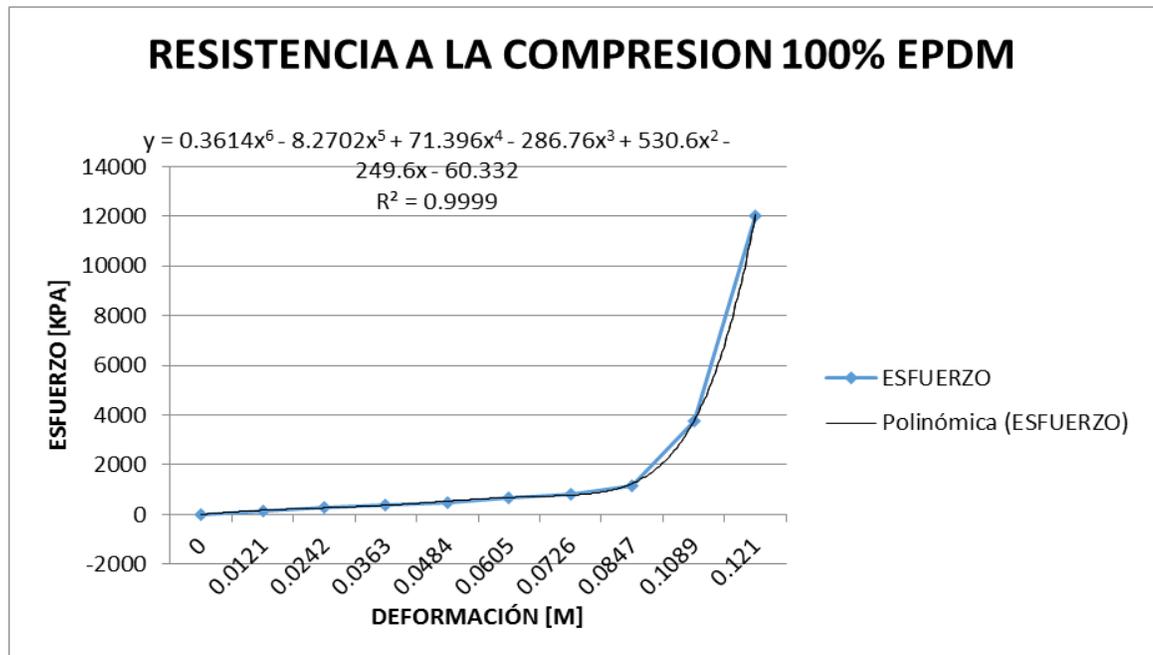
Fuente: Autor.

Tabla 19. Resistencia a la compresión 100% EPDM.

100% EPDM		
FUERZA KN	ESFUERZO [KPA]	DEFORMACION [M]
0	0	0
0.7	158.3710407	0.0121
1.2	271.4932127	0.0242
1.7	384.6153846	0.0363
2.2	497.7375566	0.0484
3	678.7330317	0.0605
3.7	837.1040724	0.0726
5.2	1176.470588	0.0847
16.7	3778.280543	0.1089
53.2	12036.1991	0.121

Fuente: Autor.

Gráfica 12. Resistencia a la compresión 100% EPDM

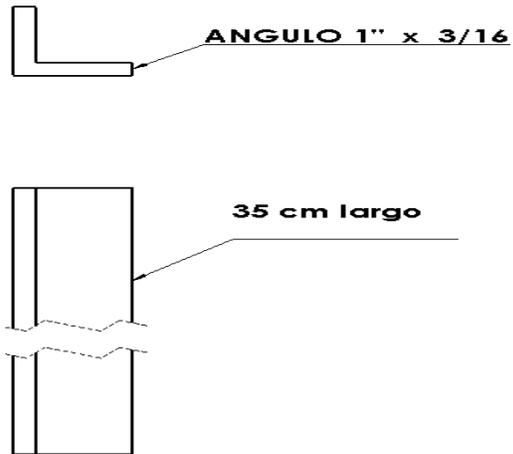


Fuente: Autor.

