

**DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE
MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ESTIRENO –
BUTADIENO (SBR)**

Autores:

**ANDRES FABIAN SERRANO JAIME
JHON JAIRO ZAMBRANO MORENO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ING. MECÁNICA
FLORIDABLANCA
2014**

**DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE
MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ESTIRENO –
BUTADIENO (SBR)**

Autores:

**ANDRES FABIAN SERRANO JAIME
JHON JAIRO ZAMBRAMO MORENO**

Aspirantes al título de ingeniero mecánico

Proyecto de grado

Director, profesor:

Alfonso Santos Jaime

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ING. MECÁNICA
FLORIDABLANCA**

2014

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 20 de enero de 2014

DEDICATORIA

Este libro deseo dedicárselo sobre todo a mi familia que tanto me ha apoyado no solo en la carrera si no en todos los aspectos de mi vida en especial a mi padre Agapito Serrano, a mi Madre María del Pilar Jaime y a mi hermana Andrea Serrano, a mis amigos y compañeros que siempre estuvieron a mi lado en las buenas y en las malas apoyándome para salir adelante y nunca dejarme rendir, a todos ellos muchas gracias.

(Serrano, Andrés)

DEDICATORIA

Principalmente deseo dedicar este proyecto a Dios, por ser mi guía y apoyo en este proceso de formación, por sus bendiciones y su gran amor. A mis padres Jairo Zambrano y Claudia Moreno, por su ejemplo de vida, apoyo, consejos y amor. A mi hermana Marcela Zambrano por su paciencia y cariño. A mis familiares y personas que alguna forma me apoyaron para obtener este logro.

(Zambrano, Jhon)

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento principalmente a Dios por darnos la oportunidad de terminar este proyecto, por sus bendiciones y amor.

Se agradece a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga por su apoyo económico, para la realización de este proyecto, y personal de servicios generales.

Al ingeniero Alfonso Santos Jaimes por su gran colaboración y apoyo para la creación, realización y culminación de este proyecto.

A los señores, Octavio Morales, Audin y Jairo Zambrano, por su gran aporte en la realización de este proyecto.

A nuestras familias y compañeros que siempre han estado apoyándonos en las buenas y en las malas.

A toda la planta docente de la facultad de ingeniería mecánica por el apoyo en el conocimiento científico para la culminación de este proyecto.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 MARCO TEÓRICO	17
3.1 CAUCHO NATURAL Y SINTETICO	17
3.1.1 Hule natural, de hevea brasiliensis (NR)	18
3.1.2 Hule estireno –butadieno (SBR)	19
3.1.3 Vulcanización de caucho natural	21
3.1.4 Vulcanización de SBR	23
3.2 PROCESO DE FABRICACION DE PRODUCTOS DE CAUCHO	23
3.3 DESCRIPCIÓN DE MÁQUINAS PARA PRODUCCIÓN DE CAUCHO	24
3.3.1 Mezcladora y Laminadora, Molino.	24
3.3.2 Vulcanizadora hidráulica.....	25
3.4 ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y DUREZA.	25
3.5 MEDIDORES	26
3.5.1 Instrumento medidor de dureza Hartip1500	26
3.5.2 Maquina universal.....	27
3.6 DISEÑO	27
3.6.1 SOLIDWORKS	27
3.6.2 ANSYS	28
4 METODOLOGÍA	29
4.1 DISEÑO MEZCLADORA	29
4.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	29
4.3 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	30
4.4 DETERMINACIÓN DE CURVAS DE CORRELACIÓN	30

5.	DISEÑO MEZCLADORA	31
5.1.	DISEÑO DE LA MEZCLADORA EN SOFTWARE SOLIDWORKS	32
5.1.1.	Rodillos laminadores.	32
5.1.2.	Estructura de soporte	34
5.1.3.	Sistemas de laminado y acople de rodillos.	35
5.1.4.	Mesa de soporte máquina.	40
5.1.5.	Sistemas de transmisión de potencia.	41
5.1.6.	Piezas de acoplamiento.	43
5.1.7.	Sistemas de refrigeración.	45
5.2.	DISEÑO DE MEZCLADORA EN SOFTWARE ANSYS	46
5.2.1.	Descripción de la situación de vida.	46
5.2.2.	Descripción funcional.	46
5.2.3.	Mallado	46
5.2.4.	Condiciones de frontera.	47
5.2.5.	Deformación total.	48
5.2.6.	Esfuerzo equivalente	49
5.2.7.	Factor de seguridad.	49
5.3.	ANÁLISIS DE LOS DISEÑOS.	50
6.	EQUIPOS UTILIZADOS	51
6.1.	MEZCLADORA DE CAUCHO	51
6.2.	VULCANIZADORA DE CAUCHO.	52
6.3.	INSTRUMENTO MEDIDOR DE DUREZA HARTIP1500	53
6.4.	MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS SHIMADZU UH-500KN	53
7.	PROCESO DE MEZCLADO Y VULCANIZADO	55
7.1.	MATERIA PRIMA	55
7.1.1.	Cauchos	55
7.1.2.	Tipos de aceleradores	55
7.1.3.	Azúfre	56

7.1.4. Negro de humo	57
7.2. PROPORCIÓN DE MEZCLAS Y PROBETAS	58
7.3. MEZCLADO	59
7.4. VULCANIZADO	62
8. CARACTERIZACIÓN DEL CAUCHO	66
8.1. PRUEBAS DE DUREZA	66
8.1.1. Tablas de pruebas de dureza	67
8.1.2. Curvas de correlación	71
8.1.3. Análisis de resultados de Dureza	72
8.2. PRUEBAS DE COMPRESIÓN	72
8.2.1. Tablas pruebas de compresión	73
8.2.2. Curvas de correlación	78
8.2.3. Análisis de resultados	84
9. CONCLUSIONES	85
10. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
WEBGRAFIA	89

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESTRUCTURA MOLECULAR DEL CACUHO NATURAL.....	19
FIGURA 2: ESTRUCTURA MOLECULAR DEL CAUCHO SBR.....	21
FIGURA 3: MOLINO PARA MEZCLA DE CAUCHO	24
FIGURA 4: VULCANIZADORA PARA CAUCHOS.....	25
FIGURA 5: MEZCLADORA Y LAMINADORA	31
FIGURA 6: RODILLOS LAMINADORES	32
FIGURA 7: TUBO LAMINADOR.....	33
FIGURA 8: ESTRUCTURA PUNTA-TAPA	33
FIGURA 9: ESTRUCTURA DE SOPORTE.	34
FIGURA 10: DETALLES ESTRUCTURA DE SOPORTE	35
FIGURA 11: SISTEMA DE LAMINADO, ACOPLE DE RODILLOS CON ESTRUCTURA DE SOPORTE.	36
FIGURA 12: TAPAS DE SUJECIÓN PARA RODILLOS	37
FIGURA 13: SOPORTES EN FORMA DE H PARA RODILLO MÓVIL	37
FIGURA 14: SOPORTE EN FORMA DE H FIJA PARA TORNILLO DE ARRASTRE	38
FIGURA 15: TORNILLO DE ARRASTRE	38
FIGURA 16: BUJES PARA SOPORTES	39
FIGURA 17: BUJES PARA TAPAS DE SUJECIÓN.....	39
FIGURA 18: MESA DE SOPORTE MAQUINAS.....	40
FIGURA 19: MESA DE SOPORTE PARA MÁQUINA LAMINADORA.....	41
FIGURA 20: SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	41

FIGURA 21: CARACTERÍSTICAS ENGRANAJES MOTO-REDUCTOR	42
FIGURA 22: CARACTERÍSTICAS ENGRANAJES CILINDROS	43
FIGURA 23: CUÑA ENGRANAJES	44
FIGURA 24: PASADOR TORNILLO Y H	44
FIGURA 25: PASADOR H.....	44
FIGURA 26: TORNILLOS TAPA.....	45
FIGURA 27: PRISIONEROS	45
FIGURA 28: MALLADO MOLINO DE CAUCHO	47
FIGURA 29: CONDICIONES DE FRONTERA	48
FIGURA 30: DEFORMACIÓN TOTAL	48
FIGURA 31: ESFUERZOS EQUIVALENTES	49
FIGURA 32: FACTOR DE SEGURIDAD	50
FIGURA 33. MOLINO DE CAUCHO	51
FIGURA 34: VULCANIZADORA.....	52
FIGURA 35: MEDIDOR HARTIP 1500.....	53
FIGURA 36: MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS.....	54
FIGURA 37: CAUCHO SBR Y NATURAL.....	55
FIGURA 38: ACELERADORES.....	56
FIGURA 39: AZUFRE.....	57
FIGURA 40: NEGRO DE HUMO	57
FIGURA 41: MEZCLAS DE CAUCHOS	58
FIGURA 42: SEGURIDAD EN EL MOLINO	60
FIGURA 43: CANTIDAD DE ADITIVOS.....	61

FIGURA 44: MEZCLA DE CAUCHOS.....	61
FIGURA 45: MEZCLA DE ADITIVOS.....	62
FIGURA 46: MEDIDAS MOLDE	63
FIGURA 47: VULCANIZADORA ENCENDIDA.....	63
FIGURA 48: POBRETA VULCANIZADA	64
FIGURA 49: PROBETAS VULCANIZADAS	65
FIGURA 50: PRUEBAS DE DUREZA EN PROBETAS	67
FIGURA 51: PROMEDIOS DE DUREZA VS PORCENTAJES DE CAUCHO.....	71
FIGURA 52: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 10% SINTÉTICO 90% NATURAL.....	78
FIGURA 53: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 20% SINTÉTICO 80% NATURAL.	79
FIGURA 54: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 30% SINTÉTICO 70% NATURAL.	79
FIGURA 55: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 40% SINTÉTICO 60% NATURAL.	80
FIGURA 56: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 50% SINTÉTICO 50% NATURAL.	80
FIGURA 57: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 60% SINTÉTICO 40% NATURAL.	81
FIGURA 58: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 70% SINTÉTICO 30% NATURAL.	81
FIGURA 59: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 80% SINTÉTICO 20% NATURAL.	82
FIGURA 60: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 90% SINTÉTICO 10% NATURAL.	82
FIGURA 61: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 100% SINTÉTICO.	83
FIGURA 62: ESFUERZO DE CADA PORCENTAJE DE CAUCHO EN 10CM DE DEFORMACIÓN.	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Porcentaje de componentes básicos para la vulcanización de caucho natural.....	22
Tabla 2: Cantidades de aceleradores, cauchos y negro de humo.....	59
Tabla 3: Prueba de Dureza 100% caucho sintético.....	67
Tabla 4: Prueba de Dureza 90% caucho sintético 10% caucho natural.....	68
Tabla 5: Prueba de Dureza 80% caucho sintético 20% caucho natural.....	68
Tabla 6: Prueba de Dureza 70% caucho sintético 30% caucho natural.....	68
Tabla 7: Prueba de Dureza 60% caucho sintético 40% caucho natural.....	69
Tabla 8: Prueba de Dureza 50% caucho sintético 50% caucho natural.....	69
Tabla 9: Prueba de Dureza 40% caucho sintético 60% caucho natural.....	69
Tabla 10: Prueba de Dureza 30% caucho sintético 70% caucho natural.....	70
Tabla 11: Prueba de Dureza 20% caucho sintético 80% caucho natural.....	70
Tabla 12: Prueba de Dureza 10% caucho sintético 90% caucho natural.....	70
Tabla 13: Prueba de compresión 10% caucho sintético 90% caucho natural.....	73
Tabla 14: Prueba de compresión 20% caucho sintético 80% caucho natural.....	73
Tabla 15: Prueba de compresión 30% caucho sintético 70% caucho natural.....	74
Tabla 16: Prueba de compresión 40% caucho sintético 60% caucho natural.....	74
Tabla 17: Prueba de compresión 50% caucho sintético 50% caucho natural.....	75
Tabla 18: Prueba de compresión 60% caucho sintético 40% caucho natural.....	75
Tabla 19: Prueba de compresión 70% caucho sintético 30% caucho natural.....	76
Tabla 20: Prueba de compresión 80% caucho sintético 20% caucho natural.....	76

Tabla 21: Prueba de compresión 90% caucho sintético 10% caucho natural. 77

Tabla 22: Prueba de compresión 100% caucho sintético..... 77

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ESTIRENO – BUTADIENO (SBR)

AUTORES: Jhon Jairo Zambrano Moreno
Andrés Fabián Serrano Jaime

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes

RESUMEN

El proyecto de grado “DETERMINACIÓN DE LA DUREZA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CAUCHO HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ESTIRENO – BUTADIENO (SBR)” tuvo como objetivo caracterizar mecánicamente la mezcla de caucho natural y hule SBR a través de ensayos de dureza y resistencia a la compresión. Durante desarrollo del presente proyecto se realizo el diseño básico de una mezcladora de cauchos en el software SolidWorks y Ansys, se fabricaron 10 probetas con diferentes porcentajes de mezclas de caucho natural y Hule SBR, se efectuaron ensayos de dureza y resistencia a compresión, tablas y graficas que analizan los resultados obtenidos de los mismos. El desarrollo del proyecto permitio concluir: 1.) El modelo prototipo resultado del diseño en el software SOLIDWORKS aplicado y probado en el

software ANSYS arrojó un factor de seguridad mínimo de 1,1297 encontrándose en el rango aceptable > 1 que garantiza que exista un margen extra de prestaciones por encima de las mínimas estrictamente necesarias; 2.) Con los ensayos de dureza y resistencia a la compresión aplicados a las 10 probetas elaboradas con diferentes proporciones de caucho natural y sintético, se realiza 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, utilizando un coeficiente de determinación igual o superior a 0.90 ($R^2 = 0.90$), arroja: La mayor dureza la refleja la probeta con una mezcla del 20% de caucho sintético y 80% de caucho natural y la menor dureza la probeta con una mezcla del 100% sintético; La mayor resistencia a la compresión la refleja la probeta con mezcla del 100% de caucho sintético y la menor resistencia a la compresión la refleja la probeta con 10% de caucho sintético y 90% de caucho natural.

PALABRAS CLAVES: Dureza, resistencia a la compresión, caucho natural, caucho sintético SBR

SUMMARY

TITLE: DETERMINATION OF THE STRENGTH AND RESISTANCE TO COMPRESSION MIXING RUBBER HEVEA BRASILIENSIS AND RUBBER STYRENE - BUTADIENE (SBR)

AUTHOR: Jhon Jairo Zambrano Moreno
Andrés Fabián Serrano Jaime

FACULTY: Faculty of Mechanical Engineering

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes

ABSTRACT

The graduation project “DETERMINATION OF THE STRENGTH AND RESISTANCE TO COMPRESSION MIXING RUBBER HEVEA BRASILIENSIS AND RUBBER STYRENE - BUTADIENE (SBR)” aims to mechanically characterize the mixture of natural rubber and SBR rubber by testing the hardness and compressive strength. In the development of this project, the design of a rubber mixing machine is performed in SolidWorks and Ansys software, 10 test specimens are manufactured with different percentages of blends of natural rubber and SBR rubber, testing the hardness and compressive strength, charts and graphs, analyzing the results obtained from them. Project development allows to conclude: 1.)

The results of the design prototype model in software SOLIDWORKS applied and tested in ANSYS software yielded a minimum safety factor of 1.1297 being in the acceptable > 1 rank, guarantees that there is an extra margin of performance above the minimum strictly necessary; 2.) hardness tests and compressive strength applied to the 10 test specimens prepared with different ratios of natural and synthetic rubber is carried out the correlation curve between the resistance compression and percent rubber mixture, and between the hardness and the percentage of rubber mixture, using a coefficient of determination equal or greater than 0.90 ($R^2 = 0.90$) , yields : reflects The higher hardness the specimen with a mixture of 20% of synthetic rubber and 80% of natural rubber and reflects the lower hardness the specimen with a mixture of 100% synthetic, the specimen that reflects the higher resistance to compression is the mixture of 100 % of synthetic rubber, and the specimen that reflects less compression strength is the mixture of 10% of synthetic rubber and 90% natural rubber.

KEYWORDS: Hardness, compressive strength, natural rubber, synthetic rubber SBR.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la industria del caucho ha registrado un considerable desarrollo en la síntesis de nuevos elastómeros y en la modificación de los ya existentes, tratando de encontrar los productos deseados para cumplir con las necesidades demandadas por el mercado. Muchos de estos elastómeros tienen como objetivo la industria automotriz y del neumático, una industria que cada vez tiene una demanda de calidad mayor, exigiendo el desarrollo de nuevas tecnologías y productos.

Los cauchos utilizados a nivel industrial están compuestos generalmente por una mezcla de caucho natural y sintético, debido a la flexibilidad que dichas mezclas permiten tanto en los costos como en las características físicas, químicas y mecánicas requeridas para cada producto determinado. Aunque existe una amplia bibliografía sobre las propiedades de los diferentes cauchos, naturales y sintéticos por separado, se carece de información sobre las propiedades para mezclas de estos materiales en diferentes proporciones.

A través del desarrollo de este proyecto se busca caracterizar mecánicamente mezclas en diferentes proporciones de caucho hevea brasiliensis y hule estireno – butadieno (SBR), 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, Realizar el diseño básico y detallado de una mezcladora de cauchos en Solid Works y Ansys, Fabricar las probetas con diferentes porcentajes en las mezclas de caucho natural y sintético, Realizar los ensayos de dureza y resistencia a la compresión de la mezcla de cauchos propuesta, 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.

El presente documento recopila el marco teórico necesario para orientar el diseño y elaboración de las probetas, la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, el diseño de la maquinaria, el proceso de mezclado y vulcanizado para la elaboración de diez probetas compuestas por diferentes proporciones de caucho natural y sintético, la caracterización del caucho mediante la descripción de las pruebas de dureza y compresión realizadas, así como el análisis de resultados, finalizando con las conclusiones obtenidas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar mecánicamente la mezcla de caucho hevea brasiliensis y hule estireno – butadieno (SBR), 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.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el diseño básico y detallado de una mezcladora de cauchos, a través del software Solid Works y Ansys. **Resultado:** Planos y análisis detallados de la mezcladora de cauchos. **Indicador:** se entregaran los resultados de presiones y temperaturas que actúan sobre la mezcladora por medio del software Ansys. y los planos se entregaran según la norma ANSI.
- Fabricar las probetas con diferentes porcentajes o cantidades en la mezclas de caucho hevea brasiliensis y hule estireno – butadieno (SBR). **Resultado:** Probetas de ensayo. **Indicador:** Se utilizará una balanza digital para garantizar 10 probetas con diferentes porcentajes o cantidades en las mezclas.
- Realizar los ensayos de dureza y resistencia a la compresión de la mezcla de cauchos propuesta, para diferentes porcentajes de composición. **Resultado:** Datos de dureza Shore y Resistencia a la compresión **Indicador:** se comparara la dureza de cada mezcla de caucho para determinar cuál es la mejor.
- 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. **Resultado:** Curvas de correlación **Indicador:** Se utilizará un coeficiente de determinación igual o superior a 0.90 ($R^2 = 0.90$) y la norma de compresión ASTM-D, y se entregaran las curvas de correlación en el software Excel.

3 MARCO TEÓRICO

El marco teórico aborda cuatro temas principales: cauchos, los procesos de fabricación de los productos de caucho, ensayos de compresión y dureza, y el proceso de diseño necesario para fabricar las mezclas de caucho natural y sintético.

3.1 CAUCHO NATURAL Y SINTETICO

El caucho natural es un polímero extraído del sangrado de la corteza de varias moráceas y euforbiáceas intertropicales, entre las que se destaca la *Hevea Brasiliensis*.

En el mercado colombiano se encuentran diferentes presentaciones del caucho natural, donde las más destacadas son el látex, el caucho en lámina, el caucho ripio (sobrante) y el caucho granulado. La cadena productiva comprende el cultivo del caucho, la recolección de látex, la disolución, filtrado, acidificación, coagulación, laminación, secado y empaque de látex, hasta obtener el caucho natural.¹

El caucho sintético es también un polímero pero a diferencia del natural, es obtenido a partir de productos del petróleo por reacciones complejas de polimerización.