## ANEXO C.

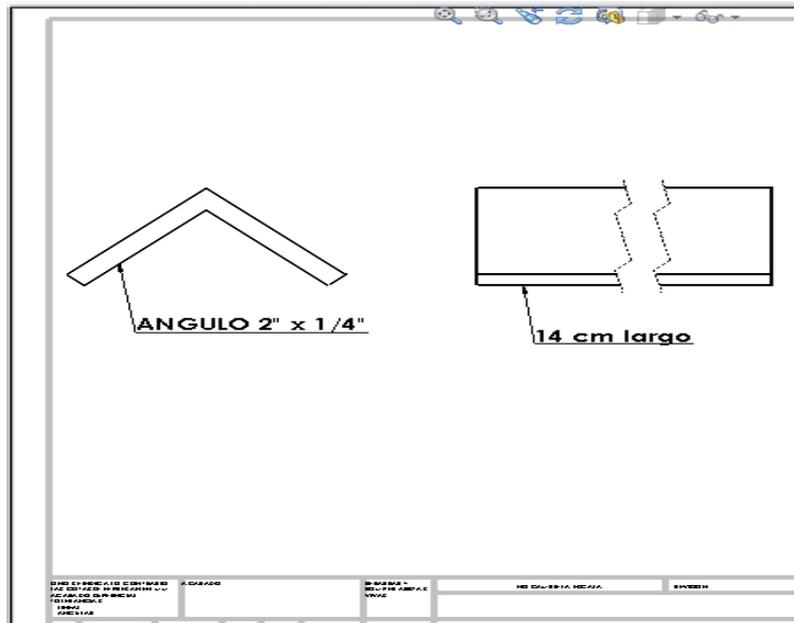
Planos diseño de vulcanizadora.

Figura 20. Planos diseño vulcanizadora 1



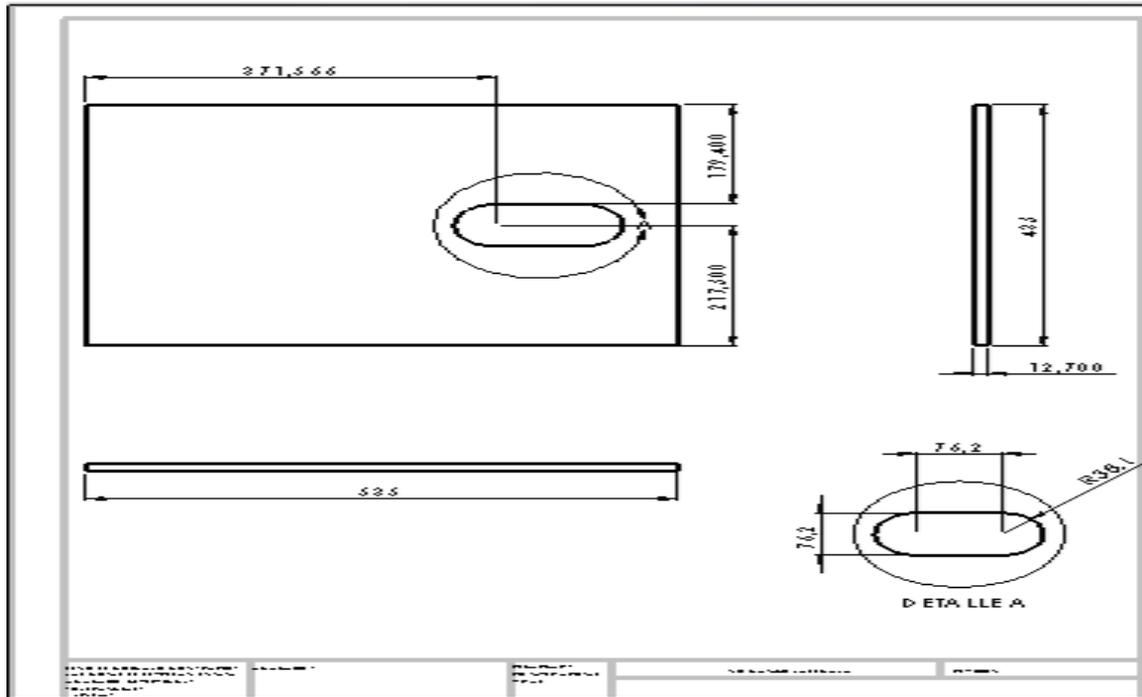
Fuente: Autor.