La cadena productiva 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

¹ Ramos J – Sanchez S. Vulcanización y formulación de hules. I. Mexico. Limusa noriega editores . 2003

para la producción de diversos cauchos sintéticos: el estirenobutadieno (SBR), el polibutadieno (PBR), el butilo, el clorobutadieno, el acrilonitrilo butadieno, el isopreno y el etil-propileno-dieno (EPDM), entre otros.

El caucho natural, el caucho sintético y las mezclas de éstos, 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 semiproductos 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), así como otros productos y artículos de diversos usos. ²

3.1.1 Hule natural, de hevea brasiliensis (NR)

El NR o Hule natural corresponde a la forma molecular cis-1,4 poli-isopreno, es soluble en hidrocarburos alifáticos y en algunos otros solventes que contengan un parámetro de solubilidad similar al del NR y tiene una temperatura de transición vítrea “T_g” de -73° C.

Debido a su estructura regular, el hule natural es capaz de cristalizarse. La temperatura de fusión cristalina “T_m” es de 25 °C y la velocidad de cristalización alcanza su máximo a -25 °C. La cristalización en el NR puede ser inducida por deformación (extensión). Gracias a esto el hule natural exhibe gran resistencia en pruebas de tensión-elongación.

El hule natural reacciona con las sustancias químicas que son reactivas hacia los dobles enlaces carbono-carbono. Además, la presencia del grupo metilo en el poli-isopreno aumenta la reactividad de la doble ligadura (al compararla con el polibutadieno); gracias a esto el hule natural generalmente es más reactivo que el

² Wake, W. Analysis of rubber and rubber. 1 ed. London. 1958.

caucho SBR y que el polibutadieno hacia una gran variedad de sustancias químicas, incluyendo las que forman los sistemas de vulcanización.

El caucho natural es un polímero elástico. Esta clase de polímero se puede definir como macromolecular que luego de ser deformado regresa a su forma y dimensión inicial, luego de cesar el esfuerzo al que estuvo sometido.

El caucho natural desde el punto de vista químico, corresponde a la molécula de poliisopreno (nC_5H_8) y el monómero que lo conforma es el isopreno (C_5H_8). En la figura 1 se representa la estructura molecular del caucho natural.

Figura 1: Estructura molecular del cacuho natural.



Fuente: Kumar, Anil. "Fundamentals of polymer science and engineering". Editorial McGraw Hill. New Delhi. 1978.

3.1.2 Hule estireno –butadieno (SBR)

Como hidrocarburo insaturado el SBR es soluble en la mayoría de los solventes hidrocarbonados y en algunos otros solventes que tengan un parámetro de solubilidad similar al del SBR.

La estructura molecular del Hule estireno – butadieno no permite la cristalización, por lo tanto los cauchos SBR no tienen buenas propiedades mecánicas por si

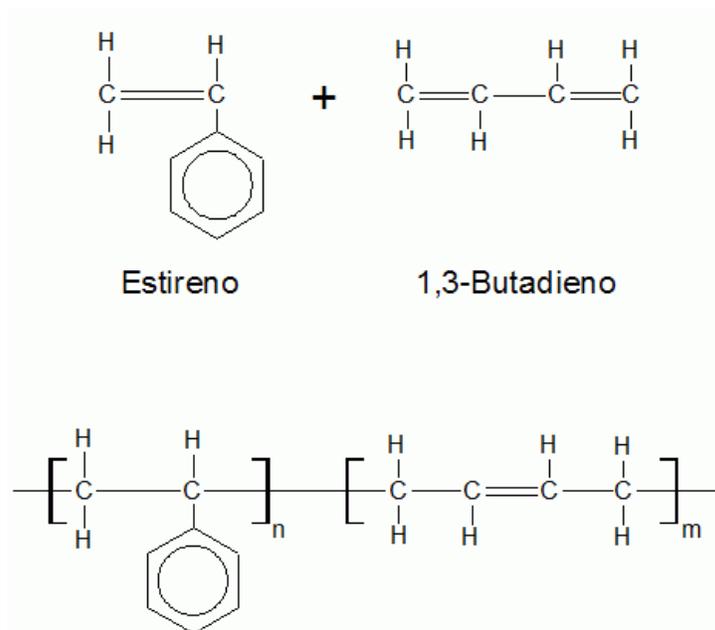
mismos, lo que lleva a la necesidad de reforzar con altas cargas de otros compuestos como negro humo para alcanzar alta dureza.

Las propiedades dinámicas (tensión y deformación) del caucho SBR limitan su uso para aplicaciones donde la generación de calor debido a sollicitaciones cíclicas es importante: debido a su gran fase plástica, los vulcanizados de SBR tienen alta histéresis (conservar una de sus propiedades a un estímulo generado) . Quizás este comportamiento sea la diferencia más grande que, con respecto a las propiedades dinámicas, que tenga el caucho SBR con respecto al Natural. Esta desventaja del SBR es crítica, cuando se trata de artículos de goma de gran espesor, sometidos a esfuerzos repetitivos debido a la mala conductividad térmica de la goma y a su consecuente ineficiencia en la disipación de calor. Ante el fenómeno de fatiga, el SBR tiene una gran resistencia al agrietamiento pero falla en materia de crecimiento de grietas o cortes, debido a sus relativamente bajas propiedades de ruptura. Todas estas desventajas se pueden mejorar combinando las propiedades de los diferentes cauchos en mezclas de SBR/NR, en proporciones que dependen de los requisitos y condiciones de uso a que van a someterse los compuestos.³

La estructura molecular del caucho SBR se puede observar en la figura 2.

³ En: [textoscientificos.com/caucho/sbr/propiedades] 2013.

Figura 2: Estructura molecular del caucho SBR.



Fuente: En: [textoscientificos.com/caucho/sbr/propiedades] 2013

3.1.3 Vulcanización de caucho natural

La vulcanización es un proceso mediante el cual el caucho es calentado en presencia de azufre y otros aditivos en donde los polímeros lineales paralelos cercanos constituyen puentes de enlaces entrecruzados haciéndolo más estable, menos pegadizo, más duro y resistente.

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

Tabla 1: Porcentaje de componentes básicos para la vulcanización de caucho natural.

Sistema de vulcanización		
	CONVENCIONAL %	EFICIENTE %
Hule natural	100 %	100 %
Azufre	2.0-3.5 %	0.4-0.8 %
Acelerador	1.5-0.5 %	5.0-2.0 %
Activador (ZnO)	3-5 %	3-5 %
Ácido graso (esteárico)	1-2 %	1-2 %

Fuente: Morton, M, Ed. Rubber technology. 2ed. New york: Van nostrand reinhold. 1973.

Los efectos de los aceleradores varían enormemente, pero normalmente 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 parametrizado el número de átomos de azufre que se requieren para producir cada entrecruzamiento; en una mezcla “hule-azufre”, sin acelerador, este número esta alrededor de 45; en una mezcla convencional “hule-azufre-acelerador”, el numero oscila alrededor de 15; en la mezcla eficiente “hule-azufre-acelerador”, este número esta alrededor de 5.⁴

⁴ Naunton. W. J. S. Ciencia y tecnología del caucho. Mexico : cec sa, 1967

3.1.4 Vulcanización de SBR

Igual que el hule natural, el SBR es un hidrocarburo con doble enlace que usualmente se vulcanizan con azufre y aceleradores. Sin embargo, la diferente actividad de la doble ligadura, la diferente concentración de dobles enlace y la aromaticidad de la estructura, provoca que exista un número considerable de diferencias en los detalles de formulación. De esta forma, el SBR tiene una vulcanización más lenta que el NR y requiere de mayor concentración de aceleradores para alcanzar un tiempo de vulcanización equivalente. Por otro lado, debido a la menor concentración de doble ligaduras requiere menor concentración de azufre.⁵

3.2 PROCESO DE FABRICACION DE PRODUCTOS DE CAUCHO

La producción manufacturera de caucho comprende cuatro grandes procesos:

- La mezcla, que consiste en producir un compuesto con todos los ingredientes para permitir un procesamiento fácil en las etapas subsiguientes.

- Proceso de laminación del caucho, que permite obtener perfiles específicos. La mezcla se lleva hasta rodillos enfriadores con el fin de darle estabilidad dimensional.

- El moldeo, consiste en dar forma a un artículo de caucho en un molde con forma determinada.

- La vulcanización, que es el cambio de estado plástico a estado elástico de un compuesto elastomérico, mediante la unión química de las cadenas del polímero por medio de puentes de agente vulcanizante. Este proceso

⁵ Barlow. F. Rubber compounding and techniques. 2 ed. New York. Marcel Dekker. 1993.

consta de dos partes, La primera es el moldeo, donde el material continúa en estado termoplástico (a temperaturas altas se vuelve deformable o flexible). La segunda es la conversión química del material formado a su estado elástico final.⁶

3.3 DESCRIPCIÓN DE MÁQUINAS PARA PRODUCCIÓN DE CAUCHO

3.3.1 Mezcladora y Laminadora, Molino.

Las primeras dos etapas para la elaboración del caucho natural-sintético se efectúan con el molino que efectúa las labores de mezcladora y laminadora. Éste molino se puede observar en la figura 3.

La máquina está compuesta por dos rodillos paralelos conectados a un sistema de transmisión de potencia con un motor y reductor de velocidad, en donde uno gira a mayor velocidad que el otro. La mezcla pasa una y otra vez a través de ellos hasta obtener la homogeneidad deseada entre el caucho natural y el sintético.

Figura 3: Molino para mezcla de caucho



Fuente: Autor.

⁶ Bolz. R—Tuve.G. Crc handbook of tables for appliedy engineering science. 1 ed. Cleveland. Oh.1973.

3.3.2 Vulcanizadora hidráulica

Las últimas dos etapas de la producción de caucho natural sintético son el moldeo y la vulcanización y están a cargo de la vulcanizadora hidráulica. Esta máquina consta de una unidad hidráulica o centralita (ver Figura 4), con un cilindro al que se le une una placa; otra placa se ubica en una mesa de apoyo que consta de una serie de resistencias eléctricas.

Dicha máquina se utiliza en la mezcla homogénea obtenida en las dos etapas anteriores. Esta mezcla se ubica entre las planchas a una temperatura entre 140 y 160 grados Celsius y se ejerce presión con el cilindro entre 45 y 50 kg/cm².

Figura 4: Vulcanizadora para cauchos



Fuente: Autor.

3.4 ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y DUREZA.

La dureza es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes. La dureza shore 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. Esta dureza se mide por medio del instrumento Hartip1500.

La resistencia a la compresión es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido al fracturamiento se puede definir en límites bastante ajustados, como una propiedad independiente. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material.⁷ La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión. Este ensayo se realiza con la máquina universal.

3.5 MEDIDORES

Los instrumentos de medición necesarios para realizar pruebas de dureza y resistencia a compresión en el caucho son el medidor de dureza y la máquina universal de ensayos.

3.5.1 Instrumento medidor de dureza Hartip1500

Se basa en la reacción elástica del material cuando se deja 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 (sondeo) y procesador de datos en una unidad. El tamaño es mucho más corto que el dispositivo de impacto normal, lo que permite HARTIP 1500 puede satisfacer las mediciones no sólo normales, pero puede

⁷ En: [instron.com.ar/wa/glossary/Compressive-Strength.aspx] 2013

tomar medidas en espacio reducido. HARTIP 1500 es apto para pruebas de dureza de casi todos los materiales ferrosos y no ferrosos.

3.5.2 Maquina universal

Maquina universal: Es una máquina para ensayos mecánicos de marca shimadzu, con un sistema semejante a una prensa que permite someter materiales a compresión y tracción mediante placas o mandíbulas accionadas por un sistema hidráulico. Ejerce una fuerza máxima de 500KN arrojando resultados del desplazamiento y la carga aplicada a la probeta.

3.6 DISEÑO

A fin de obtener un diseño óptimo de la máquina mezcladora y laminadora se consultó con empresas especializadas en la producción de caucho. Conociendo la opinión de expertos y después de inspeccionar maquinaria en uso, se procedió a hacer uso del software para diseñar y simular el funcionamiento de la mezcladora.

3.6.1 SOLIDWORKS

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. Es un modelador de sólidos paramétrico. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasladar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera automatizada.

3.6.2 ANSYS

Es un software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito de estructuras y volúmenes finitos para fluidos. Este procesador de elemento finito para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no-lineales), análisis de transferencia de calor y fluido dinámica, y también problemas de acústicas y de electromagnetismo. Usualmente el uso de estas herramientas van de la mano, logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo. Este software es usado también en ingeniería civil y eléctrica, física y química.

4 METODOLOGÍA

El proceso metodológico utilizado en el desarrollo del proyecto contempló cuatro grandes fases:

4.1 DISEÑO MEZCLADORA

Se determinaron los parámetros de diseño de una mezcladora para la obtención de mezclas de caucho *Hevea brasiliensis* y Hule estireno – butadieno (SBR), con apoyo de los software Solid Works y Ansys. Se fundamentó el diseño en información proporcionada por industrias del caucho (milcauchos, cauchorecord, cauchoaudin) y se optimizó el diseño a fin de lograr un desempeño efectivo tanto de la mezcladora, como de su estructura. Posteriormente se efectuó en ANSYS el análisis de presión y temperatura, verificando el diseño propuesto. En cooperación con otros grupos de trabajo de postulantes a obtener el título de Ingeniero mecánico, se llevó a cabo la construcción de la máquina mezcladora y se instaló en el laboratorio de Procesos Industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

4.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Haciendo uso de las máquinas mezcladora y vulcanizadora emplazadas en el laboratorio de Procesos Industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga se fabricaron diez probetas de caucho compuestas de diferentes cantidades de caucho natural (*Hevea brasiliensis*) y sintético (Hule estireno – butadieno) en las siguientes proporciones:

- Probeta 1: 100% sintético
- Probeta 2: 90% sintético + 10% natural
- Probeta 3: 80% sintético + 20% natural

- Probeta 4: 70% sintético + 30% natural
- Probeta 5: 60% sintético + 40% natural
- Probeta 6: 50% sintético + 50% natural
- Probeta 7: 40% sintético + 60% natural
- Probeta 8: 30% sintético + 70% natural
- Probeta 9: 20% sintético + 80% natural
- Probeta 10: 10% sintético + 90% natural

4.3 ADQUISICIÓN DE DATOS

Mediante la utilización del medidor de dureza Hartip1500 y la máquina universal de los laboratorios de Procesos Industriales y Resistencia de Materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, se realizaron las pruebas de dureza y los ensayos de resistencia para cada una de las probetas, obteniendo de esta forma datos confiables de dureza y resistencia para cada proporción de caucho natural-sintético elaborado.

4.4 DETERMINACIÓN DE CURVAS DE CORRELACIÓN

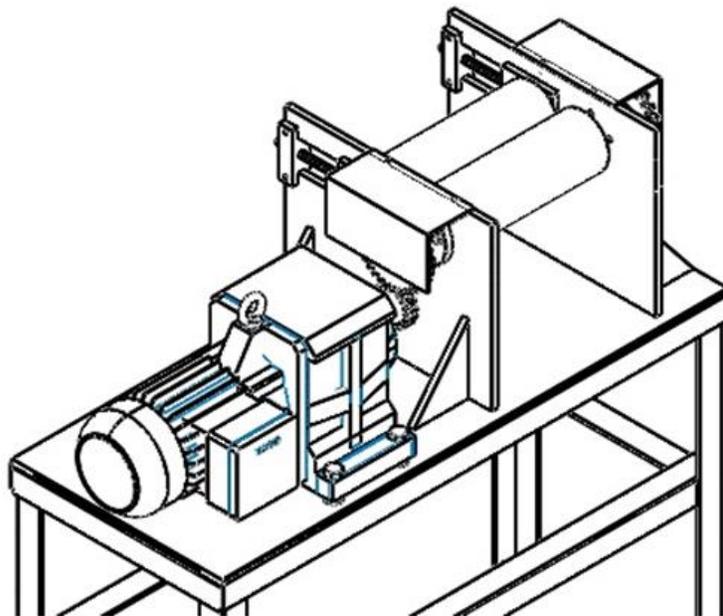
Se determinaron las curvas de correlación entre las propiedades mecánicas de Resistencia a la compresión y Dureza, y el porcentaje de mezcla entre caucho natural *Hevea brasiliensis* y sintético Hule estireno – butadieno (SBR).

5. DISEÑO MEZCLADORA

Para el diseño básico y detallado de la mezcladora de cauchos se utilizó la ayuda del software SOLIDWORKS en la elaboración de planos, diseño de piezas y ensamble de la máquina; y de ANSYS para el análisis en condiciones de trabajo de presión y temperatura, estructural respecto a la deformación, y para determinar posibles fallas estructurales.

El diseño de la mezcladora y laminadora (ver Figura 5) se realizó con la asesoría y consultoría de empresas experimentadas en el desarrollo de este tipo de máquinas para la industria del caucho y personas ligadas a la fabricación de máquinas y herramientas, para poder determinar el adecuado diseño de la mezcladora y garantizar su buen funcionamiento.

Figura 5: Mezcladora y laminadora



Fuente: Autor.

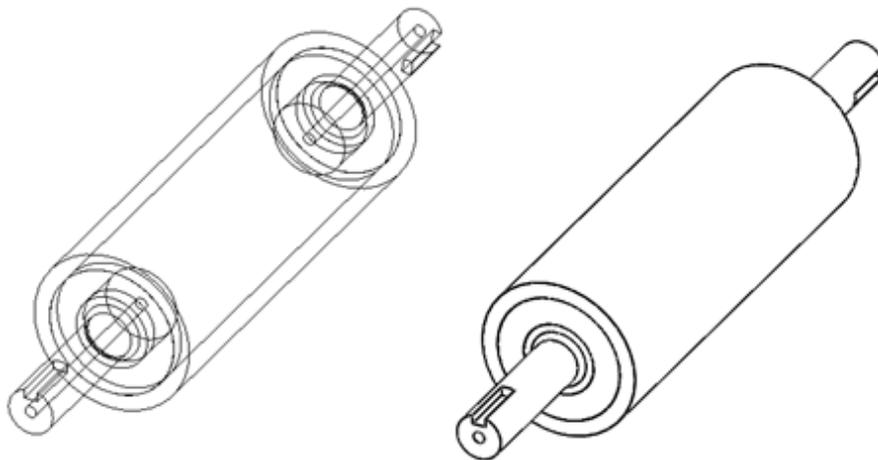
5.1. DISEÑO DE LA MEZCLADORA EN SOFTWARE SOLIDWORKS

El software SOLIDWORKS fue utilizado para elaborar las piezas, obtener los planos de cada una de ellas y realizar el ensamblaje de la máquina, corroborando que dichas medidas quedaran correctas, para obtener el acople adecuado de todos los elementos.

5.1.1. Rodillos laminadores.

Para el diseño de los rodillos (ver Figura 6) se usa el acero AISI4145H usado en la industria petrolera como material de perforación que cuenta con resistencia a la compresión de 140 Gpa y módulo de elasticidad de 205 Gpa⁸.

Figura 6: Rodillos laminadores



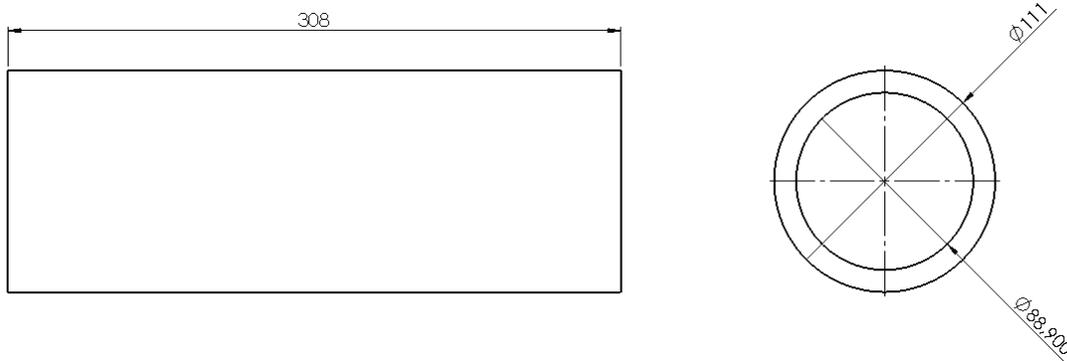
Fuente: Autor.

Los rodillos laminadores constan de tres partes unidas por medio de soldadura eléctrica: los tubos, las tapas y las puntas.