Figura 21. Planos vulcanizadora 2



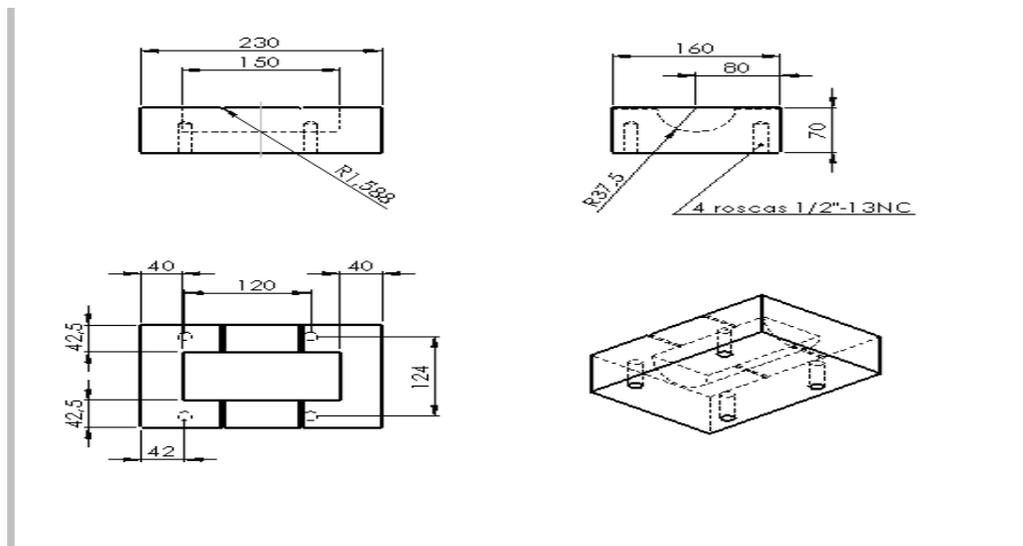
Fuente: autor.

Figura 22. Planos Vulcanizadora 3



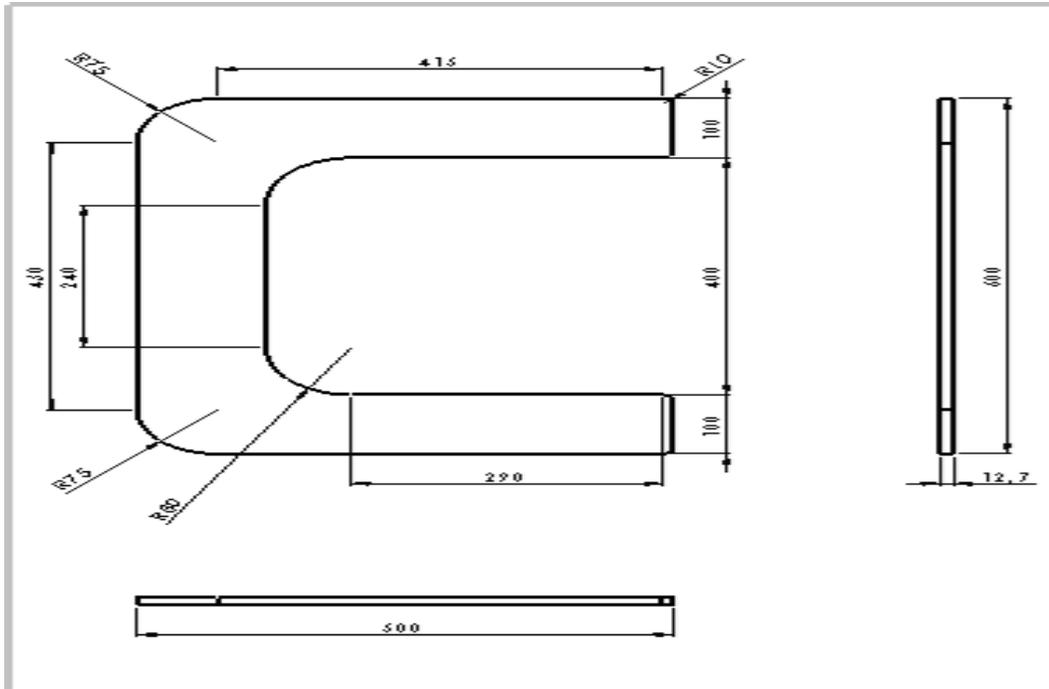
Fuente: Autor.

Figura 23. Planos vulcanizadora 4



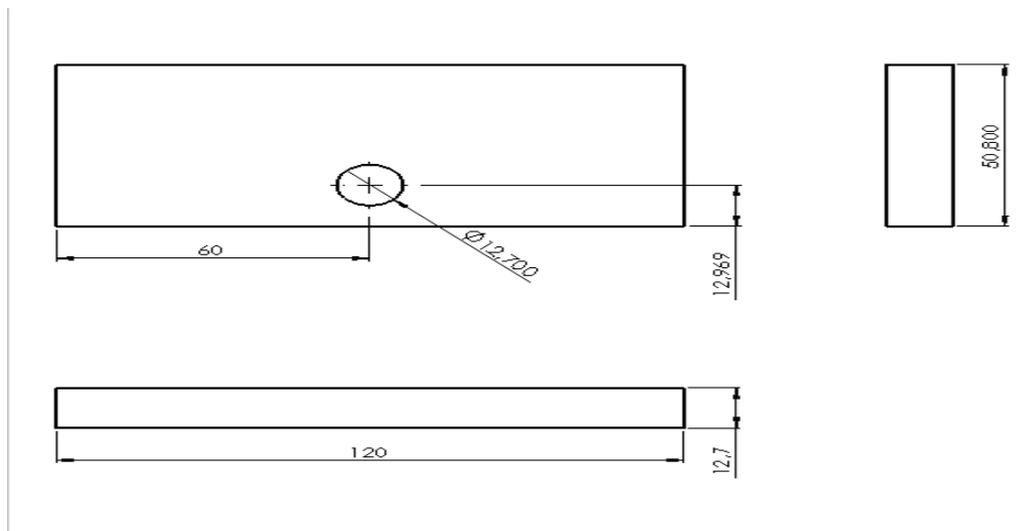
Fuente: Autor.