⁸ En: [MatWeb.com/MaterialPropertyData/AISI4145H Steel] 2014

Los tubos tienen una pared de 1/2" para soportar las presiones altas a las que se ven sometidos, son huecos para poder ser refrigerados mediante agua y evitar el calentamiento sobre los 60° Celsius, temperatura máxima de moldeo en los cauchos para evitar la pre vulcanización. En la Figura 7 se observa la vista frontal y lateral del tubo.

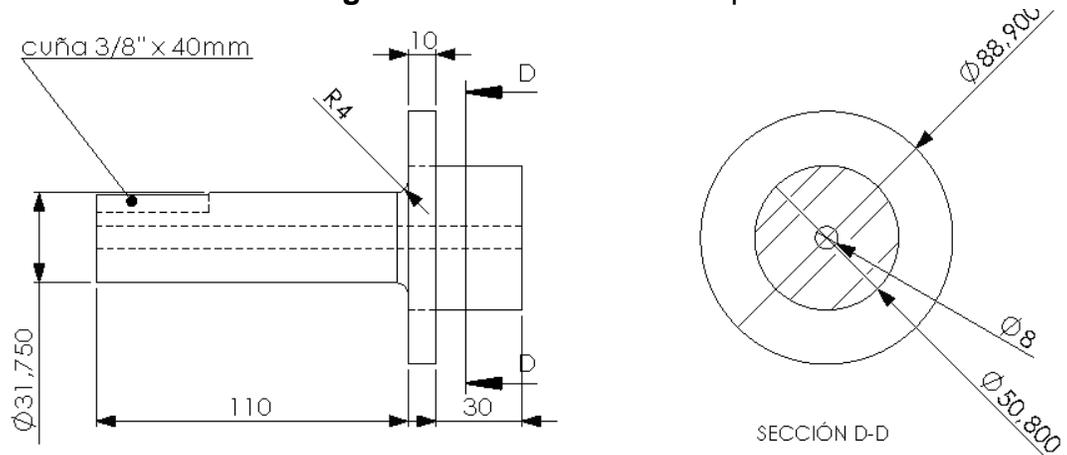
Figura 7: Tubo laminador



Fuente: Autor.

Las tapas están elaboradas en acero y van soldadas a las puntas formando una estructura como se muestra en la figura 8.

Figura 8: Estructura Punta-tapa



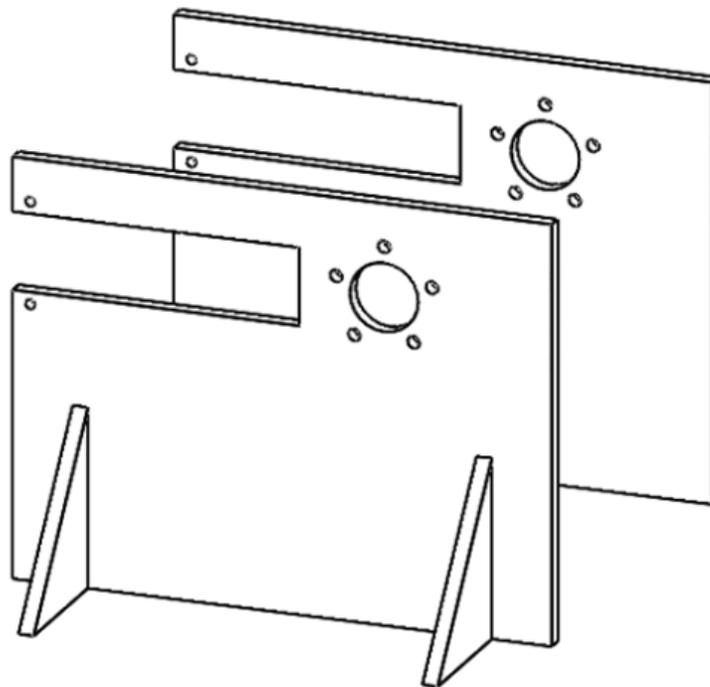
Fuente: Autor.

Las puntas tienen un diámetro de 1¼”, cuentan con orificio de entrada de agua para refrigeración y un espacio de 2” para instalar la cuña del engranaje. La estructura punta-tapa va soldada al tubo formando el rodillo laminador.

5.1.2. Estructura de soporte

La estructura de soporte de los rodillos laminadores se diseñó en lámina de acero 1045 de ½”, unida a la mesa y a las escuadras de apoyo por medio de soldadura eléctrica. En la figura 9 se puede observar el modelo de la estructura de soporte.

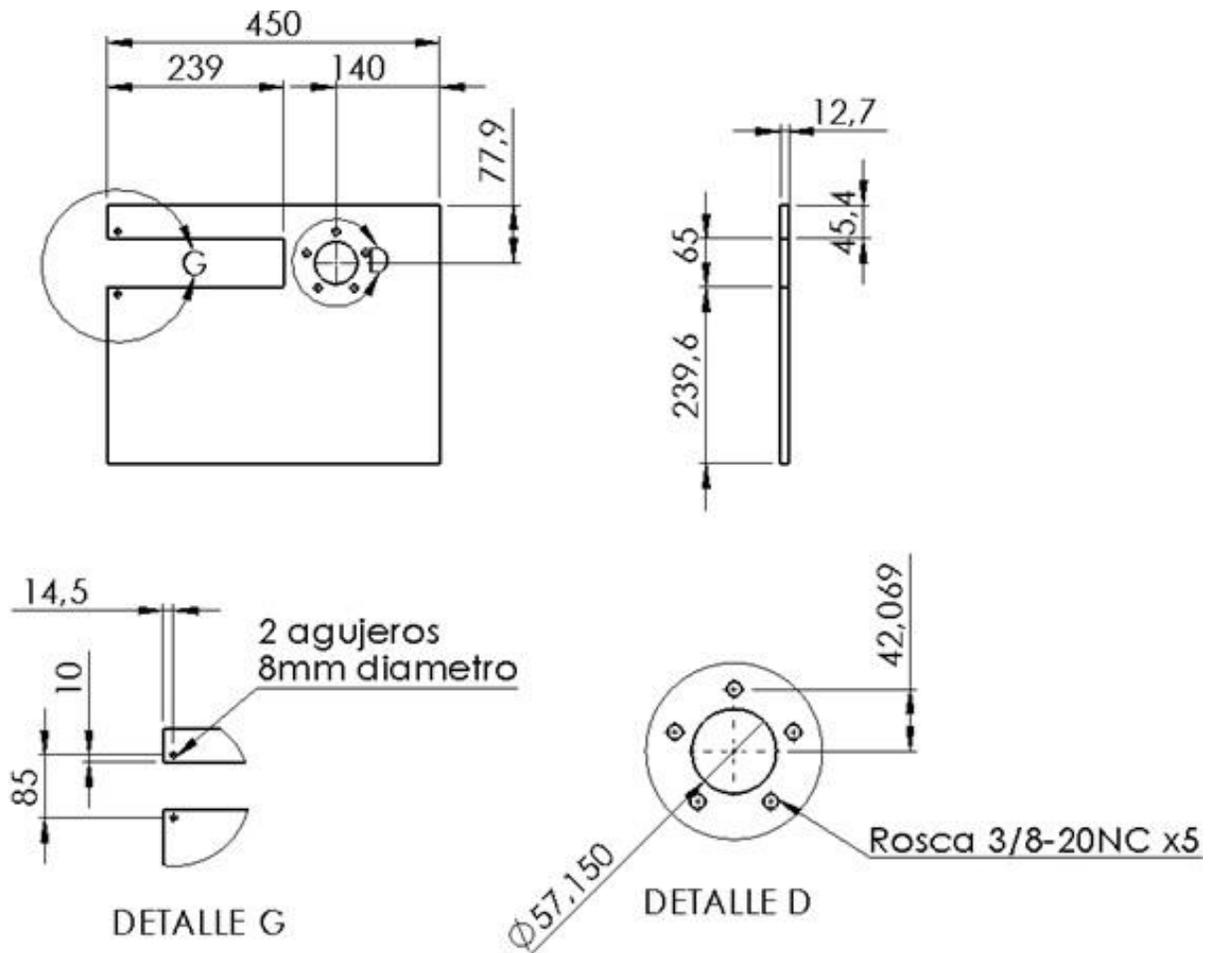
Figura 9: Estructura de soporte.



Fuente: Autor.

La escuadra de apoyo tiene medidas de 120x120 milímetros respecto a la base y la altura. En la figura 10 se muestran los detalles de la estructura de soporte.

Figura 10: Detalles estructura de soporte

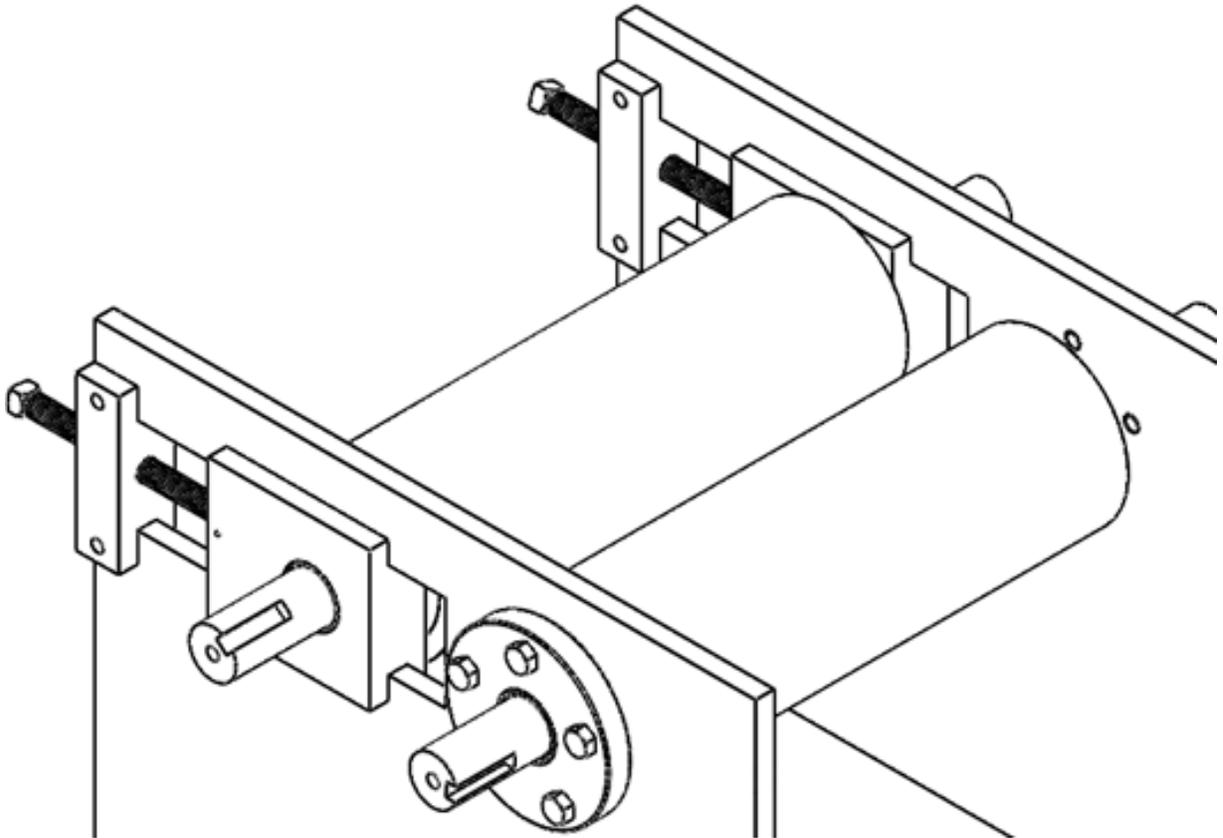


Fuente: Autor.

5.1.3. Sistemas de laminado y acople de rodillos.

El acople de rodillos laminadores con la estructura de soporte da lugar al ensamble del sistema de laminado (ver Figura 11).

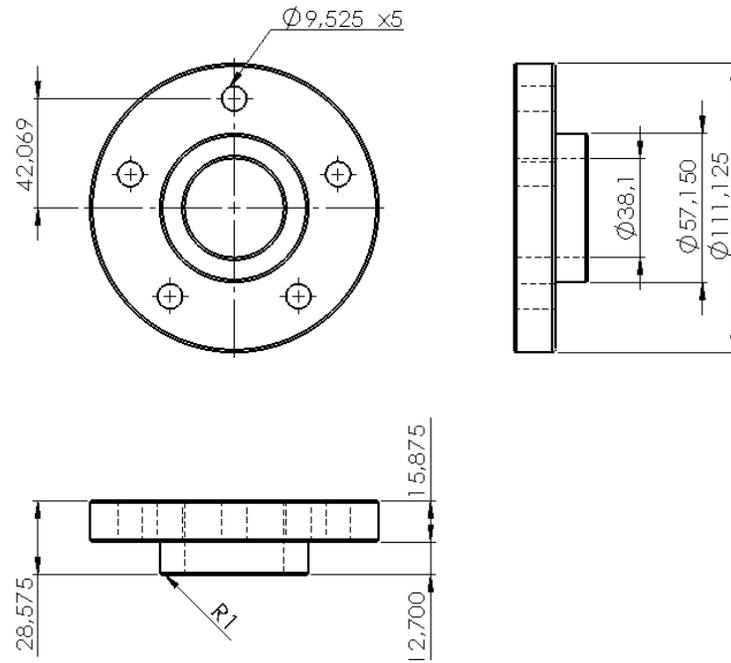
Figura 11: Sistema de laminado, acople de rodillos con estructura de soporte.



Fuente: Autor.

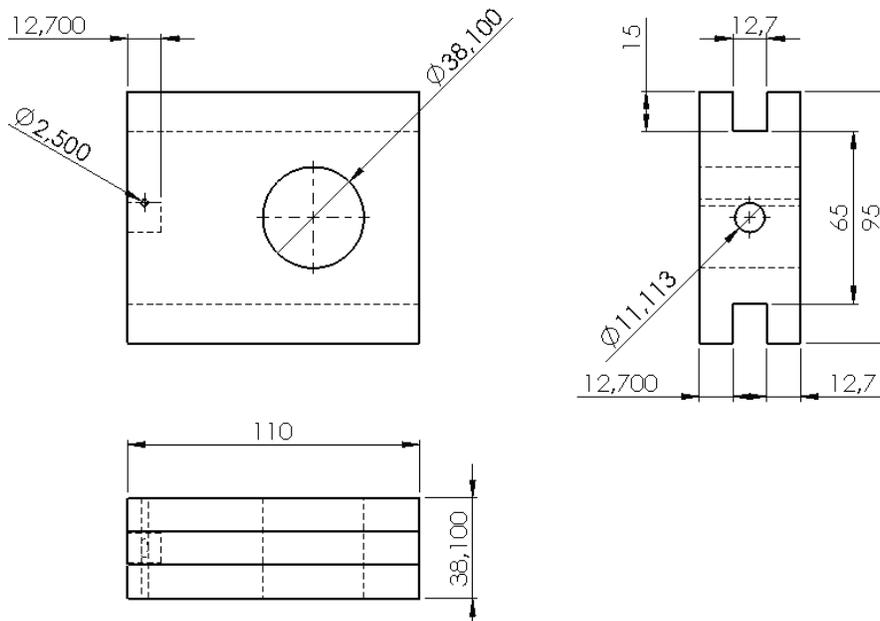
El sistema de acople está conformado por dos tapas (Ver figura 12) con bujes que sostienen un rodillo fijo; dos soportes en forma de H que levantan un segundo rodillo móvil (Ver Figura 13); y dos soportes adicionales en forma de H (Ver Figura 14) que soportan un tornillo de arrastre (ver figura 15) encargado de desplazar al rodillo móvil.

Figura 12: Tapas de sujeción para rodillos



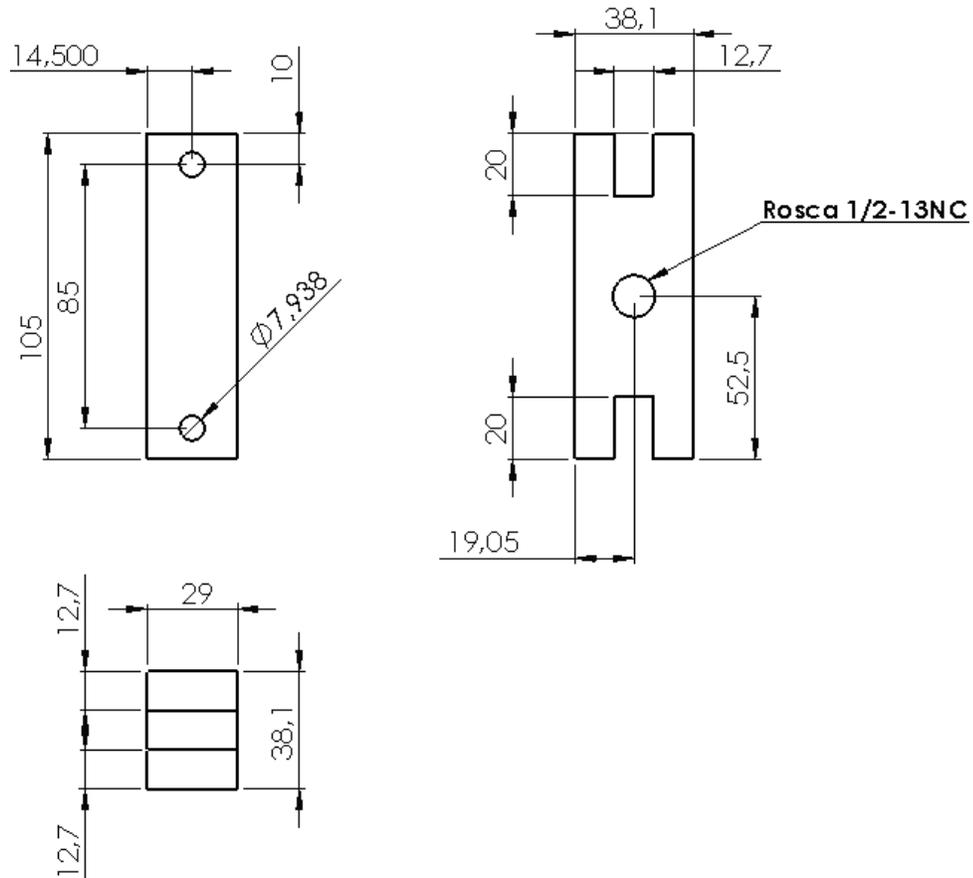
.Fuente: Autor.

Figura 13: Soportes en forma de H para rodillo móvil



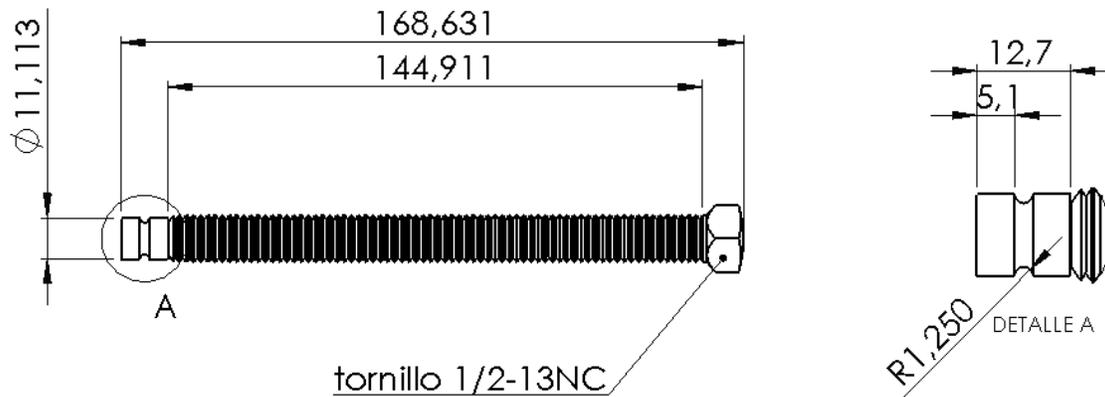
Fuente: Autor.

Figura 14: Soporte en forma de H fija para tornillo de arrastre



Fuente: Autor.