Figura 24. Planos vulcanizadora 5



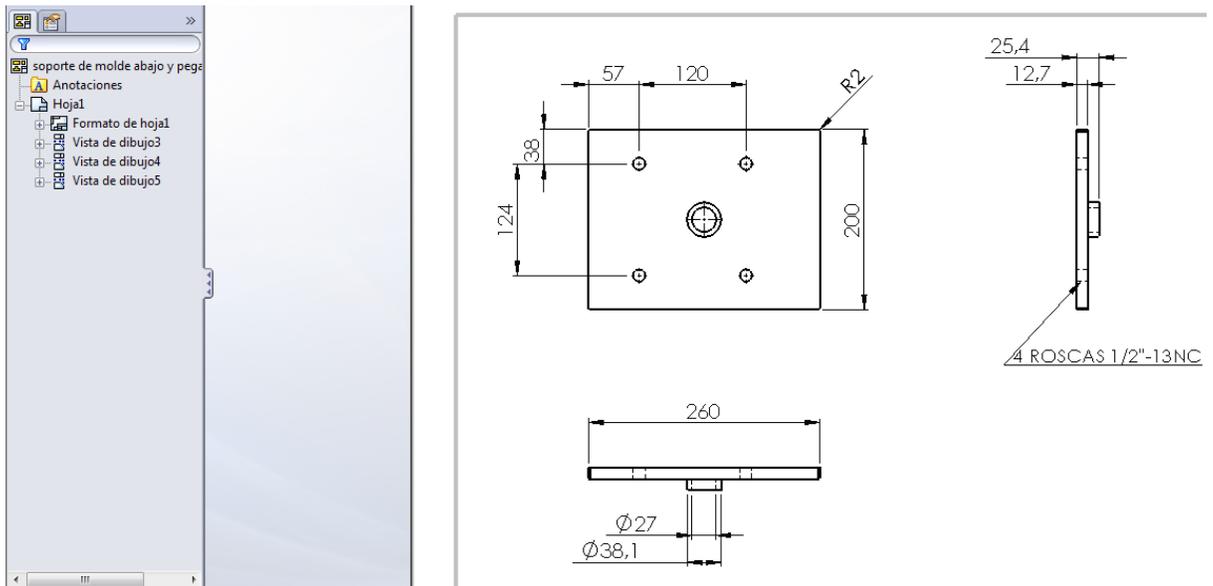
Fuente: Autor.

Figura 25. Plano vulcanizadora 6



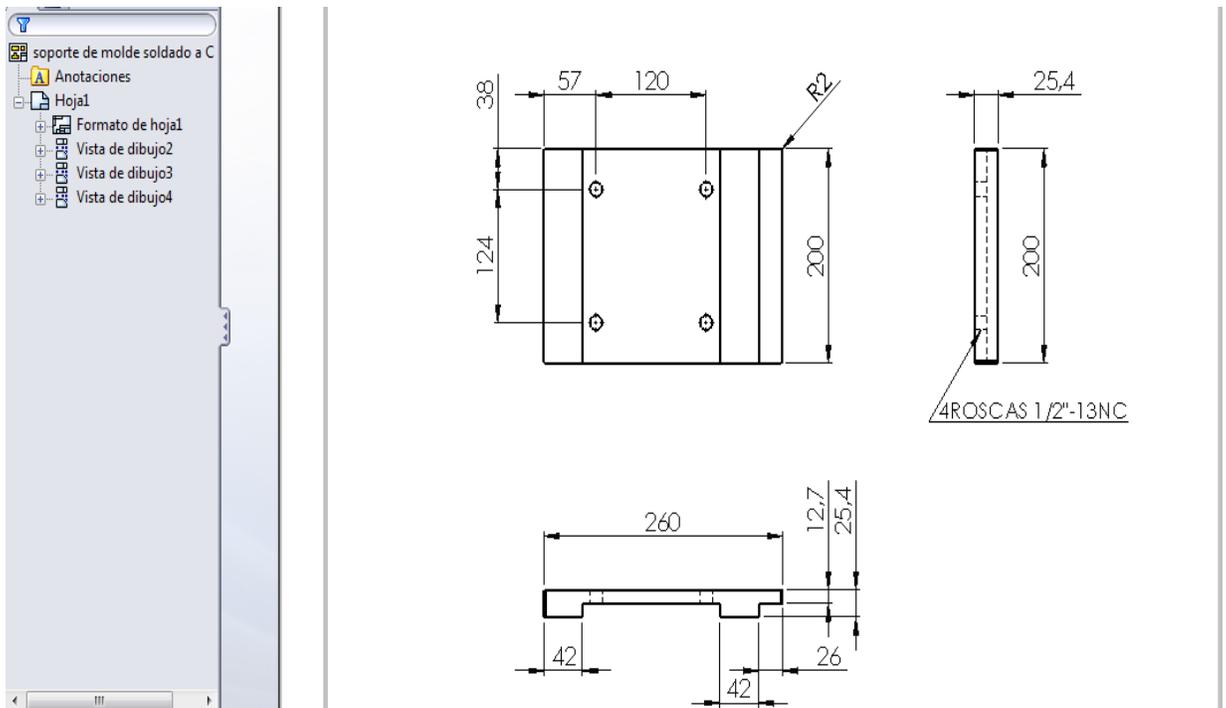
Fuente: Autor.