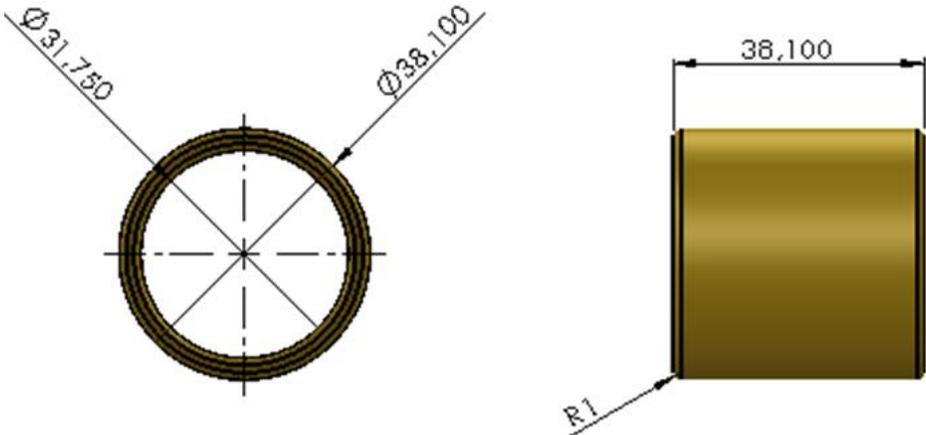
Figura 15: Tornillo de arrastre



Fuente: Autor.

Los soportes de los rodillos tienen bujes con las características descritas en la figura 16.

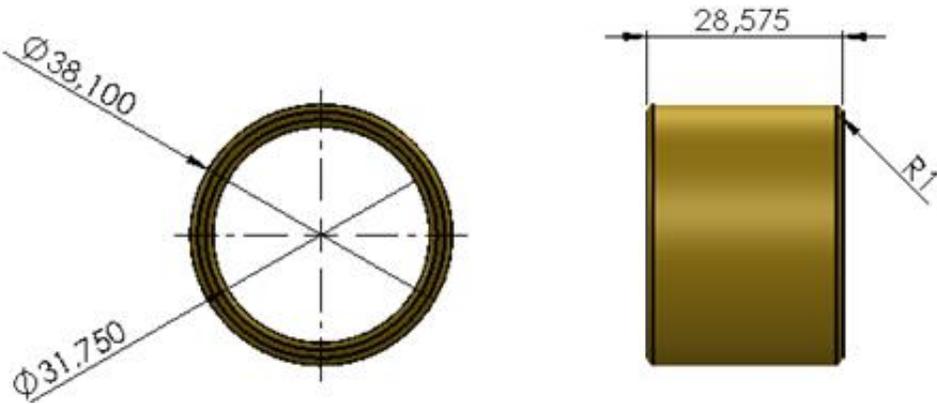
Figura 16: Bujes para soportes



. Fuente: Autor.

Las tapas cuentan con bujes de bronce (ver figura 17) y van sujetas con tornillos de 3/8-16 NC, son sistemas de fácil desarme y se pueden retirar de la estructura para su mantenimiento rápido y fácil.

Figura 17: Bujes para tapas de sujeción



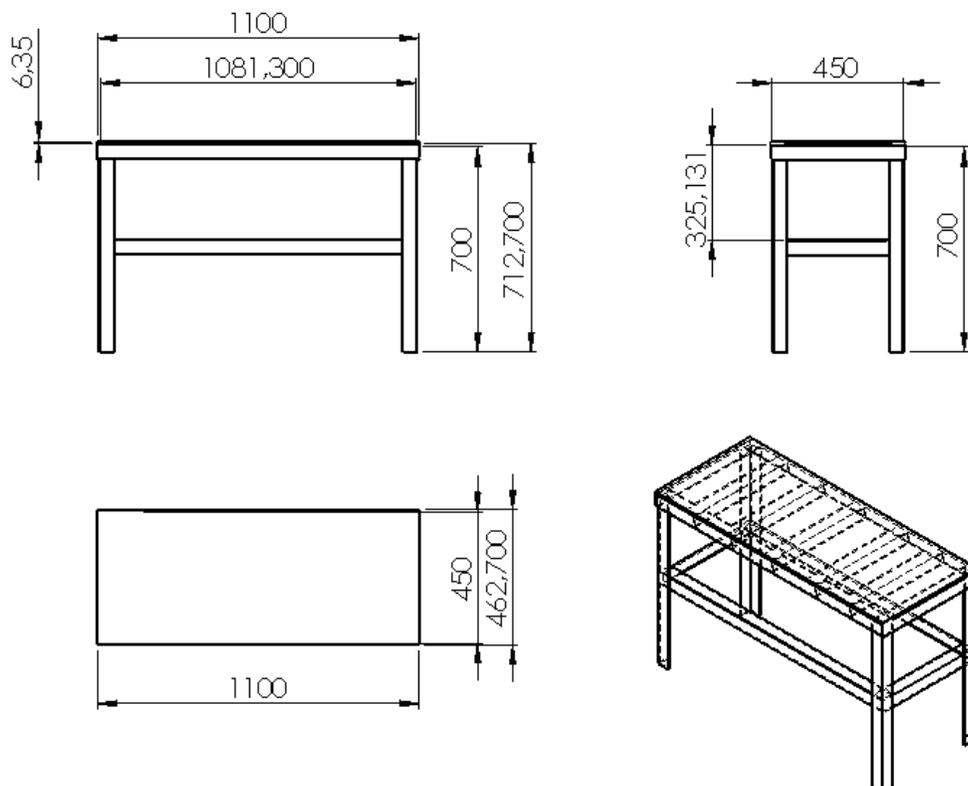
Fuente: Autor.

La estructura de acople se diseñó desarmable a fin de reemplazar fácilmente los bujes y el sistema de laminado en caso de fallas pues son las partes más propensas a fallar por su desgaste y trabajo.

5.1.4. Mesa de soporte máquina.

La mesa cuenta con una lámina de acero de $\frac{1}{4}$ " de espesor en la parte superior, soportada por cinco ángulos de acero de $2" \times 1/4"$ distribuidos como se muestra en la figura 18, soldados al marco de la mesa para dar mayor soporte a la lámina y tolerar el peso de los elementos que constituyen el proceso de mezcla y laminado del caucho. Cuenta con un refuerzo soldado a las patas para evitar daños por la vibración y para ubicar el tanque del sistema de refrigeración.

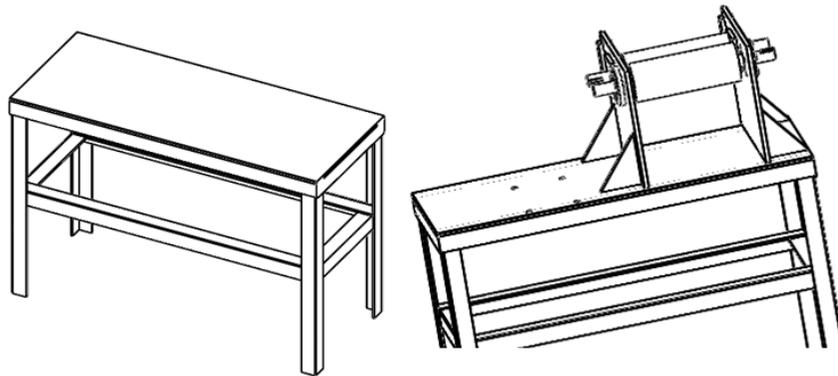
Figura 18: Mesa de soporte maquinas



Fuente: Autor.

La máquina laminadora se ubica en la mesa como se muestra en la figura 19, con las escuadras de soporte a un extremo, soldada a la mesa, ubicando el motor a partir de esa posición.

Figura 19: Mesa de soporte para máquina laminadora

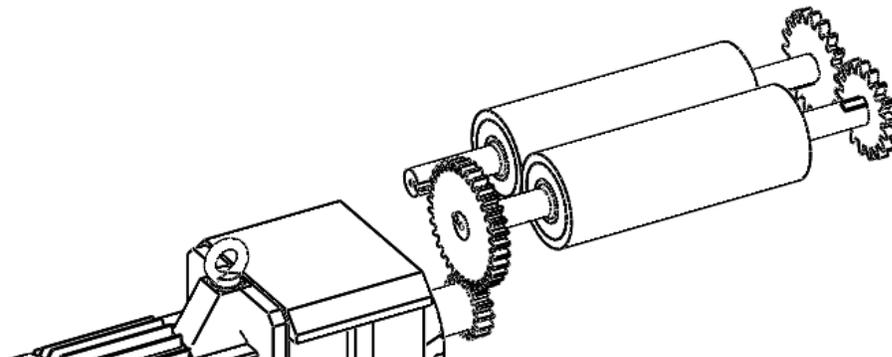


Fuente: Autor.

5.1.5. Sistemas de transmisión de potencia.

El sistema de transmisión de potencia (ver figura 20) utiliza engranajes para generar un buen torque. El moto-reductor utilizado cuenta con 3HP (caballos de potencia), con velocidad angular de aproximadamente 40 RPM y conexión eléctrica trifásica.

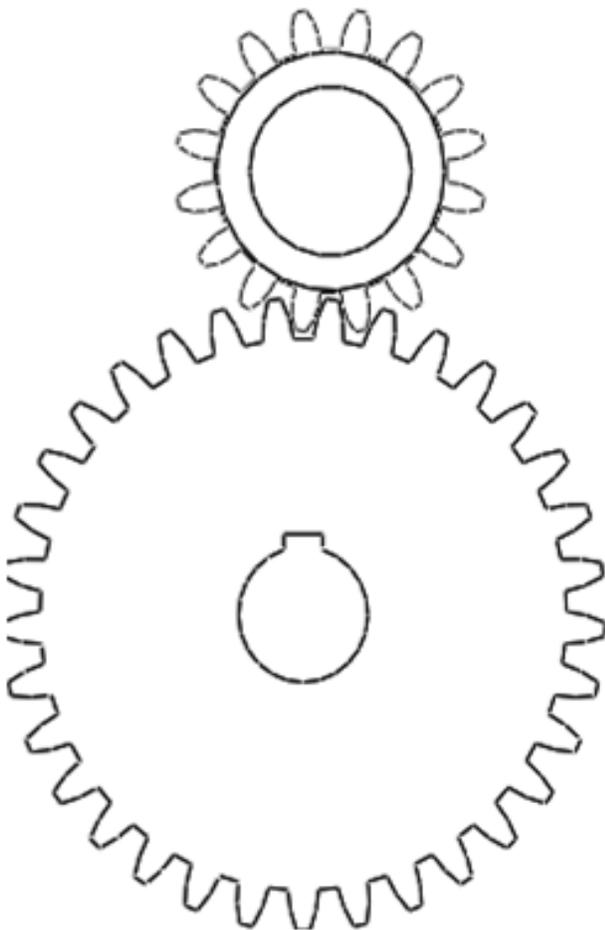
Figura 20: Sistema de transmisión de potencia



Fuente: Autor.

La figura 21 muestra las características de los engranajes del moto-reductor, mostrando criterios de diseño y relaciones requeridas para el diseño.

Figura 21: Características engranajes moto-reductor



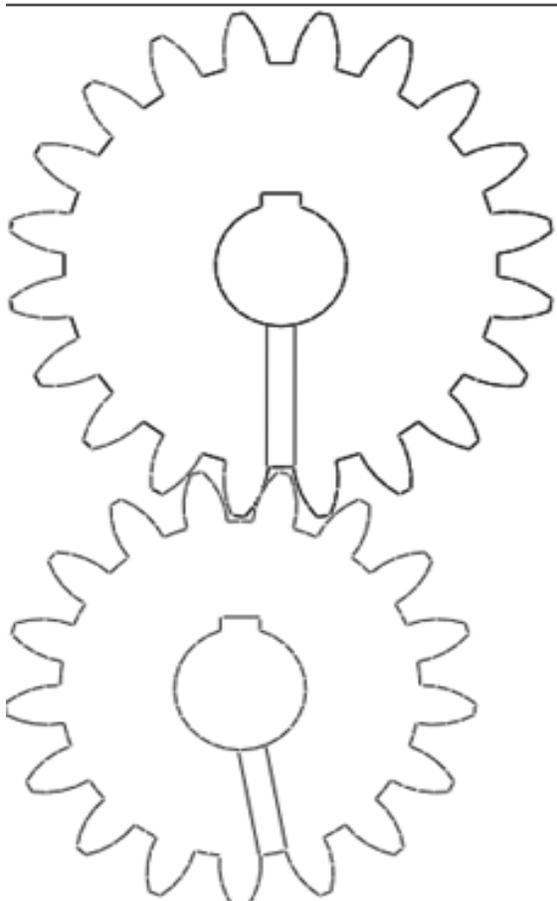
Diámetro exterior	3"
Diámetro interior	1,5625"
# de dientes	16
modulo	2
Cuñero	3/8"x40mm
Prisionero	1/4"
Velocidad de giro	40 rpm

Diámetro exterior	5,833"
Diámetro interior	1,2500"
# de dientes	32
modulo	2
Cuñero	3/8"x40mm
Prisionero	1/4"
Velocidad de giro	20 rpm

Fuente: Autor.

La figura 22 muestra las características de los engranajes de los cilindros, mostrando criterios de diseño y relaciones requeridas para el diseño.

Figura 22: Características engranajes cilindros



Diámetro exterior	66 mm
Diámetro interior	15,88 mm
# de dientes	20
modulo	6
Cuñero	3/8"x40mm
Prisionero	¼"
Velocidad de giro	17 rpm

Diámetro exterior	57 mm
Diámetro interior	15,88 mm
# de dientes	17
modulo	6
Cuñero	3/8"x40mm
Prisionero	¼"
Velocidad de giro	20 rpm

Fuente: Autor.

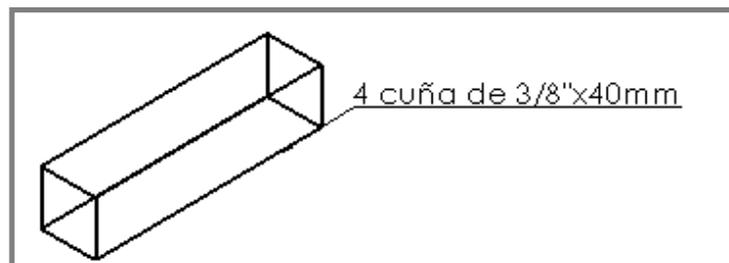
5.1.6. Piezas de acoplamiento.

Las piezas de acoplamiento que se utilizaron en el ensamblaje fueron prisioneros y cuñas iguales. Las cuñas sirven para transmitir el movimiento y permitir la unión del engranaje con las puntas y hacer que se muevan en un mismo sentido, y los prisioneros son utilizados para ajustar los piñones al eje y no dejar que el piñón se mueva en el eje. Se usaron también tornillos para las tapas de sujeción de rodillos y tornillos con tuercas acoplando el motor reductor a la mesa. Se usaron pines o

pasadores para las H fijas en tornillos y pines para acoplar el tornillo laminador con la H movable.

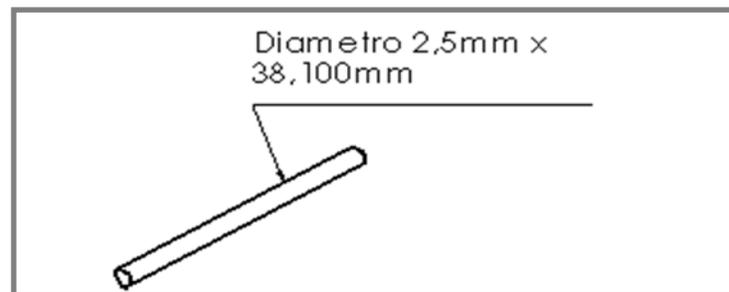
En las figuras 23 a 27 se especifican cada una de las piezas de acoplamiento.

Figura 23: Cuña engranajes



Fuente: Autor.

Figura 24: Pasador tornillo y H



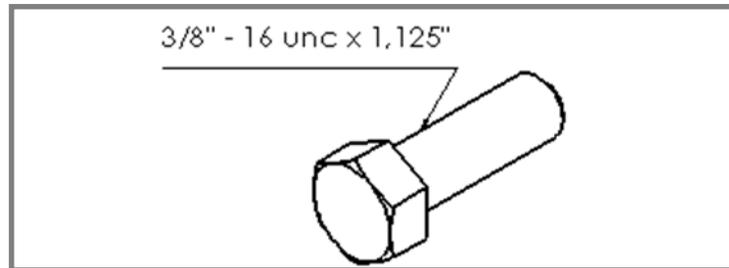
Fuente: Autor

Figura 25: Pasador H



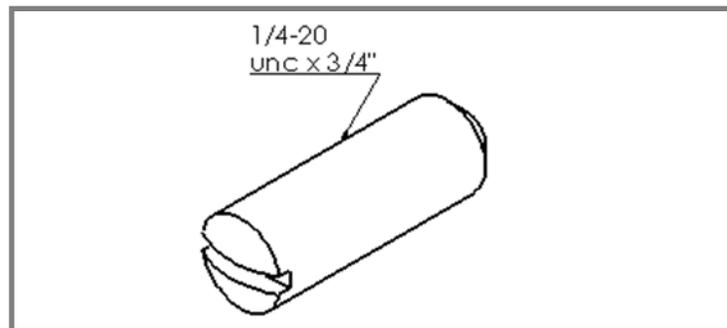
Fuente: Autor

Figura 26: Tornillos tapa



Fuente: Autor

Figura 27: Prisioneros



Fuente: Autor.

5.1.7. Sistemas de refrigeración.

El sistema de refrigeración es necesario y de gran utilidad, ya que los rodillos al hacer fricción y comprimir el caucho se calientan. En este caso, el caucho en el proceso de mezcla no debe sobrepasar los 60° Celsius o se podría pre vulcanizar o vulcanizarse antes de terminar el proceso de mezcla y laminado.

El sistema de refrigeración para los rodillos laminadores consta de una bomba de una cabeza de 2 metros para llevar el agua desde el tanque de agua hacia los rodillos y un caudal de 1400 l/h.

Las puntas de los rodillos con orificios de entrada de agua y salida, van con rodamientos donde se usan mangueras que entran a presión por el agujero de los rodamientos, para que al rotar los rodillos la manguera se mantenga estática y no gire, gracias al rodamiento que se instaló en las puntas de los rodillos laminadores.

5.2. DISEÑO DE MEZCLADORA EN SOFTWARE ANSYS

5.2.1. Descripción de la situación de vida

La laminadora y mezcladora estará expuesta a temperatura ambiente y estará ubicada en un laboratorio cerrado. Durante el proceso de mezclado y laminado la temperatura aumentará hasta 60° y soportará un torque ejercido por el moto-reductor y una presión ejercida por el caucho al ser laminado en medio de los dos rodillos giratorios.

5.2.2. Descripción funcional

La laminadora y mezcladora cumple la función de mezclado y laminado del caucho natural junto con el sintético por medio de la presión y la fricción que ejercen los rodillos al caucho llevando esto a un aumento de la temperatura hasta máximo 60°C y el moto-reductor que gira a 40rpm genera un torque el cual afecta también la estructura por lo cual se hizo en acero estructural 1045.

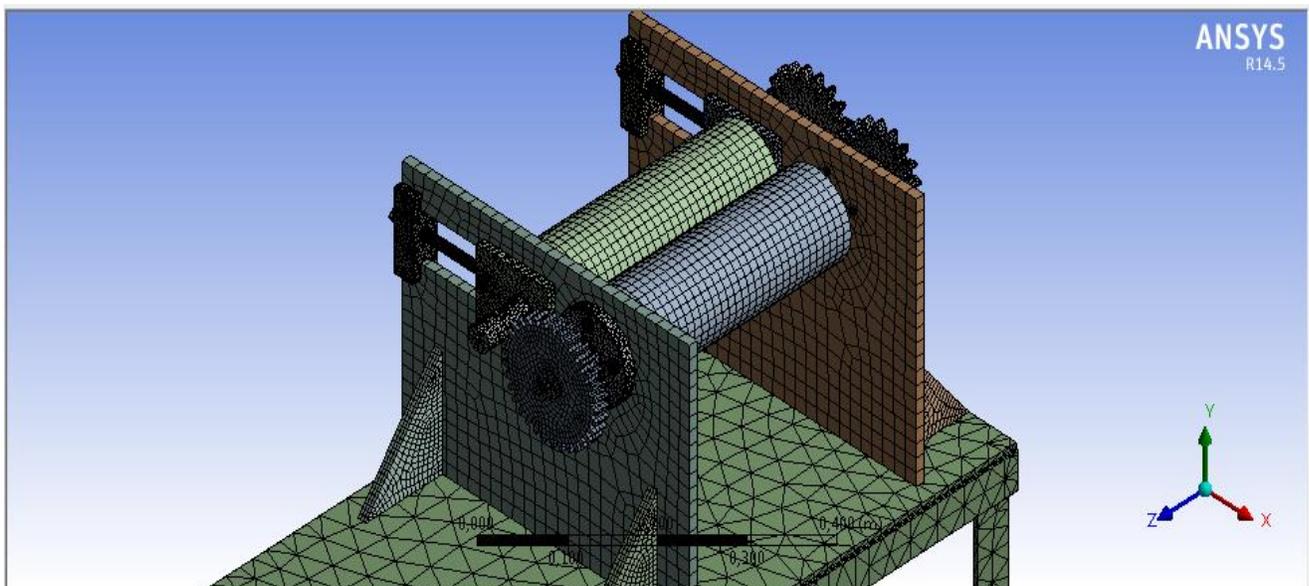
5.2.3. Mallado

Discretización y comportamiento local. Se definió que la mejor malla sería la triangular debido a que es un modelo sólido con curvaturas. En algunas partes del modelo como en curvaturas en ángulos, la malla era irregular, por lo que se optó por un refinamiento de malla. En la figura 28 se puede observar el mallado. Las características del mallado son las siguientes:

- Relevancia 100 de mallado
- Forma de mallado: Triangular
- Refinamiento: 2 Face Sizing

2 Mapped Face Meshing

Figura 28: Mallado Molino de caucho

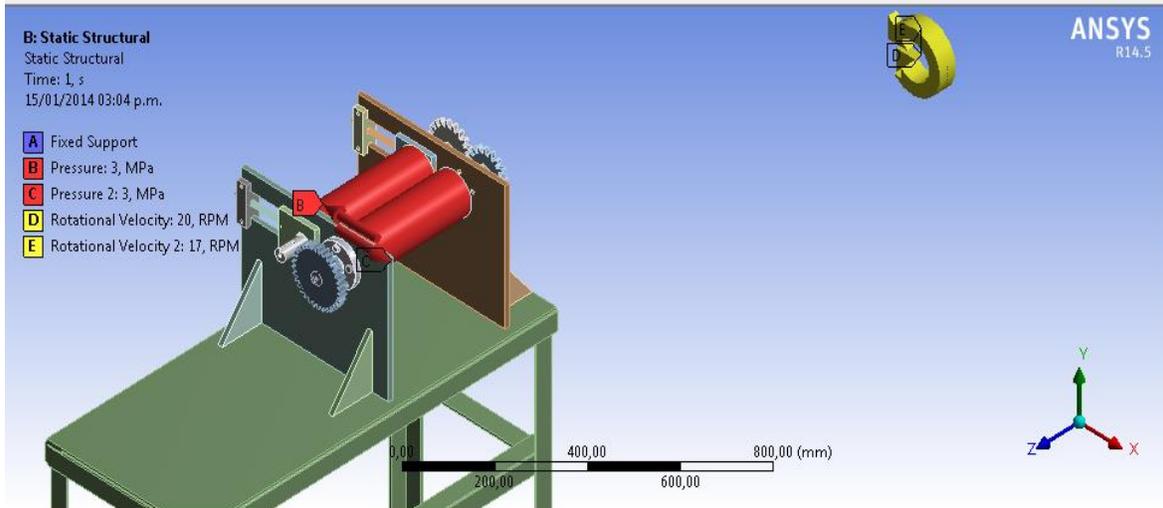


Fuente: Autor.

5.2.4. Condiciones de frontera

Las cargas son 2 presiones ejercidas por el caucho al pasar por el medio de los 2 rodillos. Se ubican en el modelo de ANSYS utilizando una magnitud de 3 Mpa para cada cilindro correspondientes al valor al que se desempeña la maquina en un trabajo real. Se agregaron cargas rotacionales de cada rodillo generadas por la velocidad de giro de los mismos (una velocidad de 20 rpm y la otra de 17 rpm). Por último se ubicó la máxima temperatura que pueden alcanzar los rodillos que corresponde a 60°C como resultado de la fricción del caucho, como se puede observar en la figura 29.

Figura 29: Condiciones de frontera

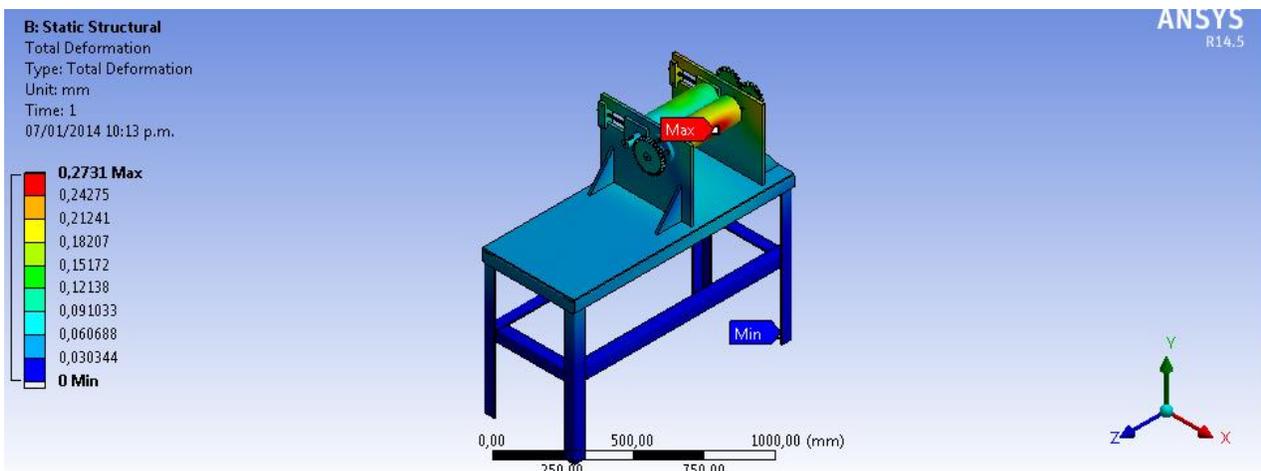


Fuente: Autor.

5.2.5. Deformación total

Los valores de deformación obtenidos son del orden de 0,2731mm (ver figura 30) por lo tanto no es un problema para la estructura debido a que éste es el valor máximo de deformación y es un valor aceptable para el modelo con condiciones en las que la máquina funciona.

Figura 30: Deformación total

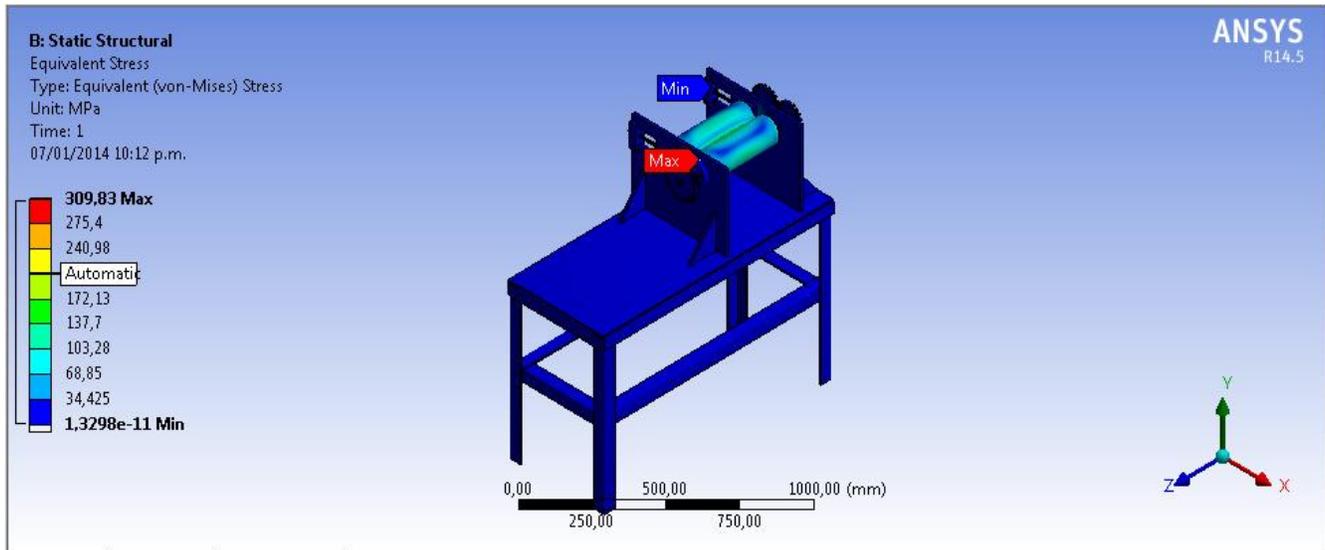


Fuente: Autor.

5.2.6. Esfuerzo equivalente

Los resultados obtenidos en la simulación (ver figura 31) están dentro del rango de lo esperado debido a que el esfuerzo máximo es de 309,83Mpa es más bajo que las propiedades mecánicas del material, la resistencia a la fluencia del acero AISI 1045 utilizado en la laminadora es de 413Mpa, este punto de presión máxima se encuentra en los tornillos de las tapas que tienen cinco tornillos donde se distribuye esta presión.

Figura 31: Esfuerzos equivalentes

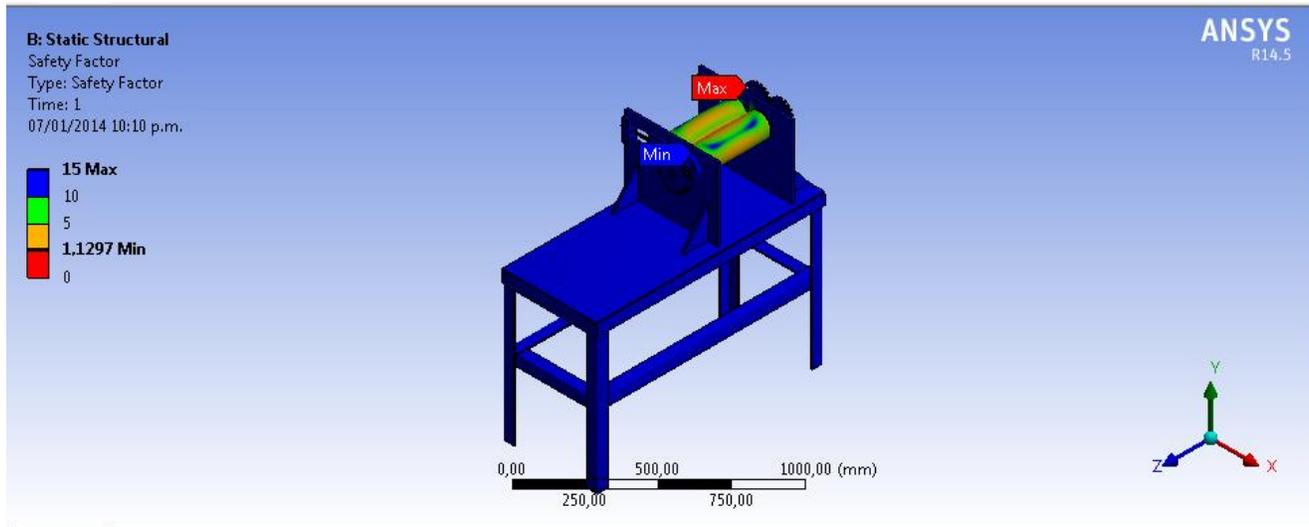


Fuente: Autor.

5.2.7. Factor de seguridad

El valor mínimo de factor de seguridad es de 1,1297, valor aceptable para esta máquina debido a que su uso no es prolongado ni repetitivo y está por encima de los valores estipulados por la industria. El punto donde se presenta el valor mínimo no es crítico ya que es una pieza fácil de reemplazar y en caso de ruptura no representaría peligro para el operador. El factor de seguridad se presenta en la figura 32.

Figura 32: Factor de seguridad



Fuente: Autor.

5.3. ANÁLISIS DE LOS DISEÑOS.

Al ensamblar las piezas diseñadas en el software SOLIDWORKS, se logró obtener un empalme adecuado sin errores de exceso y sin fallas en medidas.

Posteriormente se analizó con el software ANSYS, exponiendo la máquina laminadora y mezcladora a condiciones de trabajo, dando como resultado un diseño correcto, con una deformación mínima que no afectaría la máquina, sin roturas del material por los esfuerzos producidos y con un factor de seguridad viable.

De acuerdo a los resultados la máquina puede ser construida, teniendo en cuenta los requerimientos dados de diseño y siguiendo las normas respectivas para la construcción de la misma.

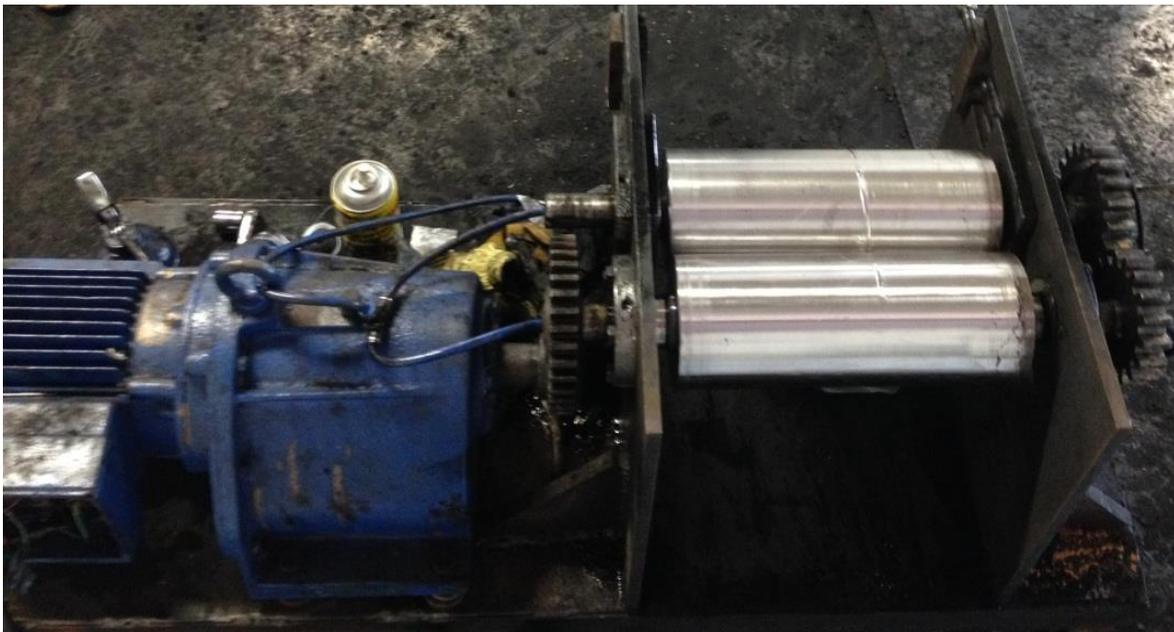
6. EQUIPOS UTILIZADOS

Para la elaboración de este proyecto, se utilizaron los equipos de los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga que se describen a continuación.

6.1. MEZCLADORA DE CAUCHO

Para el mezclado y laminado se utilizó la mezcladora del laboratorio de Procesos Industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga (ver Figura 33), el cual cuenta con un motor reductor de corona de 3 hp (caballos de potencia) trifásico, transmisión de potencia por engranajes, sistema de refrigeración por agua para las masas de mezclado y graduación de laminado.

Figura 33. Molino de caucho

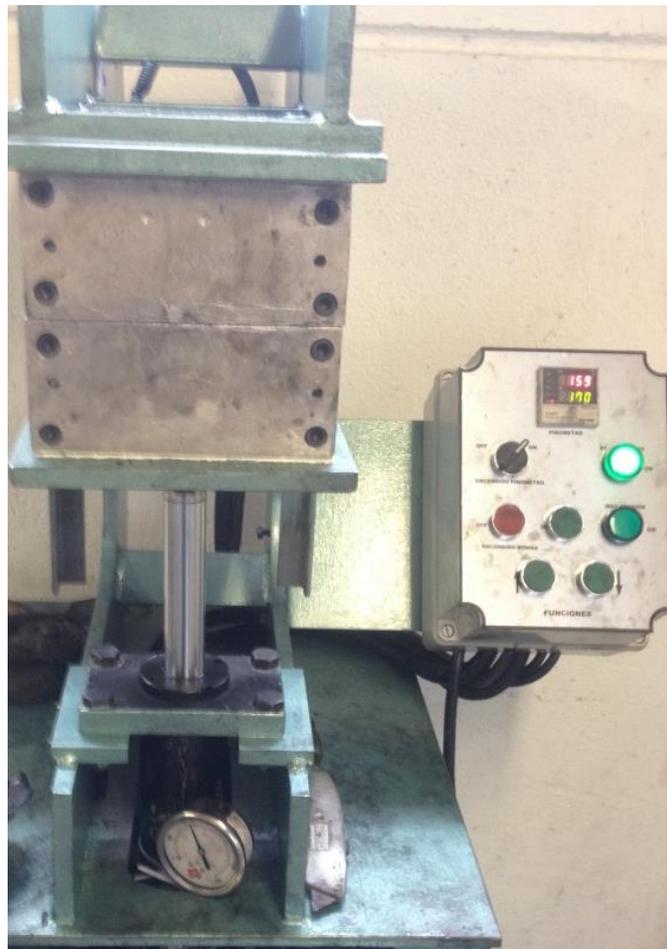


Fuente: Autor.

6.2. VULCANIZADORA DE CAUCHO

Para el vulcanizado se utilizó la vulcanizadora (ver Figura 34) del laboratorio de Procesos Industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, la cual cuenta con una unidad hidráulica de 2 hp (caballos de potencia), su sistema de control es a través de electroválvula y control de presión. El molde en aluminio para mejor transferencia de calor el cual cuenta con sensor y control de temperatura.

Figura 34: Vulcanizadora



Fuente: Autor.

6.3. INSTRUMENTO MEDIDOR DE DUREZA HARTIP1500

Para la medición de la dureza de las probetas se utilizó el instrumento medidor de dureza HARTIP 1500 (ver Figura 35) del laboratorio de Procesos Industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, el cual cuenta con un sistema de sonda y un procesador de datos, que por medio de impacto arroja un valor determinado en un visor. Adicionalmente cuenta con auto calibración.

Figura 35: Medidor HARTIP 1500



Fuente: Autor.

6.4. MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS SHIMADZU UH-500KN

Para la medición de la resistencia a la compresión de las probetas se utilizó la máquina universal (ver Figura 36) del laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, que permite someter materiales a compresión y tracción mediante mordazas accionadas por un sistema hidráulico, arrojando resultados del desplazamiento y la carga aplicada a la probeta.

Figura 36: Maquina universal de ensayos



Fuente: Autor

7. PROCESO DE MEZCLADO Y VULCANIZADO

7.1. MATERIA PRIMA

7.1.1. Cauchos

Para la elaboración de las probetas se utilizaron los cauchos HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ESTIRENO – BUTADIENO (SBR), donde uno es natural y el otro sintético, estos se adquirieron en balas de 25 kg. Se decidió usar estos tipos de cauchos ya que son compatibles a la mezcla y se pueden vulcanizar.

Figura 37: Caucho SBR y natural



Fuente: Autor.

7.1.2. Tipos de aceleradores

Los aceleradores usados fueron el MBT y el thiuram (ver figura 38). Estos aceleradores fueron utilizados ya que el MBT ayuda en gran parte al vulcanizado y

cura del caucho, por lo que puede empezar a vulcanizar a temperaturas más bajas que el azufre y es compatible con los cauchos naturales y sintéticos utilizados en la mezcla.

El thiuram es un acelerador secundario que sirve para dar consistencia a la mezcla en el vulcanizado y que puede dar cura al mezclarse con azufre, sirviendo de apoyo al MBT. De esta forma al tener una mezcla con estos dos aceleradores, se puede generar un mejor vulcanizado a un menor tiempo.