Figura 26. Plano vulcanizadora 7



Fuente: Autor.

Figura 27. Plano vulcanizadora 8

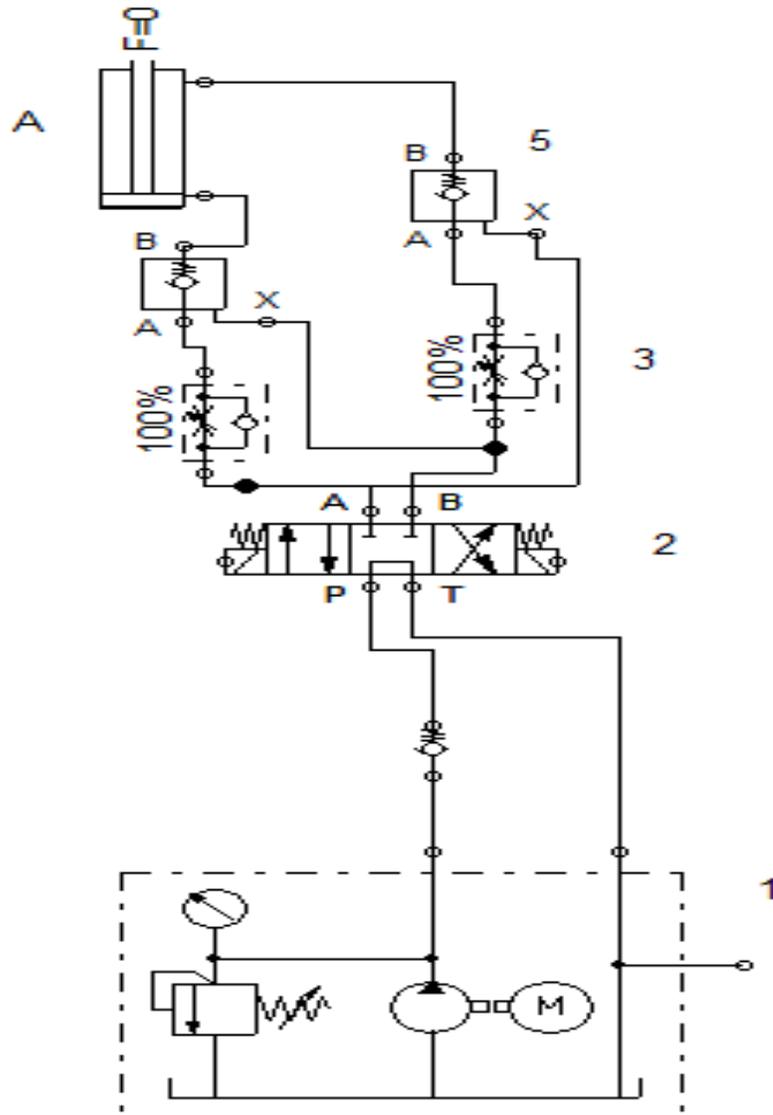


Fuente: Autor.