Figura 38: Aceleradores



Fuente: Autor.

7.1.3. Azufre

El azufre (ver figura 39) fue utilizado en el vulcanizado, ya que al ser mezclado con el caucho crudo mejora su dureza y resistencia, además es compatible con los aceleradores mencionados anteriormente. También se decidió usar por sus bajos costos y reconocida eficiencia en el proceso de vulcanizado, porque hace un enlace doble con el carbono del elastómero que al someterse a altas presiones y temperaturas logra el vulcanizado adecuado.

Figura 39: Azufre



.Fuente: Autor.

7.1.4. Negro de humo

El negro de humo (ver figura 40) fue utilizado porque posee partículas de carbono y al ser mezclado con el caucho y los demás componentes, permite una mejor mezcla y composición a la hora de la vulcanización favoreciendo la formación de los enlaces dobles con azufre. También ayuda a la resistencia a la abrasión y es el responsable del color negro de la probeta.

Figura 40: Negro de humo



Fuente: Autor.

7.2. PROPORCIÓN DE MEZCLAS Y PROBETAS

Para la fabricación de las probetas se utilizó la misma cantidad de aditivos en el mezclado de todas las probetas a fin de no agregar variables que impidan analizar la relación entre los porcentajes de HEVEA BRASILIENSIS Y HULE ESTIRENO – BUTADIENO (SBR) y las curvas de correlación de dureza y resistencia. En la figura 41 se aprecian los cauchos y los aditivos antes de la mezcla.

Figura 41: Mezclas de cauchos



Fuente: Autor.

Para la mezcla de caucho se tomó como referencia un peso total de 800 gr. La cantidad de los aditivos se tomó en base a recomendaciones de consultores expertos de la industria del caucho de la siguiente forma: los aceleradores deben ser entre un 0,2 y 0,8% del peso del caucho; el azufre debe estar entre el 0,5 y 3% del peso del caucho y el negro humo debe estar entre el 20 y 40% del peso de los cauchos.

En este caso se utilizó 6 gr de MBT y 2 gr de THIURAM, que corresponden al 0,75% y 0,25% (0,2 y 0,8% recomendado) del peso del caucho respectivamente.

Se usó menor cantidad de THIURAM que de MBT pues este es un acelerador secundario. Se agregó 8 gr de azufre que corresponde al 1% y 160 gr de negro humo que corresponde a 20% del peso del caucho.

Teniendo en cuenta que se usaron los mismos pesos de aditivos, azufre y negro humo en cada probeta, el peso total de las mezclas es de **976 gr**, como se detalla en la siguiente tabla 2.

Tabla 2: Cantidades de aceleradores, cauchos y negro de humo

M	CAUCHO NATURAL		CAUCHO SINTETICO		NEGRO HUMO		AZUFRE		MBT		THIURAM	
	%	Gr	%	gr	% peso caucho	gr	% peso caucho	gr	% peso caucho	gr	% peso caucho	gr
1	0	0	100	800	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
2	10	80	90	720	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
3	20	160	80	640	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
4	30	240	70	560	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
5	40	320	60	480	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
6	50	400	50	400	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
7	60	480	40	320	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
8	70	560	30	240	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
9	80	640	20	160	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2
10	90	720	10	80	20	160	1	8	0,75	6	0,25	2

Fuente: Autor.

7.3. MEZCLADO

Se realizaron mezclados preliminares para determinar el tiempo de mezclado adecuado, donde el tiempo de homogenización de las mezclas en el molino, se estableció entre 50 y 60 minutos.

Antes de empezar con el mezclado, se tuvieron en cuenta algunas normas de seguridad: Con respecto a la indumentaria, se usó tapa bocas debido a que algunos aceleradores son tóxicos y para evitar la respiración de carbón del negro de humo; no usar guantes y mantener las mangas recogidas o cortas para evitar accidentes en el molino (Ver figura 42). Se asignó una persona al apagado de la maquina en caso de algún inconveniente.

Figura 42: Seguridad en el molino



Fuente: Autor.

Antes de empezar con las mezclas se cortaron las cantidades correspondientes de caucho y se empacaron los aditivos para el mezclado como se muestra en la figura 43 (negro de humo, aceleradores y azufre) previamente pesados en una balanza digital para garantizar la cantidad adecuada en las mezclas; la balanza utilizada es analítica por lo que otorga una alta precisión, este es de marca LEXUS referencia: mix-a3000

Figura 43: Cantidad de aditivos



Fuente: Autor.

Para empezar se laminó el caucho sintético durante dos minutos, seguido del caucho natural que fue menos maleable. Se pasó por el molino durante 7 minutos para añadir calor por fricción y facilitar la mezcla con el caucho sintético, posteriormente se mezclaron los dos cauchos en el molino por aproximadamente ocho minutos hasta que se observó homogeneidad y consistencia entre los cauchos, esta homogeneidad se observa al cortar el caucho y no observar poros o grandes partículas de caucho sin estar adheridas a la mezcla. En la figura 44 se observa la mezcla de los cauchos.

Figura 44: Mezcla de cauchos



Fuente: Autor.

Después de mezclar los cauchos, se agregó uno de los aceleradores y se mezcló por 5 minutos, posteriormente se hizo lo mismo con el segundo acelerante, para después agregar el negro de humo y mezclarlo durante 7 o 10 minutos tiempo en el que se dio la adherencia del negro humo con la mezcla, hasta formar una mezcla compacta (ver figura 45).

Finalmente se agregó el azufre mezclando hasta homogenizar y pasar a laminarlo de forma más gruesa para el vulcanizado.

Figura 45: Mezcla de aditivos



Fuente: Autor.

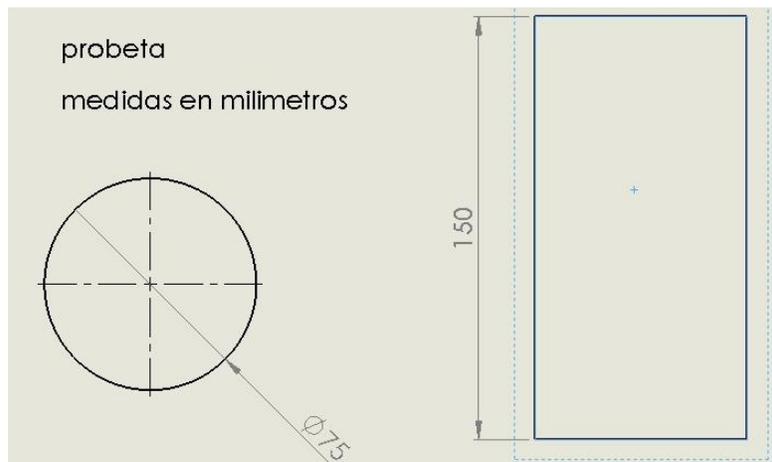
7.4. VULCANIZADO

El proceso del vulcanizado viene a continuación del mezclado. En este paso las probetas deben reducirse hasta alcanzar un peso entre 650 y 700 gramos para evitar el exceso de material en los moldes a la hora del vulcanizado.

Se realiza un pre-moldeo con la mezcla en la vulcanizadora para retirar y evitar el exceso de material a la hora del vulcanizado y permitir un mejor cierre del molde. Se prenden las resistencias de la vulcanizadora que trabajan en un rango de

temperatura de 160 a 170 grados Celsius y una vez alcanzada la temperatura se pone la mezcla pre-moldeada y se ejerce presión lentamente hasta llegar a la máxima presión para el vulcanizado. En la figura 46 se presentan las medidas del molde y en la figura 47 se puede apreciar la vulcanizadora encendida.

Figura 46: Medidas molde



Fuente: Autor.

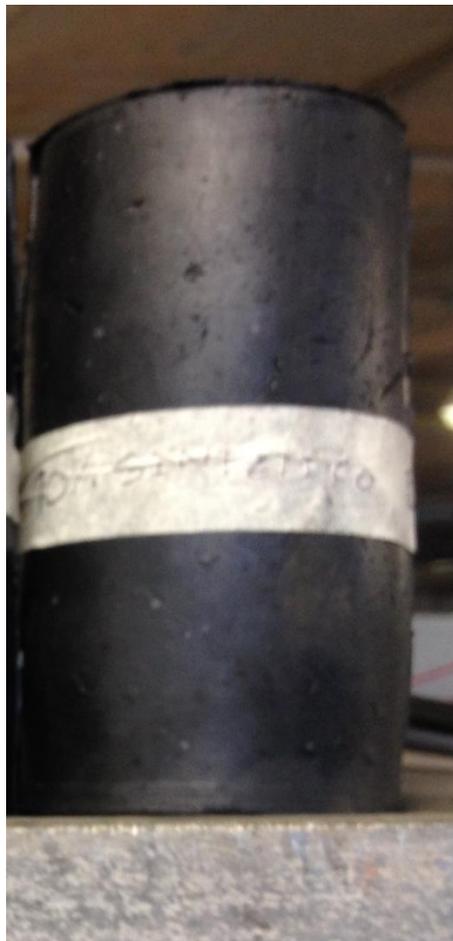
Figura 47: Vulcanizadora encendida



Fuente: Autor.

El proceso del vulcanizado se realiza por un periodo de 16 minutos (periodo previamente determinado por medio de pruebas donde se observa en qué rango de tiempo la probeta salía en mejores condiciones para evitar que ésta quede cruda o se quemé). Una vez pasado este tiempo se retira la probeta ya vulcanizada del molde (ver figura 48) y se retira el exceso de material adherida a ésta.

Figura 48: Probeta vulcanizada



Fuente: Autor.

Una vez vulcanizadas las probetas (ver figura 49) se dejan enfriar a temperatura ambiente, donde son marcadas de acuerdo al porcentaje de caucho utilizado en la

mezcla, para ser llevadas a las respectivas pruebas de compresión y dureza las cuales serán especificadas en los siguientes capítulos.

Figura 49: Probetas vulcanizadas



Fuente: Autor.

8. CARACTERIZACIÓN DEL CAUCHO

Una vez vulcanizadas las probetas se procedió a realizar las pruebas de dureza y resistencia a la compresión para comprobar qué mezcla y con qué porcentajes de cauchos se presenta la mayor dureza y resistencia a la compresión.

8.1. PRUEBAS DE DUREZA

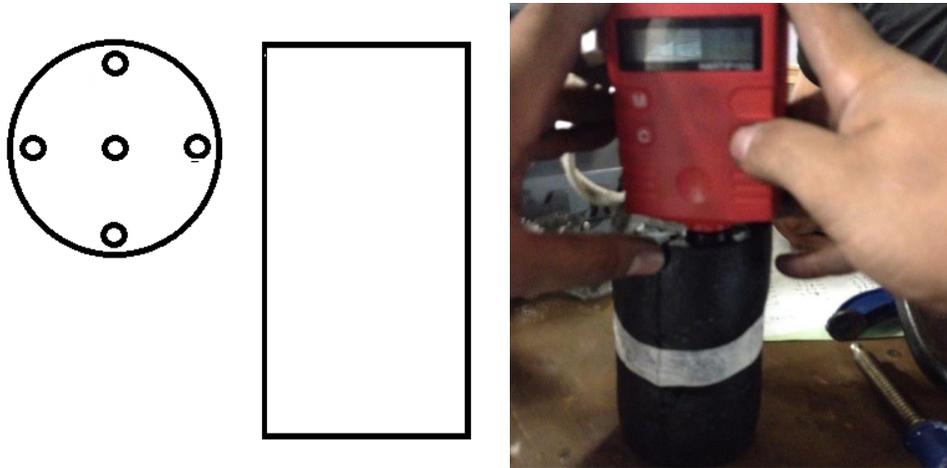
La prueba de dureza como se mencionó anteriormente, fue aplicada con el instrumento de prueba HARTIP 1500 el cual tiene una exactitud de +/- 0,4%, a través de este se midió la dureza shore del caucho con el siguiente método (Esta prueba de dureza carece de una norma estándar para el control de esta):

Se configuro el instrumento de medición de la siguiente manera:

- Prender el instrumento de medición HARTIP 1500 con el botón ON/OFF
- Presionar M durante 4 segundos, DIRE (dirección), con C se ajusta.
- Presionar M por 1 segundo, MATE (material), con C se busca M1 que corresponde al caucho.
- Presionar M por 1 segundo, CONV (tipo de prueba), con C se busca HSD (Shore) que es la prueba a realizar al caucho.
- Presionar M por 1 segundo, AVER (promedio), con C busca el valor a promediar en este caso se ajusta en 5. Presionar M y queda listo para su uso.

Se escogieron 5 puntos para todas las probetas como se muestra en la figura 50.

Figura 50: Pruebas de dureza en probetas



Fuente: Autor.

Se tomaron 5 datos de dureza en cada punto, Se obtuvo el promedio de cada punto y posteriormente un promedio de estos mismos.

8.1.1. Tablas de pruebas de dureza.

En las tablas 3 a 12 se consignan los resultados de las pruebas de dureza.

Tabla 3: Prueba de Dureza 100% caucho sintético.

100% sintético					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	68,3	64,3	71,4	66,2	67,2
prueba # 2	65,4	67,4	66,5	67,7	67,7
prueba # 3	68,4	63,5	69,7	68,4	68,9
prueba # 4	66,7	64,1	66,7	68,1	70,1
prueba # 5	71,1	65,4	65,7	67,2	68,4
promedio	67,2	64,8	68,6	67,6	68,5
promedio total					67,3

Fuente: Autor.

Tabla 4: Prueba de Dureza 90% caucho sintético 10% caucho natural.

90% sintético 10% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	70,2	70,1	66,2	62,9	63,9
prueba # 2	70,9	69,2	66,7	60,3	63,9
prueba # 3	70,7	69,2	67,1	60,1	64,2
prueba # 4	70,4	70,4	65,2	62,3	67,1
prueba # 5	70,9	70,1	67,1	65,5	61,3
promedio	70,6	69,8	66,5	68,0	64,1
promedio total					67,8

Fuente: Autor.

Tabla 5: Prueba de Dureza 80% caucho sintético 20% caucho natural.

80% sintético 20% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	67,2	68,9	68,1	68,1	62,9
prueba # 2	67,4	69,1	69,7	67,2	67,5
prueba # 3	67,7	69,2	68,4	66,9	67,7
prueba # 4	68,4	69,2	68,7	67,9	67,5
prueba # 5	66,5	69,2	68,7	68,7	67,9
promedio	67,4	69,1	68,7	67,8	66,7
promedio total					67,9

Fuente: Autor.

Tabla 6: Prueba de Dureza 70% caucho sintético 30% caucho natural.

70% sintético 30% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	68,4	68,7	68,1	69,4	68,5
prueba # 2	68,2	69,4	67,4	67,2	69,2
prueba # 3	67,2	66,2	69,5	67,7	67,4
prueba # 4	66,9	67,4	69,4	67,5	68,3
prueba # 5	69,5	68,5	66,4	67,7	68,1
promedio	68,0	68,0	68,2	67,9	68,3
promedio total					68,1

Fuente: Autor.

Tabla 7: Prueba de Dureza 60% caucho sintético 40% caucho natural.

60% sintético 40% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	69,5	68,4	67,4	68,2	68,5
prueba # 2	69,4	70,1	68,5	68,5	67,2
prueba # 3	69,7	64,4	69,4	68,7	67,9
prueba # 4	69,7	69,9	67,7	68,9	68,1
prueba # 5	69,1	69,1	68,1	68,9	67,4
promedio	69,5	68,4	68,2	68,6	67,8
promedio total					68,5

Fuente: Autor.

Tabla 8: Prueba de Dureza 50% caucho sintético 50% caucho natural.

50% sintético 50% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	67,2	69,7	66,7	69,6	68,3
prueba # 2	67,1	68,3	70,3	68,4	67,7
prueba # 3	69,7	70,4	67,1	69,2	68,9
prueba # 4	68,7	67,4	69,4	70,3	69,2
prueba # 5	69,5	69,5	68,4	67,1	67,8
promedio	68,4	69,1	68,4	68,9	68,9
promedio total					68,7

Fuente: Autor.

Tabla 9: Prueba de Dureza 40% caucho sintético 60% caucho natural.

40% sintético 60% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	71,4	68,9	68,1	67,4	68,5
prueba # 2	73,1	69,5	67,9	68,5	70,9
prueba # 3	72,1	70,2	67,9	70,1	71,2
prueba # 4	71,1	70,2	67,7	70,4	69,4
prueba # 5	71,2	69,5	67,7	69,2	70,1
promedio	71,8	69,7	67,9	69,1	70,0
promedio total					69,7

Fuente: Autor.

Tabla 10: Prueba de Dureza 30% caucho sintético 70% caucho natural.

30% sintético 70% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	69,4	70,4	69	69,6	70,1
prueba # 2	68,9	70,3	70,5	79,6	70,4
prueba # 3	69,8	69,3	69,3	67,4	69,3
prueba # 4	79,7	69,2	68,5	67,4	69,9
prueba # 5	70,2	70,1	70,3	67,2	69,3
promedio	71,6	69,9	69,5	70,2	69,8
promedio total					70,2

Fuente: Autor.

Tabla 11: Prueba de Dureza 20% caucho sintético 80% caucho natural.

20% sintético 80% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	71,1	70,7	70,2	69,4	69,2
prueba # 2	72,2	71,1	69,2	69,4	67,1
prueba # 3	72,6	71,2	68,5	71,9	69,4
prueba # 4	72,4	71,6	69,7	69,1	70,2
prueba # 5	71,2	71,2	69,1	68,9	70,4
promedio	71,9	71,2	69,3	69,7	69,3
promedio total					70,3

Fuente: Autor.

Tabla 12: Prueba de Dureza 10% caucho sintético 90% caucho natural.

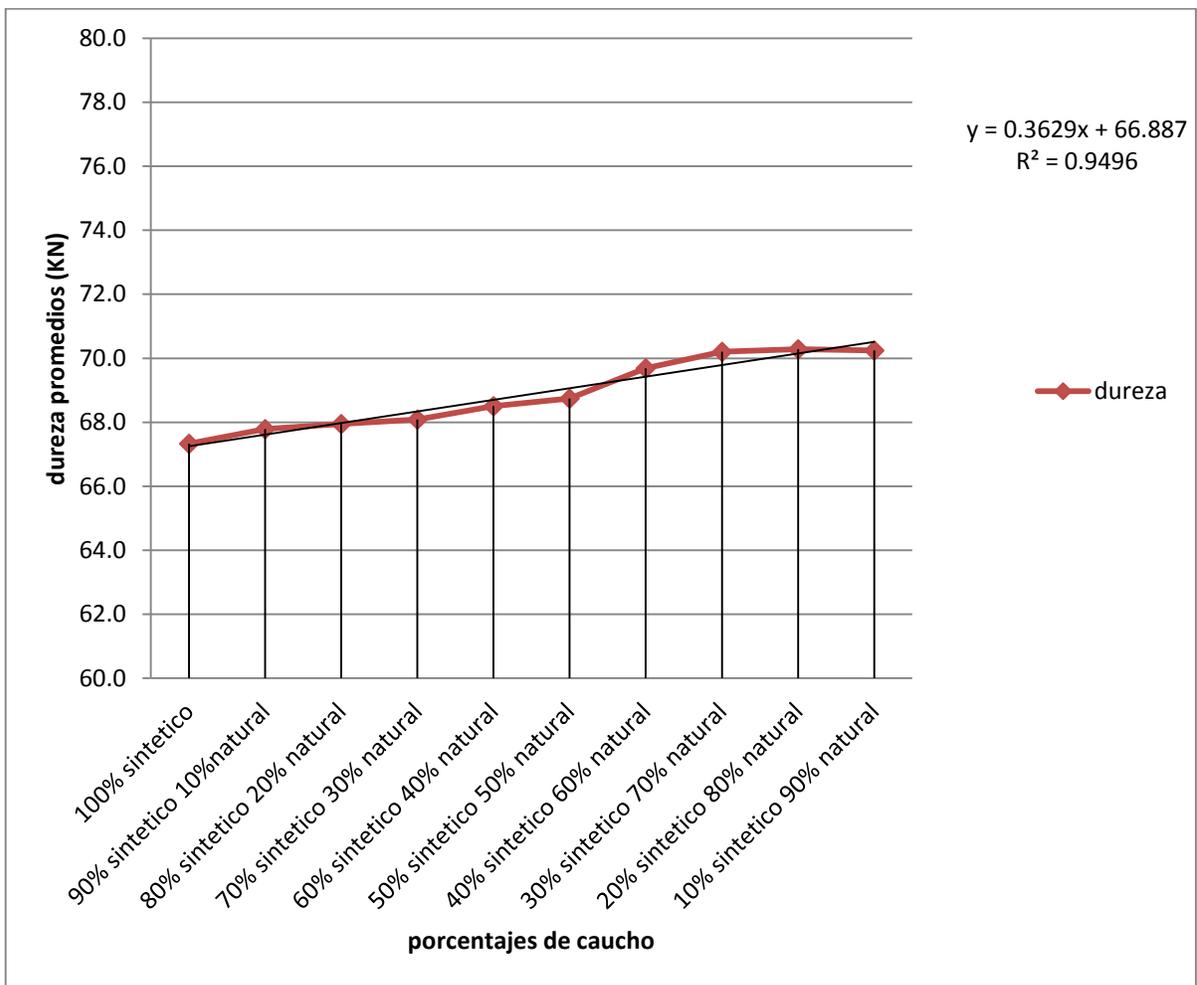
10% sintético 90% natural					
Ítem	punto 1	punto2	punto 3	punto 4	punto 5
prueba # 1	71,5	69,4	69,4	68,5	70,5
prueba # 2	69,2	70,4	68,6	68,5	69,9
prueba # 3	70,1	71,4	69,5	79,5	69,7
prueba # 4	69,4	69,5	68,7	67,9	70,2
prueba # 5	70,4	70,6	69,5	67,5	69,9
promedio	70,1	70,3	70,4	70,4	70,0
promedio total					70,2

Fuente: Autor.

8.1.2. Curvas de correlación.

Con los datos obtenidos se procedió a realizar las gráficas respectivas para el análisis de resultados. En la figura 51 se muestra la dureza obtenida mediante la prueba shore de cada porcentaje de caucho.

Figura 51: Promedios de dureza vs porcentajes de caucho



Fuente: Autor.

8.1.3. Análisis de resultados de Dureza

A partir de los datos obtenidos y graficados de las probetas con diferentes porcentajes de caucho sintético y caucho natural, contra el promedio de dureza se observa que la menor dureza corresponde a la probeta de 100% sintético con 65,9 y la muestra con mayor dureza que corresponde a 20% sintético 80% natural con 70,3.

Se puede observar que hay un aumento de la dureza directamente proporcional al porcentaje de caucho natural presente en la mezcla. Se presenta una excepción en la última probeta correspondiente a 10% sintético 90% natural en donde hay un leve descenso de 70,3 a 70,2 en la dureza con relación al punto anterior, lo que puede deberse a la dificultad de mezclar el negro humo en ciertas mezclas. De esta forma se encontraría una correlación directamente proporcional, debido a que la dureza aumenta a medida a que el porcentaje de caucho natural es mayor, mejorando a si las curvas de correlación de las pruebas realizadas respecto a cada punto.

8.2. PRUEBAS DE COMPRESIÓN.

Las pruebas de compresión se realizaron en el laboratorio de Resistencia de Materiales del de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, con la maquina universal.

Las probetas de caucho contaban con una longitud de 15 centímetros, sin embargo, fue necesario dejar un espacio de seguridad para evitar que las mordazas de la máquina universal se tocan, por lo que se aplicó fuerza a compresión sobre cada probeta comprimiendo hasta 2,4cm. Se registraron los datos de deformación y fuerza aplicada, arrojados por la máquina para cada caso correspondiente.

8.2.1. Tablas pruebas de compresión.

Las tablas 13 a la 22 se realizaron teniendo en cuenta los datos arrojados por la maquina universal. Incluyen fuerza en KN y deformación en mm. Para calcular el esfuerzo es necesario conocer el área transversal de la probeta que es de 0,00442m².

Tabla 13: Prueba de compresión 10% caucho sintético 90% caucho natural.

10% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,2	45,25	0,936
0,5	113,122	1,872
0,7	158,37	2,808
1	226,244	3,744
1,5	339,366	4,68
1,7	384,615	5,616
2	452,488	6,552
4,5	1018,099	7,488
8,2	1855,204	8,424
31,2	7058,824	9,36

Fuente: Autor.

Tabla 14: Prueba de compresión 20% caucho sintético 80% caucho natural.

20% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,2	45,25	0,963
0,5	113,122	1,926
0,7	158,37	2,89
0,7	158,37	3,853
1	226,244	4,816
1,2	271,49	5,78
1,5	339,366	6,743
1,7	384,615	7,706
2	452,488	8,67
10,5	2375,565	9,633

Fuente: Autor.

Tabla 15: Prueba de compresión 30% caucho sintético 70% caucho natural.

30% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,5	113,122	0,8206
0,7	158,37	1,641
1	226,244	2,462
1,5	339,366	3,282
1,7	384,615	4,103
1,7	384,615	4,924
2,2	497,737	5,745
3,7	837,104	6,565
8,7	1968,326	7,386
53	11990,95	8,206

Fuente: Autor.

Tabla 16: Prueba de compresión 40% caucho sintético 60% caucho natural.

40% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,2	45,25	0,818
0,5	113,122	1,636
0,7	158,37	2,454
1	226,244	3,272
1,2	271,493	4,09
1,5	339,366	4,908
2,2	497,737	5,726
3,5	791,855	6,544
7,5	1696,833	7,362
52	11764,706	8,18

Fuente: Autor.

Tabla 17: Prueba de compresión 50% caucho sintético 50% caucho natural.

50% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,5	113,122	0,796
0,7	158,37	1,593
1	226,244	2,39
1,2	271,493	3,186
1,2	271,493	3,983
1,5	339,366	4,78
2,2	497,737	5,576
3,5	791,855	6,373
8	1809,954	7,17
26	5882,353	7,966

Fuente: Autor.

Tabla 18: Prueba de compresión 60% caucho sintético 40% caucho natural.

60% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,2	45,25	0,806
0,5	113,122	1,612
0,7	158,37	2,418
1	226,244	3,224
1,2	271,493	4,03
1,5	339,366	4,836
2	452,488	5,642
3,5	791,855	6,448
7,7	1742,081	7,254
42	9502,262	8,06

Fuente: Autor.

Tabla 19: Prueba de compresión 70% caucho sintético 30% caucho natural.

70% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,2	45,25	0,812
0,7	158,37	1,624
1	226,244	2,436
1,2	271,493	3,248
1,5	339,366	4,06
2	452,488	4,872
2,5	565,611	5,684
4,5	1018,099	6,496
6	1357,466	7,308
58	13122,172	8,12

Fuente: Autor.

Tabla 20: Prueba de compresión 80% caucho sintético 20% caucho natural.

80% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,2	45,25	0,736
0,5	113,122	1,473
1	226,244	2,21
1,2	271,493	2,946
1,5	339,366	3,683
1,7	384,615	4,42
2,5	565,611	5,156
4,5	1018,099	5,893
10,7	2420,814	6,63
60,5	13687,783	7,366

Fuente: Autor.

Tabla 21: Prueba de compresión 90% caucho sintético 10% caucho natural.

90% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,5	113,122	0,738
0,7	158,37	1,476
1	226,24	2,214
1,2	271,49	2,952
1,5	339,366	3,69
2	452,488	4,428
2,7	610,859	5,166
4,2	950,226	5,904
8,2	1855,204	6,642
23,7	5203,619	7,38

Fuente: Autor.

Tabla 22: Prueba de compresión 100% caucho sintético.

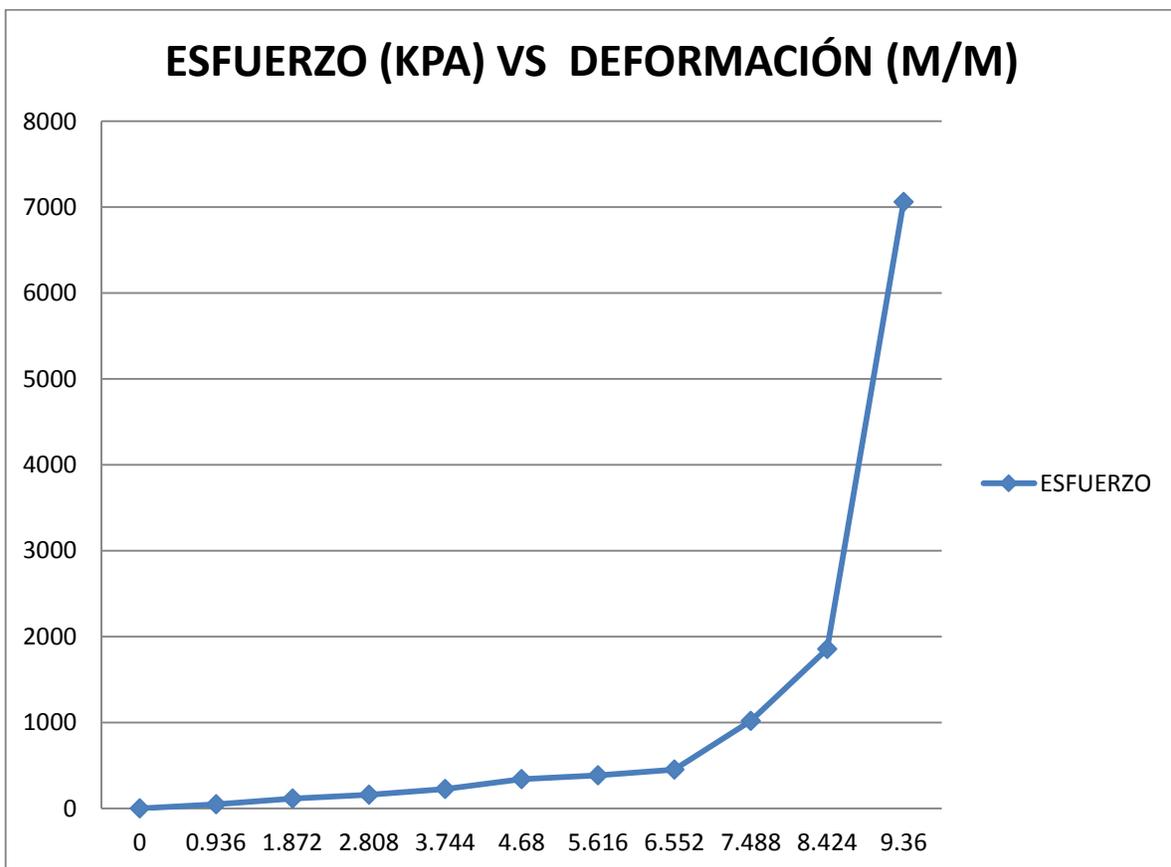
100% SINTETICO		
FUERZA(KN)	ESFUERZO(KPA)	DEFORMACION(M/M)
0	0	0
0,2	45,25	0,7993
0,5	113,122	1,598
0,7	158,37	2,398
1	226,244	3,197
1,5	339,366	3,996
2	452,488	4,924
2,5	565,611	5,597
4,5	1018,099	6,395
10,2	2307,692	7,194
41	9276,018	7,993

Fuente: Autor.

8.2.2. Curvas de correlación.

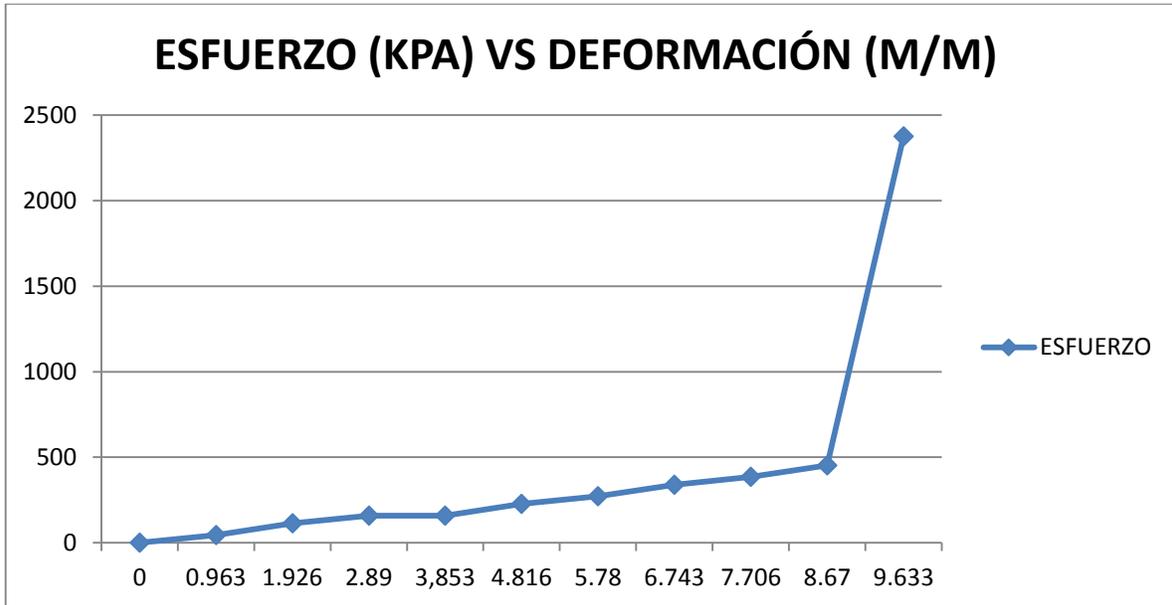
En las curvas de correlación se tomó en cuenta el esfuerzo y la deformación de cada una de las probetas realizando así diez graficas cada una con su respectiva ecuación y coeficiente de determinación, por último se realizó la gráfica para comparar el esfuerzo de las probetas cuando llegaron a los diez centímetros de deformación:

Figura 52: esfuerzo vs deformación 10% sintético 90% natural.



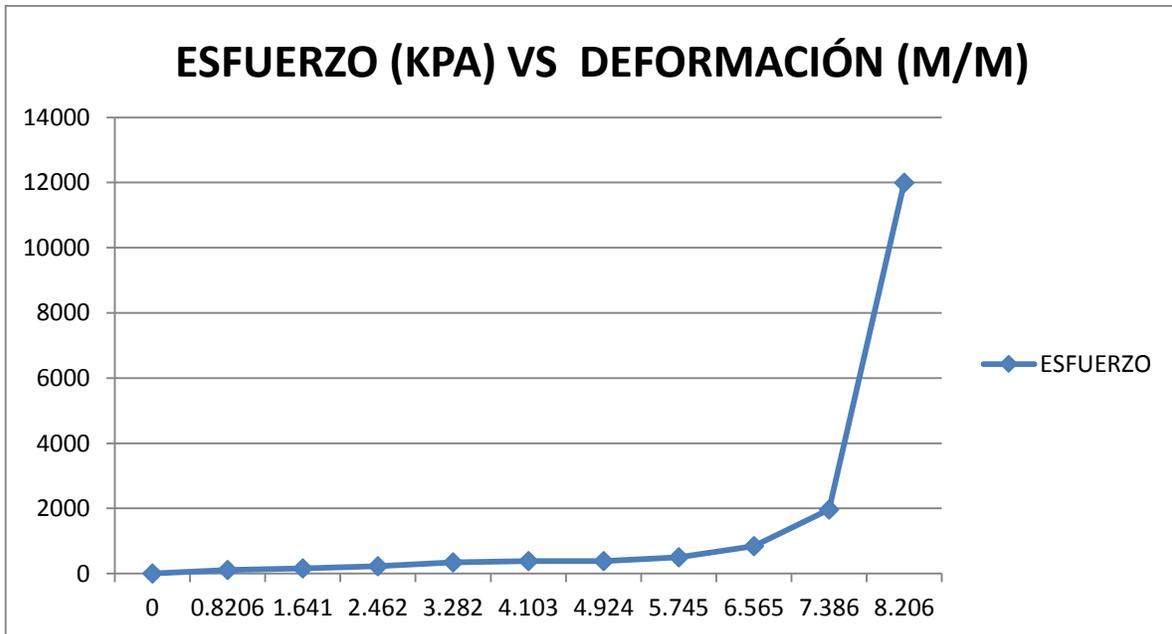
Fuente: Autor.

Figura 53: Esfuerzo vs deformación 20% sintético 80% natural.



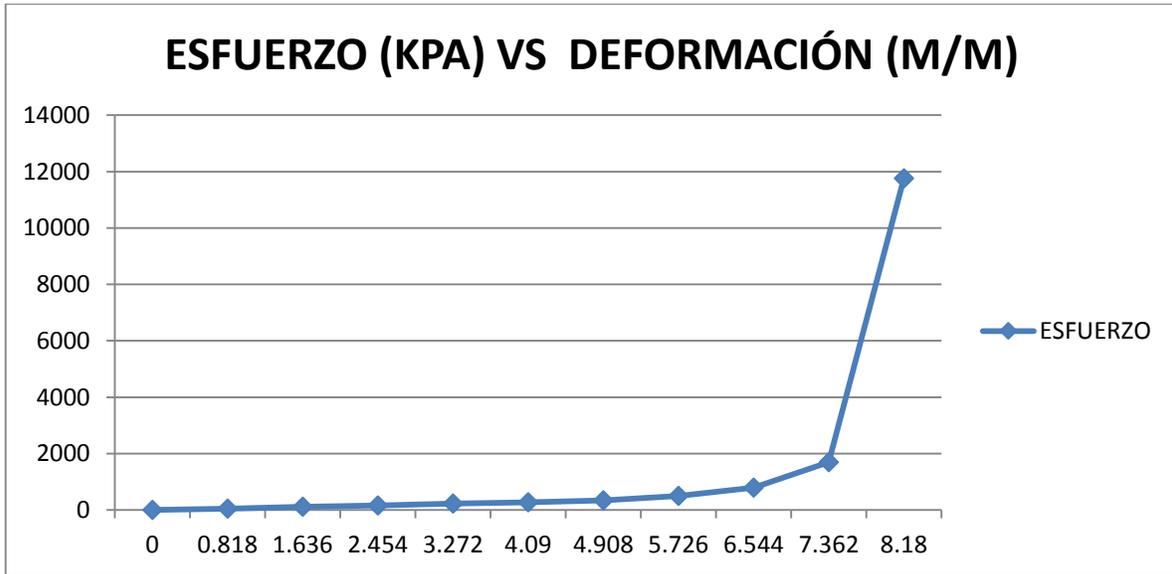
Fuente: Autor.

Figura 54: Esfuerzo vs deformación 30% sintético 70% natural.



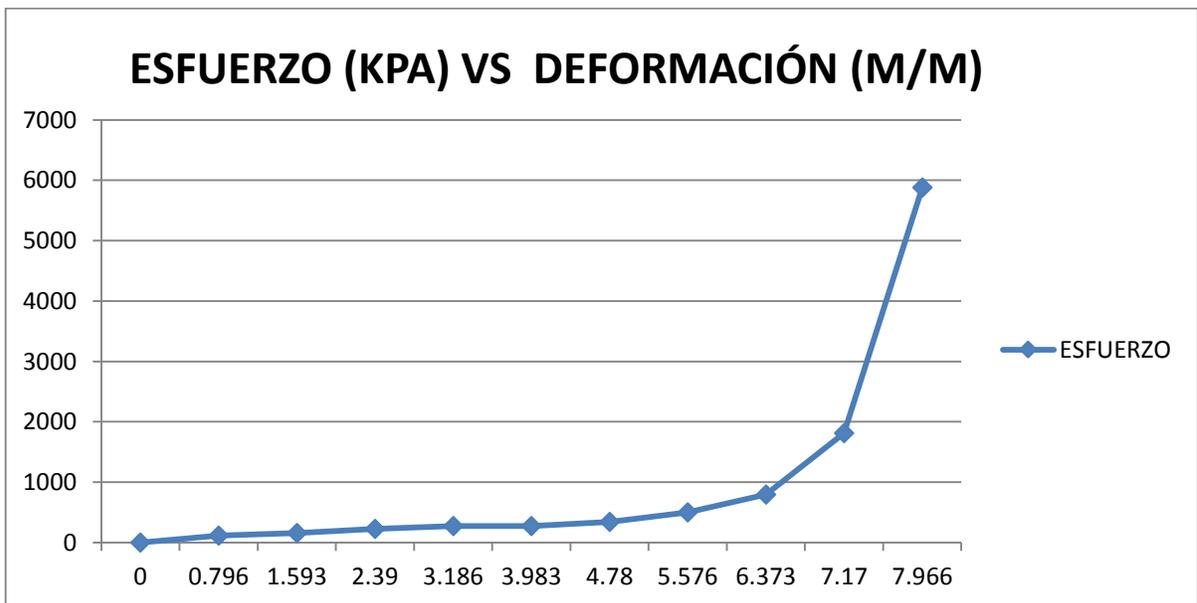
Fuente: Autor.