## ANEXO D.

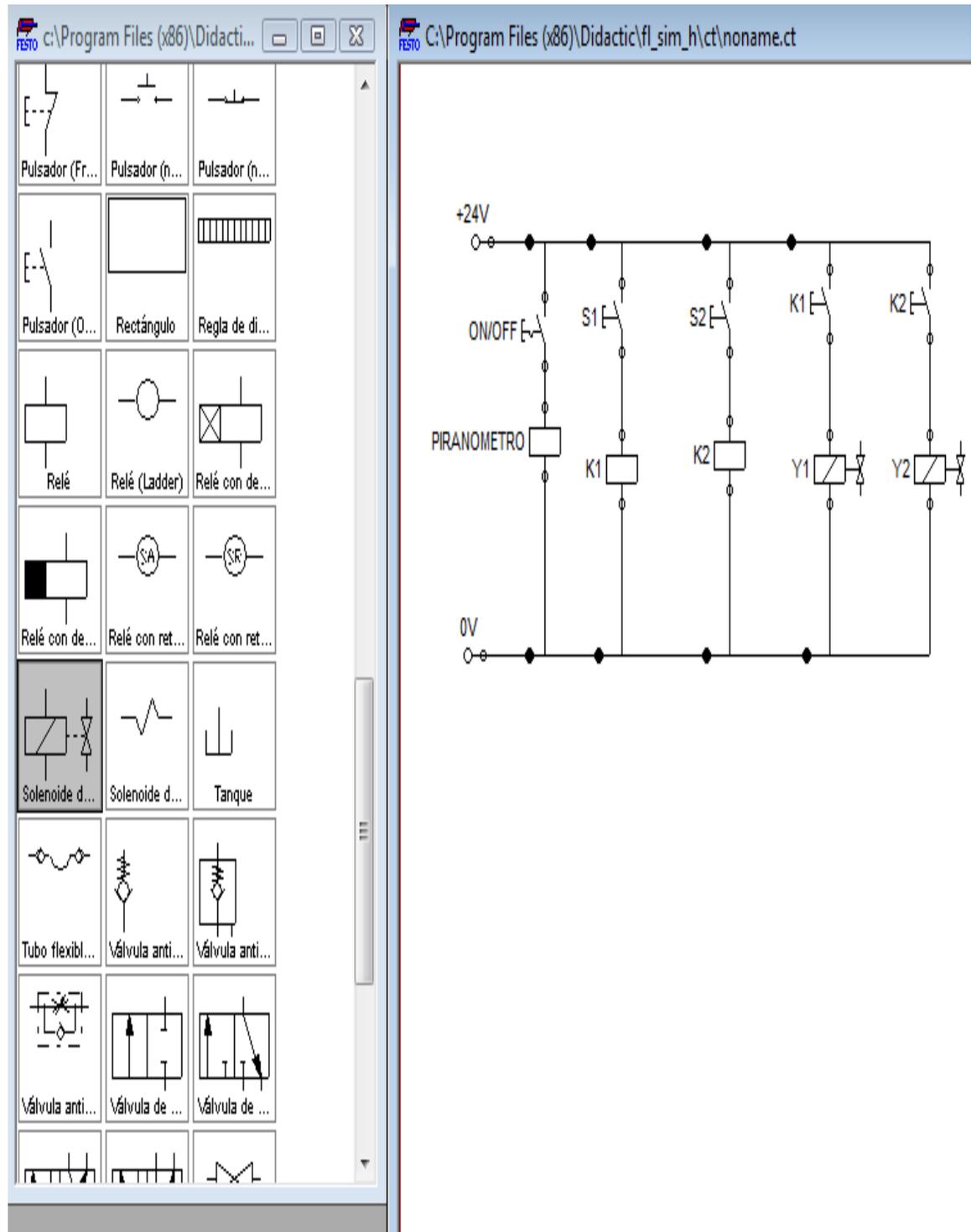
Planos sistema hidráulico y eléctrico vulcanizadora de caucho.

Figura 28. Sistema hidráulico vulcanizadora fluid sim



Fuente: Autor.

Figura 29. Sistema eléctrico vulcanizadora fluid sim



Fuente: Autor.