Figura 55: Esfuerzo vs deformación 40% sintético 60% natural.



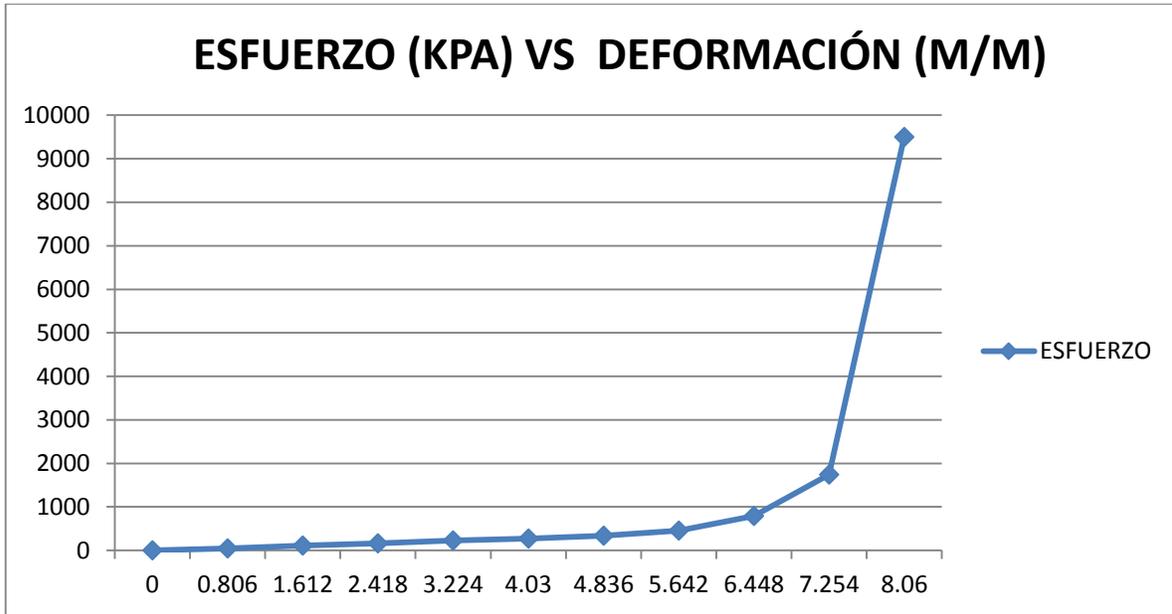
Fuente: Autor.

Figura 56: Esfuerzo vs deformación 50% sintético 50% natural.



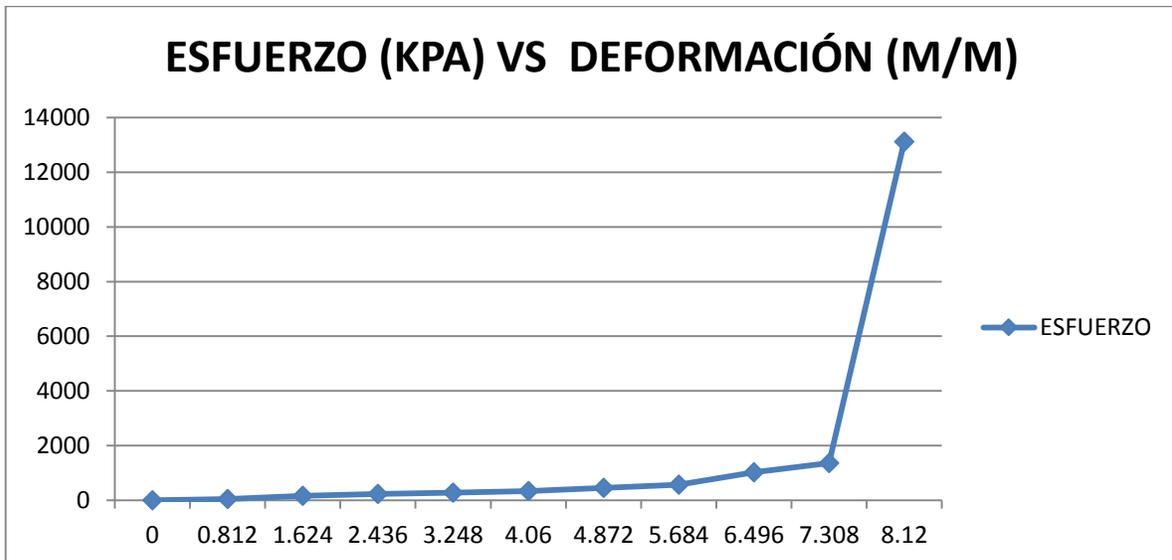
Fuente: Autor.

Figura 57: Esfuerzo vs deformación 60% sintético 40% natural.



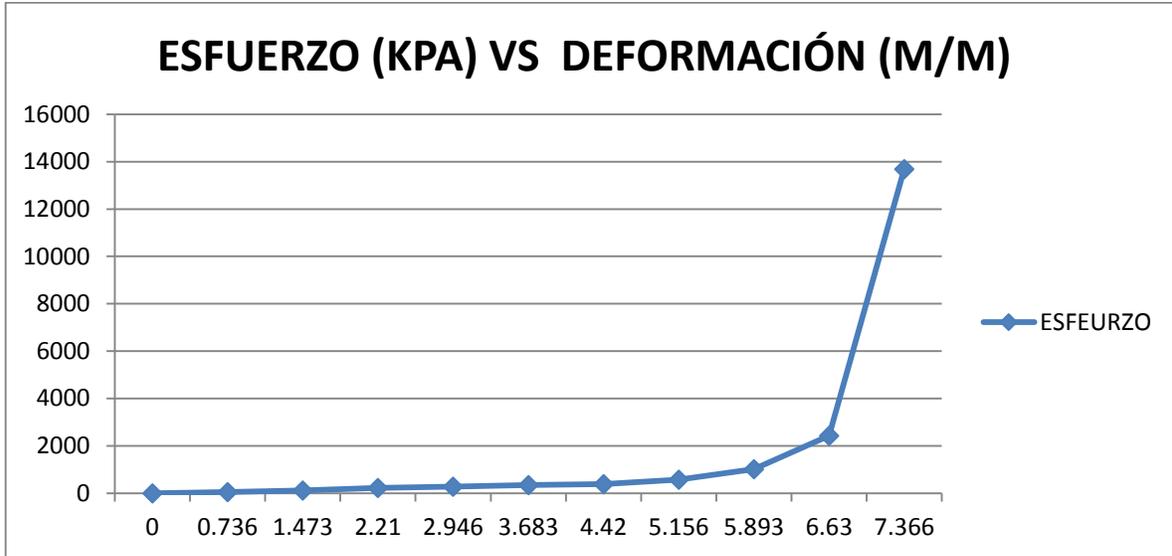
Fuente: Autor.

Figura 58: Esfuerzo vs deformación 70% sintético 30% natural.



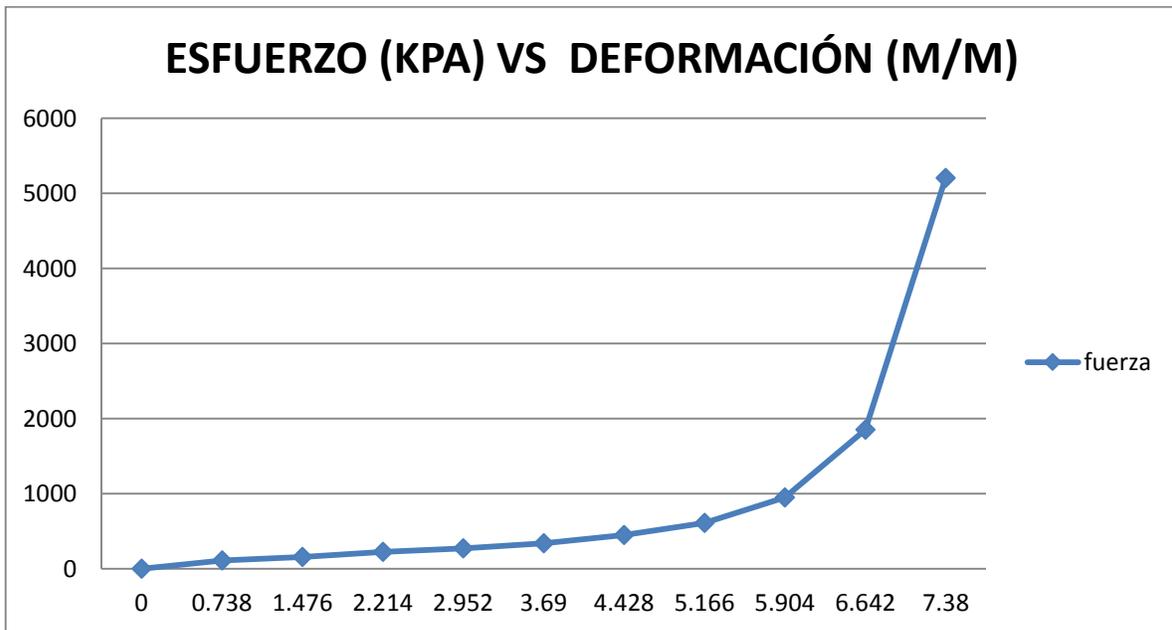
Fuente: Autor.

Figura 59: Esfuerzo vs deformación 80% sintético 20% natural.



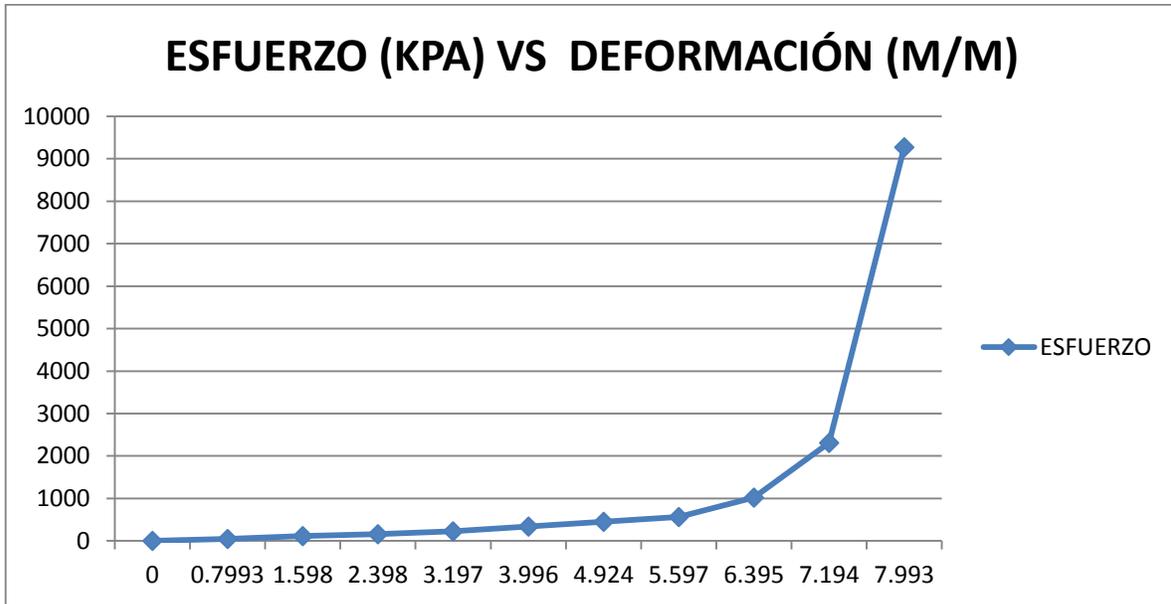
Fuente: Autor.

Figura 60: Esfuerzo vs deformación 90% sintético 10% natural.



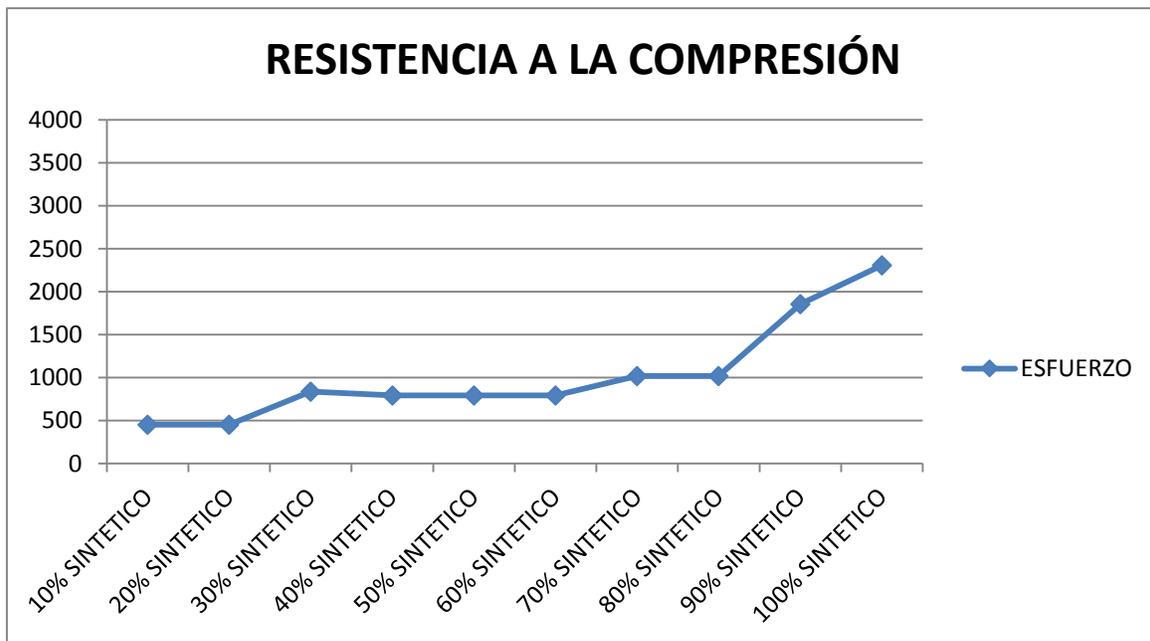
Fuente: Autor.

Figura 61: Esfuerzo vs deformación 100% sintético.



Fuente: Autor.

Figura 62: Esfuerzo de cada porcentaje de caucho en 10cm de deformación.



Fuente: Autor.

8.2.3. Análisis de resultados.

A partir de los datos obtenidos y graficados de las probetas con diferentes porcentajes de caucho sintético y caucho natural, contra el esfuerzo en 10 mm de deformación se observa que el mayor esfuerzo corresponde a la probeta de 100% sintético con 2307,692 y las muestras con menor esfuerzo corresponden a 10% sintético 90% natural y 20% sintético 80% natural con 452,488.

Las gráficas muestran una relación directamente proporcional entre el esfuerzo a la compresión y el porcentaje de caucho sintético presente en la mezcla. A medida que se aumenta la cantidad de caucho sintético SBR en las mezclas, se aumenta el esfuerzo, por lo que a menor cantidad de caucho natural, mayor esfuerzo a la compresión.

9. CONCLUSIONES

- El modelo prototipo resultado del diseño en el software SOLIDWORKS aplicado y probado en el software ANSYS arrojó un factor de seguridad mínimo de 1,1297 encontrándose en el rango aceptable > 1 que garantiza que exista un margen extra de prestaciones por encima de las mínimas estrictamente necesarias
- En los ensayos realizados la dureza es directamente proporcional al porcentaje de caucho natural presente en la mezcla, la curva se realizó con una ecuación lineal ($y = 0,3629x + 66,887$) y una relación ($R^2 = 0,9496$). La mayor dureza la refleja la probeta con una mezcla del 20% de caucho sintético y 80% de caucho natural y la menor dureza la probeta con una mezcla del 100% sintético
- En las pruebas efectuadas la resistencia a la compresión es inversamente proporcional al porcentaje de caucho natural presente en la mezcla. La mayor resistencia a la compresión la refleja la probeta con mezcla del 100% de caucho sintético y la menor resistencia a la compresión la refleja la probeta con 10% de caucho sintético y 90% de caucho natural.
- En todas las probetas elaboradas, aproximadamente el 18% corresponde a los aditivos (acelerantes y negro de humo) y el 82% restante corresponde a la mezcla de caucho. El 18% se mantiene constante y no es un factor influyente en los resultados de dureza y resistencia a la compresión, que dependen directamente de la cantidad de caucho sintético y natural presentes en la muestra, son las variables a tener en cuenta en cada probeta.
- Los resultados de la dureza y la resistencia a la compresión pueden verse afectados por los factores externos como lo son la humedad, la temperatura, la presión y las purezas de los reactivos, debido a que todo el proceso de

manufactura de las probetas se realizan en un ambiente no controlado donde estos factores no influyan.

- Se determino un tiempo promedio de mezclado de caucho entre 45 y 50 min, que pudo corroborarse durante la elaboración de las probetas con los siguientes tiempos: 2 min para el laminado del caucho sintético; 7 min para el laminado de caucho natural; 8 min para el mezclado de los 2 cauchos hasta homogenizar; 5 min para agregado y mezclado de acelerante 1; 5 min para agregado y mezclado de acelerante 2; 10 min para agregado y mezclado de negro de humo; 10 min para agregado y mezclado de azufre y finalmente laminado de mayor espesor, para un tiempo total de proceso de mezclado de 47 min. Este proceso tiene un aumento o disminución de tiempo de más o menos 3 min dependiendo del porcentaje de caucho natural presente, debido a la baja maleabilidad del mismo.

10. RECOMENDACIONES

- El molde de las probetas de la vulcanizadora es fijo y debido a la expansión de las probetas en el proceso de enfriado, éstas deben ser retiradas, por lo que se recomienda utilizar moldes removibles para poder dejar enfriar la probeta dentro del molde conservando su forma.
- Por motivos de mayor seguridad, se debe realizar la instalación de una parada de emergencia cerca de la zona de trabajo y dotar a los operarios de máscaras industriales de protección para la nariz, ojos y boca, así como de overol de trabajo con mangas cortas.
- Se recomienda que la zona de trabajo de la mezcladora y laminadora esté aislada o en un cuarto exclusivo de trabajo debido a la utilización de productos químicos en polvo que pueden afectar la salud de las personas cercanas al aérea de trabajo. También para facilitar la limpieza por la lámina negra que causa trabajar con partículas de carbón.
- El mezclado y laminado de los cauchos se debe iniciar con los rodillos un poco separados e ir cerrándolos a medida que el caucho se vuelve más maleable, para evitar el alto torque ejercido por el motor y evitar fallas de algún tipo en la máquina.
- Debido a la alta presión ejercida por la unidad hidráulica a la estructura de la vulcanizadora, se recomienda reforzar la estructura en forma de C que soporta el molde en su parte superior para evitar un futuro incidente.

BIBLIOGRAFÍA

Ramos J – Sanchez S.Vulcanizacion y formulacion de hules. I. Mexico.Limusa noriega editores . 2003 .

Morton, M, Ed. Rubber technology. 2ed. New york: Van nostrand reinhold. 1973.

Naunton. W. J. S. Ciencia y tecnología del caucho. Mexico : cec sa, 1967.

Wake, W .Analysis of rubber and rubber.1 ed. London.1958.

Barlow. F.Rubber compounding and techniques.2 ed. New york. Marcel dekker.1993.

Bolz. R—Tuve.G. Crc handbook of tables for appliedy engineering science. 1 ed. Cleveland. Oh.1973.

Gallego, Paula. Diseño Mecánico De Una Máquina Universal De Ensayos. Pereira. Universidad Tecnológica De Pereira. 2007.

WEBGRAFIA

[instron.com.ar/wa/glossary/Compressive-Strength.aspx] 2013

[[MatWeb.com/MaterialPropertyData/AISI4145H Steel](http://MatWeb.com/MaterialPropertyData/AISI4145H%20Steel)] 2014